

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

И

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЗОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО • ТРАНСПОРТ •

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЗОВ

---

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Под редакцией  
доктора техн. наук проф.  
Е. Я. ГАККЕЛЬ

Утверждено  
Главным управлением учебными заведениями МПС  
в качестве учебника для студентов вузов  
железнодорожного транспорта



МОСКВА «ТРАНСПОРТ» 1981

**Электрические машины и электрооборудование тепловозов.** Учебник для вузов ж. д. трансп. / Е. Я. Гаккель, К. И. Рудая, И. Ф. Пушкарев, А. В. Лапин, В. В. Стрекопытов, М. А. Никулин; Под ред. Е. Я. Гаккель. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1981. — 256 с.

Рассмотрены назначение, устройство и работа электрической передачи, вспомогательных машин и аппаратов, а также узлов и элементов автоматики тепловозов. Приведены схемы электрических соединений тепловозов.

Второе издание вышло в 1974 г.

В новом издании большое внимание уделяется передаче переменного-постоянного тока, а также бесконтактной электронной аппаратуры.

Для студентов вузов железнодорожного транспорта, представляет интерес для инженерно-технических работников локомотивного хозяйства.

Ил. 180, табл. 23, библиогр. 25 назв.

Книгу написали: Гаккель Е. Я. — введение, главы 1, 8 и 13, п. 7—9 главы 3 совместно с М. А. Никулиным; Рудая К. И. — главы 2, 9 и п. 10 главы 3; Пушкарев И. Ф. — главы 7, 10 и 12; Лапин А. В. — п. 11—18 главы 4; Стрекопытов В. В. — главы 5, 6, 11 и п. 19, 20 главы 4.

Рецензенты: кандидаты техн. наук А. М. Костомин (БНИИЖТ), Л. К. Филиппов (ВНИИЖТ).

## ВВЕДЕНИЕ

*Энергетической цепью локомотива* называется комплекс агрегатов, которые преобразуют энергию, поступающую на локомотив, в механическую энергию, используемую для движения поезда. Первичным двигателем тепловоза является дизель. В дизеле происходит преобразование химической энергии топлива, сгорающего в цилиндрах, в механическую энергию, реализуемую на его валу.

Наиболее прост был бы привод от вала дизеля непосредственно к осям движущих колес, но практически это неприемлемо, так как характеристика дизеля не соответствует требованиям, предъявляемым к тяговой характеристике тепловоза.

Дизель можно нагружать только после достижения определенной частоты вращения его вала, при которой обеспечивается самовоспламенение топлива в цилиндрах; наименьшая частота вращения вала  $n_{\text{min}}$ , при которой можно нагружать дизель, составляет примерно  $1/3$  номинальной  $n_n$  (рис. 1). Мощность на валу дизеля  $N_d$  пропорциональна частоте вращения вала. При значительном увеличении частоты вращения сверх номинальной эта закономерность несколько нарушается вследствие ухудшения наполнения цилиндров воздухом. Вращающий момент на валу дизеля  $M_d$  пропорционален среднему эффективному давлению  $p_e$  и при неизменной подаче топлива за цикл практически не зависит от частоты вращения вала. Кроме того, дизель плохо воспринимает перегрузку, мощность при этом падает.

При непосредственном приводе *тяговая характеристика тепловоза*, т. е. зависимость силы тяги от скорости движения, аналогична зависимости момента на валу дизеля от частоты вращения вала (рис. 2, кривая 1). При этом не обеспечиваются трогание поезда с места и его разгон. Полная мощность дизеля может быть использована только на труднейшем участке профиля; на более легких участках дизель недогружен.

Движение поезда по пути переменного профиля требует изменения силы тяги локомотива в широком диапазоне. Идеальной по условиям нагрузки дизеля является *тяговая характеристика*, при которой *сила тяги обратно пропорциональна* скорости движения (рис. 2, кривая 2). Для реализации такой характеристики необходимо включать в энергетическую цепь между валом двигателя и движущими осями тепловоза промежуточное звено, называемое *передачей*.

Наиболее проста *механическая передача*, когда между валом дизеля и осью движущей колесной пары установлен механический редуктор. Тяговая характеристика при такой передаче получается ступенчатой, что является общим недостатком системы, кроме того, при большой мощности неизбежны удары при переключении ступеней. Механическая передача была признана неприемлемой еще на первом этапе создания тепловоза.

*Гидравлическая передача* представляет собой группу гидродинамических преобразователей, приближающих тяговую характеристику к оптимальному виду. Этот вид передачи имеет ряд преимуществ перед механической передачей и в некоторых странах широко применяется. Например, в ГДР и ФРГ подавляющая часть локомотивных парков представлена тепловозами с гидропередачей.

Большое распространение получила *электрическая передача*. Генератор преобразует механическую энергию дизеля в электрическую энергию, которой питаются тяговые электродвигатели. Механическая энергия тяговых электродвигателей передается движущим колесным парам через простейший зубчатый привод. Двойное преобразование энергии механической в электрическую и электрической в механическую может показаться нецелесообразным.

Однако потери энергии в электрических элементах невелики; ж. п. д. электрической передачи составляет от 84 до 88%, а ее эксплуатационные качества обеспечивают наилучшие тяговые и экономические свойства локомотива.

Эта передача позволяет получить необходимую зависимость силы тяги тепловоза от скорости его движения при постоянном моменте на валу дизеля и при постоянной частоте вращения его вала. Силу тяги и скорость движения можно автоматически регулировать с изменением сопротивления движению поезда. Наконец электрическая передача допускает дистанционное управление элементами энергетической цепи, включая управления несколькими локомотивами с одного поста по «системе многих единиц». Кроме того, одну из основных машин передачи — генератор можно использовать в качестве стартерного двигателя при пуске дизеля; широко применять автоматизацию управления всеми элементами энергетической цепи тепловоза; обеспечивать высокий коэффициент сцепления движущих колес тепловоза с рельсами.

В создании тепловозов с электрической передачей ведущая роль принадлежит отечественной науке и технике. Еще в конце прошлого столетия русскими инженерами было разработано несколько проектов тепловозов с электрической передачей, но в условиях царской России ни один из проектов не был осуществлен. После Великой Октябрьской социалистической революции по инициативе Владимира Ильича Ленина Совет Труда и Оборона 4 января 1922 г. принял решение о проектировании и постройке тепловозов. Первый в мире мощный поездной тепловоз был построен на ленинградских заводах. Это был тепловоз с электрической передачей Ц<sup>эл</sup> 1. Дата выхода тепловоза Ц<sup>эл</sup> 1 на пути Октябрьской железной дороги — 7 ноября 1924 г. является исторической датой начала практического применения тепловозной тяги. За период с 1922 по 1935 г. было спроектировано и построено несколько типов магистральных и маневровых тепловозов: Э<sup>эл</sup> 2, Э<sup>мх</sup> 3, Э<sup>эл</sup> 5, Э<sup>эл</sup> 6, О<sup>эл</sup> 6, О<sup>эл</sup> 7, Э<sup>эл</sup> 8, Э<sup>эл</sup> 9 и др. Большинство опытных тепловозов, а также и первые серийные тепловозы Э<sup>эл</sup> строились на Коломенском заводе. Все они, кроме тепловоза Э<sup>мх</sup> 3, имели электрическую передачу.

После Великой Отечественной войны новый центр тепловозостроения был организован в г. Харькове на основе кооперации двух предприятий: завода транспортного машиностроения им. В. А. Малышева и завода тепловозного электрооборудования «Электротяжмаш». Построенные вскоре после войны тепловозы серии ТЭ1 мощностью 736 кВт были первыми отечественными тепловозами с саморегулированием электрической части энергетической цепи. С 1948 г. начался выпуск тепловоза серии ТЭ2, состоящего из двух секций. Каждая секция по энергетическому оборудованию аналогична тепловозу ТЭ1, за исключением количества тяговых электродвигателей: на ТЭ1 — шесть двигателей; на одной секции ТЭ2 — четыре двигателя.

Очень распространенный магистральный тепловоз серии ТЭ3 также двухсекционный. В качестве первичного двигателя на нем применен двухтактный

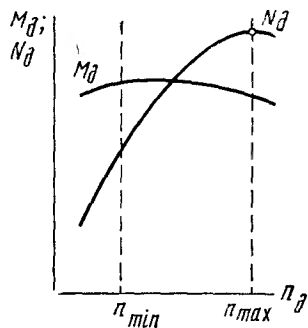


Рис. 1. Характеристика дизеля

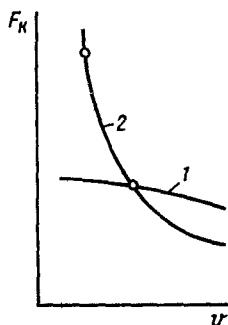


Рис. 2. Тяговая характеристика тепловоза:

1 — при непосредственном приводе; 2 — идеальная

дизель мощностью 1470 кВт. Электрическое оборудование тепловоза ТЭЗ аналогично оборудованию тепловозов ТЭ1 и ТЭ2, но электрическая схема более совершенна.

После XXI съезда КПСС, наметившего программу технической реконструкции железнодорожного транспорта на основе электрификации дорог и широкого внедрения тепловозной тяги, значительно расширилось производство тепловозов.

Тепловозы различных серий строят заводы в городах: Ворошиловграде, Коломне, Брянске, Людинове и Калуге. Центром производства тепловозного электрооборудования остается Харьковский завод «Электротяжмаш»; на этом же заводе и в созданном на его базе научно-исследовательском институте электротехнического машиностроения (НИИЭТМ) разрабатываются проекты новых систем электрической передачи. Построенные в период 1961—1971 гг. тепловозы имели более высокую мощность. Получило новое развитие выполнение энергетических элементов и средств автоматизации. В тяговых передачах этих тепловозов, так же как и на первых типах, применены машины постоянного тока. На тепловозах ТЭ10 и ТЭП60 мощностью 2200 кВт с двухтактными дизелями типов Д100 и Д45 впервые применено не машинное, а аппаратное регулирование генератора на базе магнитных усилителей, что потребовало установки на тепловозах источников переменного тока — синхронных возбuditелей.

Новыми аппаратами в системе регулирования являются магнитные усилители, использованные и в качестве чувствительных элементов системы и в роли исполнительного регулирующего устройства, а также полупроводниковые выпрямители. Последующее развитие тепловозов такой мощности выражается заменой контактных аппаратов бесконтактными, усовершенствованием систем защиты и повышением надежности как энергетического, так и вспомогательного оборудования.

На тепловозе ТЭ109 применен впервые тяговый генератор переменного тока. Это продиктовано практической необходимостью, так как по габаритам и коммутационным условиям мощность генератора постоянного тока ограничена. Этим тепловозом и тепловозом ТЭ116 начат переход к передаче на переменном токе, которая необходима для дальнейшего повышения надежности тепловоза и возможности выполнения его любой мощности.

На международной выставке «Железнодорожный транспорт — 77», состоявшейся летом 1977 г. в г. Москве, все отечественные тепловозостроительные заводы представили свои тепловозы. Ворошиловградский тепловозостроительный завод выставил два типа тепловозов мощностью 2200 кВт, успешно прошедших эксплуатационную проверку ТЭ10В с передачей постоянного тока и ТЭ116 с передачей переменного-постоянного тока и два опытных тепловоза мощностью 2940 кВт: ТЭ109 с передачей переменного-постоянного и ТЭ120 с передачей переменного тока. Коломенский завод представил два тепловоза с передачей переменного-постоянного тока: ТЭП70 мощностью 2940 кВт и опытный ТЭП75 мощностью 4400 кВт.

Передача переменного-постоянного тока применена и на маневрово-вывозном тепловозе ТЭМ7 мощностью 1470 кВт, представленном на выставке Людиновским заводом.

Построен тепловоз ТЭ121 2940 кВт в секции с опорно-рамным подвешиванием тяговых электродвигателей. Готовится к выпуску четырехсекционный тепловоз 4ТЭ130 для БАМ. Дальнейшее совершенствование тепловоза с электрической передачей охватывает все звенья его энергетической цепи, вспомогательные машины, системы автоматического регулирования, управления и защиты. Основные технические данные современных отечественных тепловозов приведены в литературе [8].

# ГЛАВА 1

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На современных тепловозах широко используются автоматические системы управления. Для проектирования и исследования электрического обслуживания тепловоза необходимо знать основы автоматики и принципы автоматического регулирования и управления [14, 25]. «Естественные» статические характеристики звеньев энергетической цепи не соответствуют требованиям тяги. Следовательно, необходимо изменять параметры энергетической цепи или ее выходные координаты таким образом, чтобы их взаимосвязь и взаимодействие обеспечивали требуемую тяговую характеристику локомотива  $E_k = f(v)$ . Подлежат регулированию и вспомогательные агрегаты тепловоза. Элементы энергетической цепи, вспомогательные агрегаты локомотива нуждаются в автоматической защите.

Любая сколь угодно сложная система может быть рассмотрена как цепь элементов или «звеньев», обладающих собственными характеристиками, определяемыми их параметрами, т. е. постоянными свойствами. Физическая величина, под влиянием которой изменяется состояние звена (рис. 3), называется *координатой входа*  $x_{вх}$ . Состояние звена характеризуется некоторым значением  $x_{вых}$ , называемым *координатой выхода*. Зависимость  $x_{вых} = f(x_{вх})$  является *характеристикой звена*, вид которой зависит от его параметров, т. е. от его устройства и от происходящих в нем физических процессов. Общая характеристика системы зависит от характеристик ее звеньев и от схемы их взаимного соединения. Характеристика звена или системы может не удовлетворять предъявляемым к ней требованиям. В таких случаях необходимо дополнительное воздействие на звено в виде управления или регулирования.

На объект  $O$ , кроме внешнего воздействия нагрузки  $F$ , являющейся его координатой входа, может быть оказано дополнительное управляющее (регулирующее) воздействие  $z$ . В итоге координата выхода  $x_{вых}$  зависит не только от внешнего воздействия, но и от управляющего «сигнала»  $x_{вых} = f(F, z)$ . В функциональных схемах управления и регулирования (рис. 4) выделены: чувствительный элемент  $Ч$  — устройство, принимающее сигнал воздействия в первоначальном его виде; исполнительное устройство  $И$ , которым формируется сигнал для подачи на объект, и распорядительное устройство  $Р$ , служащее для увязки характеристик чувствительного и исполнительного устройств и для конструкционного объединения цепи.



Рис. 3. Элементарное звено

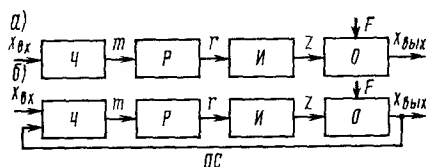


Рис. 4. Функциональные схемы:  
а — управления; б — регулирования

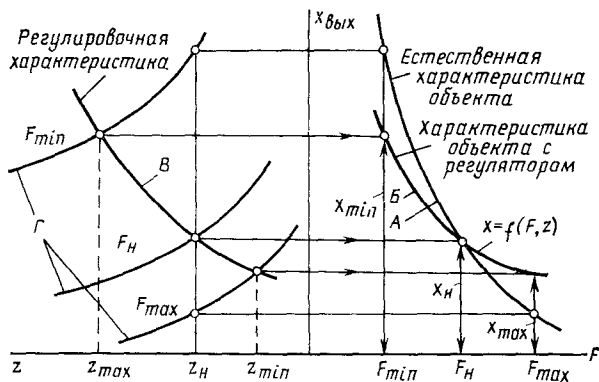


Рис. 5. Графическое построение характеристики объекта с регулятором

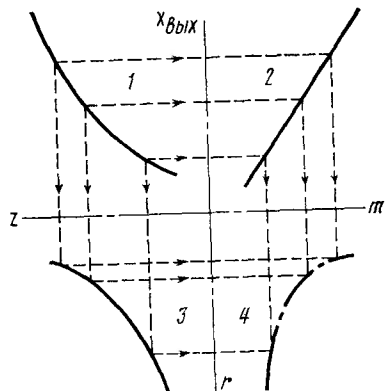


Рис. 6. Построение характеристик цепи регулирования способом четырехквadrантной диаграммы

Эти же схемы позволяют установить различия между управлением и регулированием. *Управление* — ведение процесса по заданной программе без учета состояния объекта управления. *Регулирование* — ведение процесса по заданной программе с учетом состояния объекта регулирования. Воздействие на объект регулирования координаты его состояния, т. е. подача на вход цепи регулирования ее координаты выхода, называется *обратной связью*.

Система с обратной связью является замкнутой. Характеристика объекта  $x_{\text{вых}} = f(F, z)$  зависит как от его собственной («естественной») характеристики  $x_{\text{вых}} = f(F)$ , так и от характеристики воздействия регулятора, называемой *регулирующей характеристикой*  $z = f(x)$ . Регулирующая характеристика B (рис. 5), отражающая закон изменения регулирующего сигнала  $z$  для получения заданной характеристики B объекта, строится графически путем нахождения на характеристиках Г регулятора точек с новыми заданными значениями  $x$  при определенных значениях  $F$ .

Принципиально возможно выполнение любого сколь угодно сложного процесса регулирования. Практически для этого требуется такой подбор характеристики звеньев цепи, чтобы в итоге последовательного преобразования входного сигнала регулирования получать на выходе «регулятора» требуемый характер  $z = f(x)$ . На рис. 6 показано построение характеристики исполнительного элемента 4 цепи регулирования (регулятора) способом четырехквadrантной диаграммы по известным характеристикам объекта 1, чувствительного 2 и исполнительного 3 элементов.

Конструкция звеньев цепи разнообразна, она зависит от цели, т. е. программы регулирования, требуемой точности ведения процесса, быстродействия регулятора и от избранного типа элементов — механические, электрические, гидравлические и т. д.

## 2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ТЕПЛОВОЗА

**Постановка задачи.** Автоматическое регулирование энергетической цепи является сложной задачей, от решения которой зависят тяговые качества локомотива, его экономичность и надежность. Функциональная взаимосвязь элементов энергетической цепи тепловоза с электрической передачей показана на рис. 7. Потребителем механической энергии дизеля Д, его «нагрузкой»

является генератор  $\Gamma$ . Нагрузку генератора представляет тяговый двигатель  $\Gamma\Delta$  (практически несколько двигателей), в котором электрическая энергия вновь преобразуется в механическую энергию для преодоления работы сопротивления движению поезда.

Мощность, реализуемая движущими колесными парами, так называемая *касательная мощность*  $N_k$ , равна мощности, получаемой генератором от дизеля  $N_{д-г}$ , с учетом потерь  $\rho$  элементах передачи.

Передаваемая генератору мощность дизеля

$$N_{д-г} = N_d - N_v,$$

где  $N_d$  — мощность на валу двигателя;

$N_v$  — мощность вспомогательных агрегатов тепловоза, приводимых от дизеля, 8—10%  $N_d$ .

Касательная мощность  $N_k = N_{д-г} \eta_{п}$ .

Коэффициент полезного действия передачи

$$\eta_{п}^* = \eta_r \eta_{гд} \eta_{зп},$$

где  $\eta_r$  — к. п. д. генератора (0,9 ÷ 0,95);

$\eta_{гд}$  — к. п. д. тягового двигателя (0,92 ÷ 0,94);

$\eta_{зп}$  — к. п. д. зубчатой передачи от тягового двигателя к движущей оси (0,95 ÷ 0,98).

Касательная мощность в киловаттах

$$N_k = k F_k v,$$

где  $F_k$  — сила тяги, кН;

$v$  — скорость движения, км/ч.

$k$  — коэффициент, учитывающий принятую систему единиц.

Сила тяги локомотива  $F_k$  должна уравнивать суммарное сопротивление движению поезда  $\Sigma W$ , т. е. локомотив должен обеспечить  $F_k = \Sigma W$ , следовательно, и сила тяги его должна изменяться в широких пределах (см. рис. 2 — идеальная тяговая характеристика).

Как уже известно, передача на тепловозе обеспечивает требуемый вид тяговой характеристики при неизменном режиме работы дизеля. Задачей системы регулирования энергетической цепи является такая трансформация характеристик элементов передачи, при которой выполняется это условие. Тяговый электродвигатель как звено, непосредственно связанное с движущими осями, имеет электромеханические характеристики:  $M = f(I)$  и  $n = \varphi(I)$ , момент вращения на валу и частоту вращения вала в зависимости от тока его нагрузки, которые воспроизводит тяговая характеристика. Характеристики должны иметь вид, удовлетворяющий изложенному выше условию. Приведение этих характеристик к требуемому виду и является задачей автоматического регулирования. В качестве сигналов должны быть использованы координаты выхода энергетической цепи, т. е. физические величины, изменяющиеся с изменением ее нагрузки.

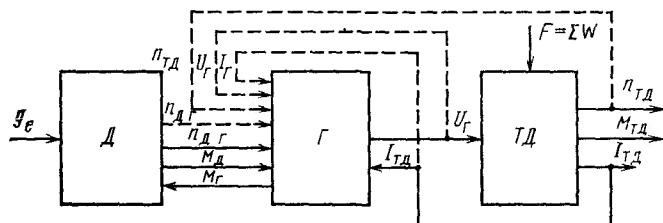


Рис 7. Функциональная схема энергетической цепи тепловоза

Состояние энергетической цепи тепловоза под влиянием нагрузки характеризуется координатами:  $n_{тд}$  — частота вращения вала тягового двигателя;  $I$  — ток нагрузки тягового двигателя (т. е. и генератора),  $U$  — напряжение генератора;  $n_{д-г}$  — частота вращения вала дизеля, а значит, и генератора. В качестве объекта регулирования может быть избран любой из элементов энергетической цепи.

**Регулирование дизеля.** Основное условие работы дизеля — постоянство нагрузки его при переменной внешней нагрузке тепловоза. Следовательно, применительно к первому звену цепи — дизелю задание регулирования:  $N_d = \text{const}$ . Для четкости последующих рассуждений допустимо предположение неизменного значения нагрузки вспомогательных агрегатов. Мощность, развиваемая дизелем, зависит от давления газа, расширяющегося в цилиндре, т. е. от количества подаваемого топлива и от скорости перемещения поршня, а значит, и от частоты вращения вала.

Внешняя характеристика дизеля, т. е. закон зависимости мощности  $N_d$  от частоты вращения его вала при наибольшей подаче топлива в цилиндры, изображена кривой 1 на рис. 8. Для сохранения неизменной частоты вращения вала дизель снабжается регулятором, который настраивают на поддержание той частоты вращения, при которой мощность дизеля максимальна. На большинстве тепловозов эта операция выполняется отдельно от регулирования остальных элементов энергетической цепи, задачей регулирования которых является нагрузка дизеля на полную его мощность. Кроме внешней характеристики 1 дизеля, на рис. 8 приведены его характеристики при работе на различных позициях контроллера машиниста. В условиях эксплуатации тепловоза значительная доля времени его работы не требует развития дизелем полной мощности. При таких режимах следует уменьшать подачу топлива в цилиндры. Это производится воздействием на топливные насосы цилиндров через регулятор дизеля [25] системой, которая приводится в действие через контроллер управления тепловозом. Полная цикловая подача топлива происходит на высшей позиции контроллера управления. Машинист имеет возможность посредством контроллера управлять режимом дизеля в зависимости от условий движения: работа на более или менее тяжелых участках профиля, движение с ограниченной скоростью и т. д.

На каждом режиме управления центробежным регулятором дизеля автоматически регулируется подача топлива для сохранения постоянства (на этом режиме) частоты и вращения вала дизеля. Распределение позиций управления должно производиться так, чтобы на каждой из них дизель работал при минимальном для этой мощности расходе топлива. При проектировании генератора важно рассчитать его так, чтобы при этих наивыгоднейших для дизеля частоте вращений  $n_{д-г}$  и мощности дизеля  $N_d$  генератор также работал бы с наибольшим к. п. д.

**Регулирование генератора.** От режима генератора зависит нагрузка дизеля, а следовательно, и выполнение условия  $N_d = \text{const}$ . В отличие от вспомогательных машин генератор, являющийся звеном энергетической цепи, называют «главным» или «тяговым». В этой главе это прилагательное опускается. На функциональной схеме взаимодействий элементов энергетической цепи (см. рис. 7) сплошными линиями со стрелками показаны координаты состояния элементов, характеризующие передачу энергии от каждого звена к сле-

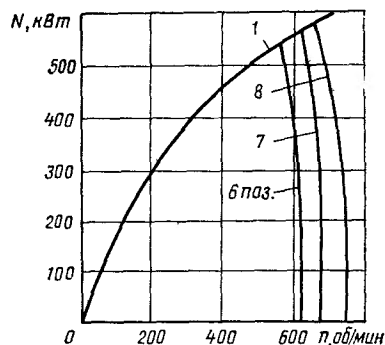


Рис. 8. Характеристики дизеля:  
1 — внешняя; 6, 7, 8 — регуляторные, соответствующие позициям контроллера

дующему и обратное действие каждого звена на предыдущее. Назовем эти координаты постоянными или *естественными* воздействиями.

Основной входной координатой энергетической цепи тепловоза является подача топлива в цилиндры дизеля  $g_d$ , выходными координатами — момент на валу тягового двигателя  $M_{тд}$ , частота вращения его вала  $n_d$  и ток нагрузки двигателя (генератора). Воздействие дизеля на генератор при передаче ему мощности выражается вращением его вала с частотой  $n_{д-г}$ . Генератор оказывает обратное воздействие на дизель, нагружая его вал своим электромагнитным моментом  $M_r$ . Передача энергии от генератора тяговому электродвигателю характеризуется напряжением генератора  $U_r$ .

Состояние тягового двигателя, воспроизводящего внешнюю нагрузку в виде  $F = \Sigma W$ , выражается координатами момента  $M_{тд}$  (силы тяги), частоты вращения вала  $n_{тд}$  (скорости движения) и тока нагрузки  $I_{тд}$ , который является и током нагрузки генератора, т.е. обратным воздействием тягового двигателя на генератор.

Автоматическое регулирование энергетической цепи необходимо, если естественное взаимодействие звеньев не обеспечивает требуемого вида характеристики цепи. Для его осуществления могут быть использованы в качестве сигналов основные координаты состояния цепи  $n_{тд}$ ,  $U_r$ ,  $I_r$  и  $n_{г-д}$ . В качестве объекта регулирования может быть использовано любое звено энергетической цепи или их сочетание. На рис. 7 штриховыми линиями показана подача этих сигналов или искусственных воздействий на вход генератора как объекта регулирования.

Мощность на валу дизеля

$$N_d = kM_d n,$$

где  $M_d$  — момент вращения, Н·м;

$n$  — частота вращения, об/мин;

$k$  — коэффициент, учитывающий принятую систему единиц.

Частота вращения поддерживается постоянной, следовательно, для сохранения постоянства мощности необходимо постоянство момента нагрузки дизеля, т. е. электромагнитного момента генератора

$$M_r = C_m \Phi I, \quad (1)$$

где  $C_m$  — электромеханическая постоянная машины, зависящая от ее конструктивных параметров;

$\Phi$  — магнитный поток возбуждения;

$I$  — ток нагрузки.

Ток нагрузки произвольно изменить невозможно, так как он зависит от механической нагрузки тягового электродвигателя. Для сохранения постоянства мощности генератора, т. е. нагрузки дизеля, имеется единственная возможность: изменение магнитного потока генератора  $\Phi$  обратно пропорционально току  $I$ . При этом выполняется условие:  $M_r = \text{const}$ .

К этому же выводу о средствах регулирования генератора приводит анализ его электрических координат.

Мощность генератора  $P_r = UI \cdot 10^{-3}$ , где  $U$  — напряжение на зажимах. При определенной нагрузке  $I$  мощность может быть изменена лишь за счет напряжения; при требовании сохранения постоянства мощности напряжение надлежит изменять обратно пропорционально току. Средства воздействия на напряжение можно выявить, рассматривая баланс э. д. с. генератора. Уравнение э. д. с.  $U = E - Ir$ , где  $E$  — э. д. с. генератора;  $Ir$  — падение напряжения в обмотках якоря.

При определенной нагрузке  $I$  напряжение зависит только от электродвижущей силы  $E = C_e \Phi n$ , где  $C_e$  — электрическая постоянная машины.

Частота вращения якоря тепловозного генератора неизменна, так как на каждой позиции управления дизеля  $n_{д-г} = \text{const.}$  Воздействовать на напряжение возможно лишь через магнитный поток  $\Phi$ . Анализ электрических параметров генератора привел к тому же выводу, что и анализ его механических свойств.

Одной из важнейших характеристик генератора является его выходная или *внешняя* характеристика, представляющая собой зависимость напряжения от тока нагрузки, т. е.  $U = f(I)$ . Для выполнения условия постоянства мощности генератора  $P_g = \text{const}$  необходимо, чтобы при изменении его нагрузки сохранялось неизменным произведение напряжения на ток, т. е.  $UI = \text{idem}$ .

В этом идеальном случае внешняя характеристика генератора представлена равнобокой гиперболой (рис. 9, кривая А). Такая характеристика не может быть беспредельной. Практически она осуществима в некотором диапазоне нагрузки от  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$ . При токах, меньших  $I_{\min}$ , действует ограничение напряжения  $U_{\max}$  по условиям насыщения магнитной цепи генератора (участок а—б). Значение  $I_{\max}$  обусловлено допустимым тепловым состоянием машины (участок б—г). Для машин постоянного тока необходимо учитывать также и ограничения условиям коммутации. Для сохранения постоянства мощности и возможно большем диапазоне внешней, т. е. тяговой нагрузки тепловоза, желательно, чтобы диапазон  $I_{\min} - I_{\max}$  был как можно шире. Однако, устанавливая границы работы по гиперболической внешней характеристике, необходимо руководствоваться и технико-экономическими показателями.

Для смещения  $I_{\min}$  в сторону его уменьшения необходимо увеличить  $U_{\max}$ , что возможно за счет повышения проницаемости магнитной цепи машины, а для этого требуется или увеличение сечения магнитопровода, а значит, и всех размеров машины или применение магнитных материалов с более высокими коэрцитивными свойствами. В обоих случаях машина стоит дороже, а в первом случае, кроме того, увеличатся ее габариты и масса. Сдвиг  $I_{\max}$  в сторону его увеличения сопряжен с применением более теплостойких, а значит, и более дорогих изоляционных материалов и усовершенствованием устройства охлаждения машин.

Кроме того, нельзя забывать о характеристике тягового электродвигателя  $F = f(I)$ . По условиям сцепления колес движущих осей с рельсами сила тяги не должна превышать определенного значения  $F_{\max} = P_{\text{сд}} \psi_{\text{сд}}$ . Следовательно, и с этой стороны имеется ограничение тока тяговых двигателей, а значит, и генератора. В гармонически рассчитанной системе ограничение максимального тока генератора по параметрам тяговых электрических машин должно совпадать с границей по условиям реализации силы тяги локомотива.

При работе генератора по идеальной внешней характеристике дизель загружен на полную мощность в пределах гиперболы; вне этих пределов мощность дизеля изменяется так, как это показано кривой Б. Характеристики, представленные на рис. 9, являются предельными, так как они соответствуют режиму максимальной мощности дизеля. Практически это соответствует работе дизеля на высшей позиции управления тепловозом. На остальных позициях при уменьшенных мощностях дизеля и частоте вращения его вала характеристики генератора  $U = f(I)$  лежат соответственно ниже (вспомним, что  $E = C_e \Phi n$ ).

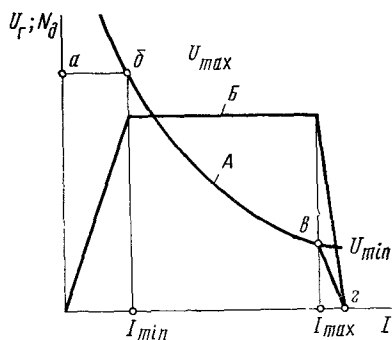


Рис. 9. Идеальная внешняя характеристика генератора (А) и характеристика нагрузки дизеля (Б)

Одним из критериев оценки качеств электрической передачи и системы ее регулирования является мера приближения внешней характеристики генератора к виду гиперболы. Практически это зависит от средств и способов регулирования напряжения генератора при данной характеристике его намагничивания.

Как показано ранее, напряжение регулируется изменением магнитного потока генератора. Для установления возможности такого изменения необходимо учитывать и естественный вид внешней характеристики генератора. Характеристики генераторов постоянного тока зависят от типа их возбуждения [1]. Сопоставляя характеристики генераторов с различными системами возбуждения с идеальной внешней характеристикой тепловозного генератора, можно установить, что ни один из видов возбуждения не обеспечивает получения характеристики требуемого вида.

Наиболее близка к такому виду характеристика генератора со встречно-смешанным возбуждением, где напряжение генератора интенсивно уменьшается с увеличением тока нагрузки. Однако это уменьшение происходит по выпуклой кривой, следовательно, условие  $UI = \text{idem}$  не выполняется.

На большинстве мощных тепловозов применяется независимое возбуждение генератора, а изменение магнитного потока по закону, обеспечивающему гиперболический вид внешней характеристики генератора, осуществляется средствами автоматического регулирования тока возбуждения. На тяговых единицах малой и средней мощности применяют и генераторы смешанного возбуждения (например, на ТУ2). Приближение характеристики к требуемому виду достигается подбором характеристик всех звеньев энергетической цепи.

Для генераторов, в системе возбуждения которых действует единый магнитный поток, хотя бы и создаваемый несколькими обмотками возбуждения, невозможно получить характеристику потока  $\Phi = f(I)$ , обеспечивающую гиперболическую внешнюю характеристику генератора. Такая характеристика получается, если в обмотке якоря машины суммируются две э. д. с., из которых одна постоянна по значению и направлению (линия 1), а вторая (кривая 2) изменяется с изменением нагрузки машины не только по значению, но и по направлению (рис. 10, а). Нужные количественные значения результирующей э. д. с. (кривая 3) получаются путем расчета параметров системы возбуждения по данным требуемой внешней характеристики генератора (рис. 10, б).

Система регулирования генератора по такому принципу была впервые предложена проф. Я. М. Гаккелем в трех схемных решениях (рис. 11). Схемы каскадные, т. е. регулирование перенесено с возбуждения генератора  $G$  на возбуждение его возбудителя  $B$ . Результат тот же, но так как мощность возбудителя значительно меньше мощности генератора, то система регулирования получается компактнее и дешевле.

На современных мощных тепловозах также применяется каскадное регулирование, в связи с чем в число вспомогательных машин тепловозов вошли «подвозбудители» (см. гл. 8), являющиеся в схемах регулирования со статическими преобразователями источниками их питания. На первых тепловозах послевоенной постройки применено автоматическое регулирование тягового генератора при посредстве специальных возбудителей: генераторов с расщепленными полюсами, принцип действия которых рассмотрен в гл. 4. Системы «машинного» регулирования использовались на магистральных тепловозах включительно до тепловоза ТЭЗ.

На тепловозах ТЭ10 осуществлен переход от машинного регулирования к аппаратному. Это обусловлено, с одной стороны, необходимостью повышения надежности всех систем тепловоза и увеличением мощности, с другой стороны, к этому периоду были созданы и освоены электрические бесконтактные аппара-

ты, которые могли быть использованы как элементы системы регулирования. К таким аппаратам относятся магнитные усилители и полупроводниковые выпрямители.

**Магнитный усилитель** — аппарат, функции которого основаны на использовании зависимости переменного тока от индуктивности цепи и зависимости магнитной проницаемости магнитных материалов от их насыщения

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}},$$

- где  $I_{\sim}$  — переменный ток;
- $U_{\sim}$  — напряжение переменного тока;
- $r$  — активное сопротивление цепи;
- $\omega L$  — реактивное сопротивление;
- $\omega$  — частота переменного тока.

Индуктивность электрической цепи

$$L = k\mu,$$

здесь  $k$  — произведение постоянных, характеризующих устройство электромагнита (площадь и длина сердечника, число витков обмотки и т. п.);

$\mu$  — магнитная проницаемость сердечника электромагнита.

При увеличении удельной магнитодвижущей силы  $H$  (рис. 12, а) индукция  $B$  в сердечнике увеличивается, а магнитная его проницаемость уменьшается. Такая закономерность сохраняется до наступления магнитного насыщения. Количественное сочетание переменных зависит от коэрцитивных свойств материалов сердечника. Магнитное состояние сердечника  $C$  (рис. 12, б) зависит от суммарной удельной магнитодвижущей

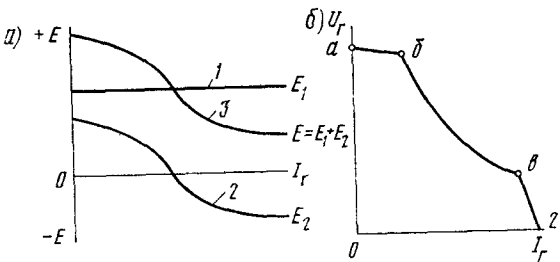


Рис. 10. Характеристики:  
а — возбудителя; б — внешняя характеристика генератора

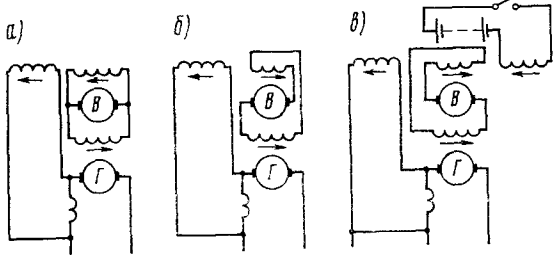


Рис. 11. Первые отечественные схемы автоматического регулирования тепловозного генератора:  
а и б — возбудитель двухобмоточный; в — возбудитель трехобмоточный

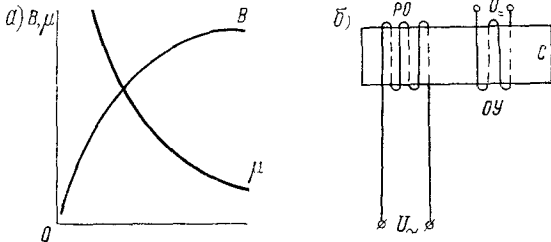


Рис. 12. Магнитный усилитель:  
а — характеристики намагничивания сердечника; б — схема усиления

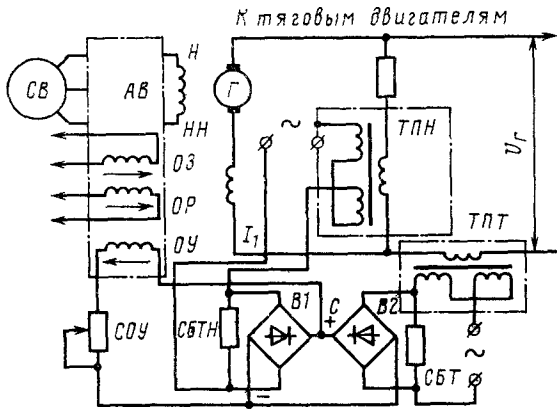


Рис. 13. Принципиальная схема регулирования генератора с применением магнитного усилителя

силы  $H$ , создаваемой рабочей обмоткой  $PO$  и обмоткой управления  $OY$ . При изменении тока в обмотке управления изменяется режим намагничивания сердечника; работа проходит при различных значениях его магнитной проницаемости  $\mu$ . В итоге изменяется ток в рабочей обмотке  $PO$  усилителя.

В системах автоматического управления и регулирования на обмотку управления подается сигнал по той переменной величине, в зависимости от которой должно происходить управление (регулирование)<sup>1</sup>. Практически в магнитных усилителях имеется несколько обмоток управления. Это позволяет использовать не один, а несколько сигналов управления.

В качестве примера на рис. 13 приведена принципиальная схема узла регулирования возбуждения генератора на тепловозах ТЭ10 и ТЭП60 первых лет их выпуска. Возбудитель генератора  $G$  — трехфазный синхронный генератор  $CB$ . Обмотка  $H$ — $HH$  получает питание от  $CB$  через амплистат<sup>2</sup>  $AB$ . Амплистат представляет собой трехфазный магнитный усилитель, рабочая обмотка которого включена на выходные зажимы синхронного возбудителя. В рабочих обмотках амплистата происходит и выпрямление тока по пути входа его в обмотку возбуждения регулируемого генератора.

Для регулирования по заданной программе используются три обмотки управления амплистата:  $OZ$  — задающая — питается током, пропорциональным частоте вращения вала дизеля. Действием этой обмотки определяется («задается») уровень напряжения на каждой позиции управления дизелем;  $OY$  — управляющая — получает питание через селективный узел  $C$ , где происходит формирование сигналов по току нагрузки генератора  $I_r$  и по его напряжению  $U_r$ , получаемых соответственно от трансформаторов постоянного тока  $TPT$  и постоянного напряжения  $TPH$ ;  $OP$  — регулировочная — питается током, пропорциональным изменению частоты вращения вала дизеля  $n_{д-г}$  в пределах регуляторной характеристики.

В системе использованы три из четырех координат состояния энергетической цепи тепловоза (см. рис. 7), т. е. она отражает состояние энергетической цепи полнее, чем ранее рассмотренные системы, в которых используются две координаты состояния — ток нагрузки генератора и его напряжение.

Такие системы, в которых для регулирования генератора участвует и координата состояния дизеля, называются *системами «объединенного» регулирования*. В системах такого вида регулирования возбуждения генератора, а также и во всех более поздних системах магнитные усилители и полупроводниковые выпрямители применяются также в узле питания обмотки управления  $OY$  амплистата.

Устройство и действие полупроводниковых приборов основано на природе и значении проводимости полупроводников. Проводимость вещества пропорциональна количеству свободных электронов в его атоме. В свою очередь способность электронов к переходу в свободное состояние зависит от количества энергии, которой они обладают, т. е. от их валентности.

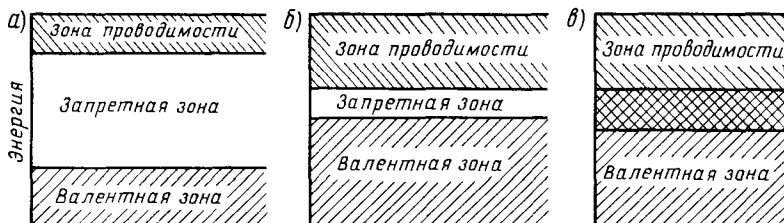
Различие в проводимости твердых веществ хорошо объясняется на основе зонной теории проводимости. Согласно этой теории энергетический уровень атома твердого кристаллического тела представляется разделенным на зоны (рис. 14). *Зоной проводимости* называется зона энергетических уровней, которыми обладают свободные (возбужденные) электроны. Зоны уровней, в которых находятся обладающие наибольшей энергией, т. е. валентные, электроны, называются *валентными зонами*. Эти зоны могут быть разделены промежуточными уровнями энергии, в которых электроны находиться не могут.

<sup>1</sup> Подробно устройство магнитных усилителей, их характеристики и применение на тепловозах см. гл. 5 и 6.

<sup>2</sup> Статический усилитель: *amplifier* — усилитель; *status* — неподвижный.

Рис. 14. Энергетические зоны:

а — диэлектрика;  
б — полупроводника,  
в — проводника



Эти промежутки называются *запретной зоной*. Условно «ширина» запретной зоны определяется количеством энергии, необходимой для перехода одного электрона из валентной зоны в зону проводимости.

В диэлектрике (рис. 14, а) запретная зона очень велика. Чтобы электрон мог ее пройти, необходимо сообщить ему значительное количество энергии. При таких условиях происходит непоправимое разрушение кристаллической структуры — «пробой» изолятора. В полупроводнике (рис. 14, б) запретная зона в несколько раз меньше. Для ее преодоления требуется небольшая затрата энергии (тепловой, электрической, световой и т. п.). В проводниках (рис. 14, в) запретной зоны нет. При обычных энергетических условиях электроны легко переходят из валентной зоны в зону проводимости. Число электронов в этой зоне велико: вещество обладает хорошими проводящими свойствами.

Полупроводники разделяются на два типа по роду проводимости, определяемому преимущественным количеством в материале валентных электронов или свободных от электронов мест на энергетических уровнях, так называемых «дыр». По этому признаку полупроводники характеризуются как обладающие электронной (негативной —  $n$ ) или дырочной (позитивной —  $p$ ) проводимостью. На различии характера проводимости и основано устройство полупроводниковых приборов (рис. 15). Электроны перемещаются к положительному полюсу источника тока. Дыры, ведущие себя как положительные заряды, направляются к отрицательному полюсу. В итоге в первом случае (рис. 15, а) заряды сгущаются на границе двух различных полупроводников — система пропускает ток, во втором случае (рис. 15, б) заряды на границе разрезаются — система заперта.

Количественно характеристики полупроводниковых выпрямителей различны, в зависимости от свойств материалов (рис. 16) качественно они идентичны: резко различаются зависимости тока от напряжения для «прямого» и «обратного» направлений. В обратном направлении (левый нижний квадрант) до некоторого значения приложенного напряжения  $U_{обр}$  ток  $I_{обр}$  ничтожно мал. При достижении некоторого «пробивного» напряжения выпрямитель пропускает ток в обратном направлении, т. е. прибор теряет свойства выпрямителя.

Промышленностью освоено производство «стабилитронов» — полупроводниковых вентилях, обладающих способностью самовосстановления после «пробоя», которые имеют применение в узлах регулирования тепловозов ТЭ109, ТЭ116 и ТЭ121.

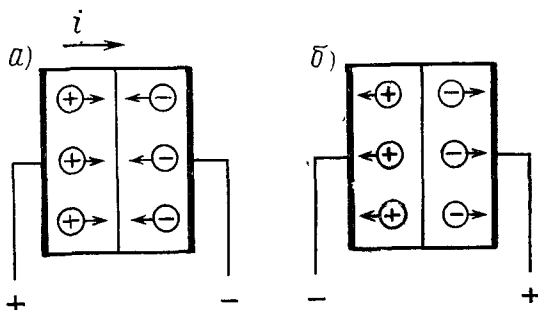


Рис. 15. Принципиальная схема действия полупроводникового вентиля:

а — пропускная полярность; б — запирающая полярность

Отбор сигналов регулирования генератора по току его нагрузки  $I_r$  и по напряжению  $U_r$  производится однофазными магнитными усилителями, названными соответственно трансформатором постоянного тока ТПТ и трансформатором постоянного напряжения ТПН (см. рис. 13). Рабочие обмотки ТПТ и ТПН питаются переменным током от СВ через распределительный трансформатор. Обмотка управления ОУ принимает сигналы по току и напряжению регулируемого генератора, т. е. является чувствительным элементом системы регулирования, реагирующим на ее нагрузку. Ток рабочих обмоток ТПТ и ТПН выпрямляется в выпрямительных мостиках В1 и В2.

Параметры рабочих обмоток ТПТ и ТПН и балластных сопротивлений, т. е. избирательного или «селективного» узла С, подобраны так, что в зоне ограничения напряжения генератора (см. рис. 9) сигнал по току через мостик не проходит и на обмотку ОУ амплитата поступает только сигнал по напряжению. При наибольшем токе нагрузки не проходит сигнал по напряжению и система автоматически обеспечивает ограничение характеристики генератора по току. В рабочем диапазоне нагрузки на ОУ поступают сигналы по напряжению и по току генератора.

При всех режимах обмотка ОУ оказывает размагничивающее действие на магнитную цепь амплитата. При регулирующем воздействии обмоток ОУ и ОЗ идеализированная характеристика генератора приобретает вид, изображенный на рис. 17, где АБ — ограничение по напряжению, ВГ — ограничение по току. В рабочей зоне совместным действием сигналов по напряжению и току образуется участок характеристики, показанный штриховой линией. Селективный узел настраивается так, что в точках Б и В дизель загружен полностью. Следовательно, при работе генератора по этому участку дизель перегружается.

Нормальная нагрузка дизеля устанавливается действием третьей — регулировочной — обмотки амплитата ОР. Эта обмотка, питаемая от вспомогательного генератора, реагирует на состояние дизеля. В цепи ОР помещается резистор, сопротивление которого изменяется воздействием со стороны регулятора: при перегрузке дизеля сопротивление увеличивается. В первые годы выпуска тепловозов с такой системой регулирования применялся резистор, в котором механическая связь с регулятором дизеля осуществлял перемещение движка, а затем стали устанавливать индуктивный датчик в виде катушки с перемещающимся сердечником. Регулировочная обмотка действует согласно с задающей обмоткой ОЗ. На рис. 17 штриховыми линиями показаны характеристики генератора на промежуточных позициях. Схема регулирования генератора через магнитный усилитель в каскадном выполнении, как это сделано на тепловозах ТЭ10В и ТЭ10Л, описана в гл. 7. При каскадной схеме регулирования значительно понижается мощность всех элементов системы регулирования, а следовательно, их габариты и стоимость.

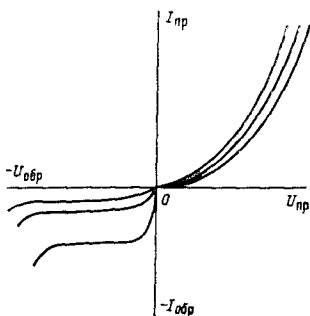


Рис. 16. Возможные формы характеристик полупроводниковых выпрямителей

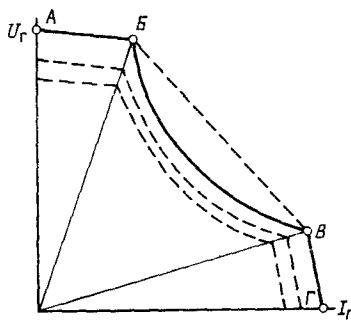


Рис. 17. Внешняя характеристика генератора при регулировании через амплитат

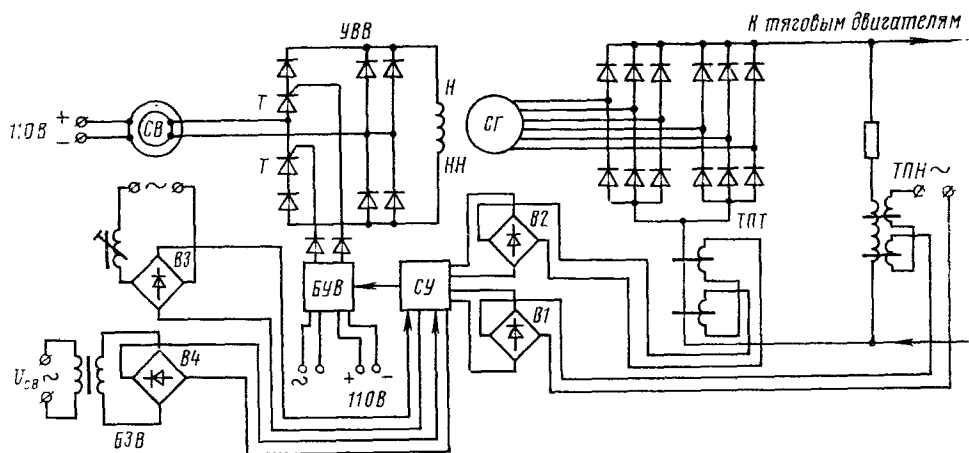


Рис. 18. Принципиальная схема регулирования синхронного генератора в передаче переменного-постоянного тока

Регулирование генератора в передаче переменного-постоянного тока, так же как в схемах постоянного тока, сосредоточено в узле возбуждения генератора (рис. 18). Питание обмоток возбуждения осуществляется от синхронного возбудителя СВ. По пути в цепь возбуждения тягового генератора СГ происходит выпрямление тока и его регулирование. В системе автоматического регулирования использован ряд элементов, освоенных в системах постоянного тока: магнитные усилители ТПТ и ТПН для отбора сигналов по напряжению генератора и по току его нагрузки, датчик БЗВ для установления уровня напряжения по позициям управления, индуктивный датчик ИД для связи регулирования генератора и дизеля.

Центральный узел системы, осуществляющий заданный закон регулирования возбуждения генератора, новый. Роль, которую в ранее рассмотренных системах (см. рис. 13) играет амплистат АВ в схеме (см. рис. 18), выполняет управляемый выпрямительный блок УВВ. Эта замена не является специфичной для системы регулирования передачи переменного-постоянного тока, так как синхронный генератор возбуждается постоянным током, так же как генератор постоянного тока.

Осуществление системы с УВВ стало возможным благодаря освоению полупроводниковой техники. Это позволило применять в таких ответственных системах, как регулирование генератора — управляемые диоды — тиристоры. Эта же система после сопоставления ее эксплуатационных и экономических показателей с показателями иных систем может быть применена и в передаче на постоянном токе, при использовании возбудителя как источника переменного тока.

Формирование требуемого закона регулирования возбудителя СГ происходит в селективном узле СУ. Здесь собираются все сигналы состояния энергетической цепи тепловоза и производится их дозировка в соответствии с режимом нагрузки. Как и в системе с амплистатом возбуждения (см. рис. 13), основными сигналами, определяющими вид внешней характеристики генератора, являются сигналы по току генератора и по его напряжению от ТПТ и ТПН. (Практически с целью защиты от боксования на современных тепловозах устанавливается не один, а несколько ТПТ.) Сигнал по нагрузке дизеля через ИД (см. рис. 18) объединяет регулирование дизеля и генератора. Уровень напряжения в соответствии с мощностью дизеля по позициям управления задается частотным датчиком БЗВ.

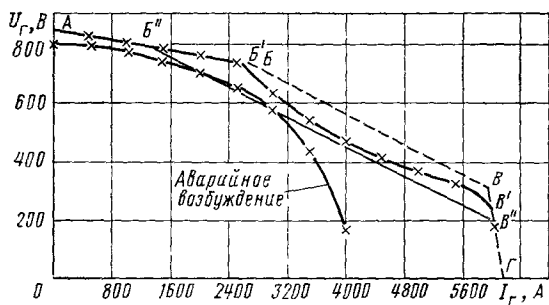


Рис. 19. Внешняя характеристика синхронного генератора на выходе выпрямительного блока

дения  $H$ — $HH$ , оказывается через управляемые выпрямители — тиристоры  $T1$  и  $T2$  путем подачи импульсов от  $БУВ$  для их открытия или закрытия.

Внешняя характеристика синхронного генератора тепловоза ТЭ116, регулирование которого осуществляется по рассмотренной системе, изображена на рис. 19. Селективный узел тепловоза построен так, что цепь каждого из сигналов можно настраивать в отдельности. Это позволяет хорошо настраивать систему в целом. На характеристике можно выделить действие индуктивного датчика. При наибольшем токе этого датчика напряжение генератора регулируется по прямой  $БВ$ , при минимальном токе — по прямой  $Б''В''$ . В процессе работы объединенный регулятор стремится поддержать мощность генератора равной свободной мощности дизеля. Практическое регулирование напряжения происходит по гиперболической кривой  $Б'В'$ .

Все современные системы регулирования генератора разделяются на несколько групп — по типу «регулятора» и по способу подачи на регулятор сигналов — координат состояния регулируемого объекта.

Такие группы представлены их функциональными схемами (рис. 20). При машинном регулировании (рис. 20, а) используются лишь сигналы состояния электрической части энергетической цепи:  $I$ ,  $U$ .

Аппаратное и объединенное регулирование представлено схемами на рис. 20, б, в; используется и сигнал состояния дизеля, передаваемый через индуктивный датчик  $ИД$ . Регулятором возбуждения генератора являются: магнитный усилитель  $МУ$  (рис. 20, б), управляемый выпрямитель  $УВВ$  (см. гл. 6, 7 и 8). Здесь широко используются полупроводниковые аппараты:

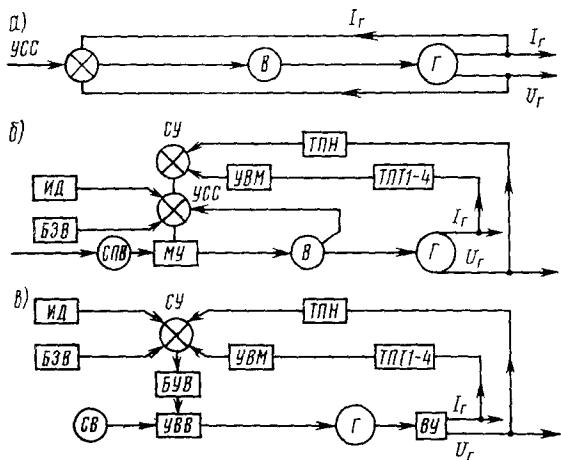


Рис. 20. Функциональные схемы регулирования генератора:

а — машинное регулирование; б — аппаратное регулирование посредством магнитного усилителя; в — аппаратное регулирование посредством управляемых выпрямителей;  $Г$  — генератор;  $В$  — возбуждатель;  $СВ$  — синхронный возбуждатель;  $СПВ$  — синхронный подвозбудитель;  $ИД$  — индуктивный датчик;  $БЗВ$  — блок задания уровня возбуждения;  $СУ$  — селективный узел;  $УСС$  — узел суммирования сигналов;  $ТПН$  — трансформатор постоянного тока;  $ДТ$  — датчик сигнала по току нагрузки;  $УВМ$  — узел выделения максимального сигнала по току нагрузки;  $ТПН$  — трансформатор постоянного напряжения — датчик сигнала по напряжению генератора;  $МУ$  — магнитный усилитель — амплистат возбуждения;  $УВВ$  — управляемый выпрямитель возбуждения;  $БУВ$  — блок управления выпрямителями;  $ВУ$  — узел выпрямления напряжения синхронного тягового генератора

в узле выделения максимального сигнала по току  $УВМ$ , в селективном узле  $СУ$ , в блоке управления выпрямителями (тиристорами)  $БУВ$ , в выпрямительном узле цепи нагрузки генератора  $ВУ$ , а также во всех сигнальных цепях, где требуется преобразование переменного тока в постоянный.

Схема с магнитным усилителем может служить примером каскадной схемы — регулирование здесь перенесено с цепи возбуждения генератора  $G$  на цепь возбуждения его возбудителя  $B$ , в связи с чем здесь имеется дополнительная электрическая машина малой мощности — синхронный подвозбудитель СПВ. Принципиально каскад может быть построен и в схеме с управляемыми выпрямителями возбуждения.

Примерами практического осуществления являются: по схеме  $a$  — система регулирования на тепловозах ТЭ2, ТЭ3, ТЭМ2, ТЭМ3; по схеме  $b$  — на ТЭ10, ТЭП60, ТЭ10Л, ТЭ10В, М62; по схеме  $в$  — на ТЭ116, ТЭ121, ТЭП70, ТЭМ7 и тепловозах переменного тока ВМЭ1А-024.

**Регулирование тяговых электродвигателей.** Для использования полной мощности дизеля в возможно большем диапазоне тяговой нагрузки необходимо, чтобы тяговые электродвигатели загружали генератор в пределах гиперболической части его внешней характеристики, т. е. в пределах тока  $I_{г\max} - I_{г\min}$ . При изменении сопротивления движению, а следовательно, силы тяги локомотива ток нагрузки тяговых электродвигателей изменяется в соответствии с их электромеханическими характеристиками. Вид характеристик двигателя постоянного тока определяется выражениями:

$$n_{тд} = \frac{U - I_{тд} r}{C_e \Phi_{тд}}; \quad (2)$$

$$M_{тд} = C_m \Phi_{тд} I_{тд}, \quad (3)$$

где  $n_{тд}$  — частота вращения якоря тягового двигателя;

$r$  — сопротивление обмоток двигателя;

$C_e, C_m$  — электрическая и электромеханическая постоянные двигателя;

$M_{тд}$  — момент вращения на валу тягового двигателя.

Ток нагрузки двигателя зависит от развиваемой им силы тяги, которая в любой момент времени работы локомотива должна быть равна сопротивлению движению. При определенном токе нагрузки скорость движения зависит от напряжения, приложенного к зажимам двигателя, и от его магнитного потока возбуждения. Условиям тяговой нагрузки наиболее соответствует характеристика двигателя последовательного возбуждения (рис. 21), где представленные скорость движения  $v$  и сила тяги  $F$  пропорциональны частоте вращения  $n_{тд}$  и моменту вращения  $M_{тд}$ .

Благоприятной для тяги является квадратичная зависимость силы тяги от тока нагрузки ( $\Phi = I_{в}; I_{в} = I$ ), так как при этом максимальный ток, соответствующий максимальной силе тяги при трогании поезда с места, получается меньше, чем при системах возбуждения, где магнитный поток не зависит от тока нагрузки.

Особо важное значение имеет гиперболический вид характеристики скорости. «Мягкая» естественная характеристика при  $U = \text{const}$  еще более смягчается при питании двигателя от генератора в пределах гиперболической части его характеристики, т. е. при  $UI = \text{idem}$ . При работе генератора в этой зоне дизель загружен полностью. Коэффициент регулюва-

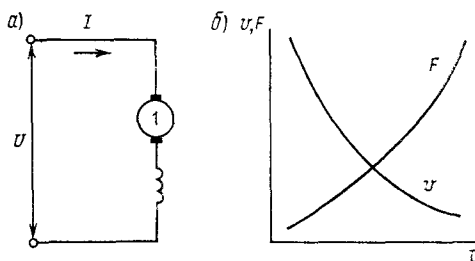


Рис. 21. Электродвигатель тяговый:  
а — схема; б — электромеханические характеристики, отнесенные к движущей оси

ния генератора, которым определяется зона гиперболической части характеристики,  $k_r \approx 2$ . Изменение силы тяги в зависимости от сопротивления движению поезда значительно более многократно. Для лучшего использования гиперболической части характеристики генератора необходимо регулирование тяговых двигателей.

На локомотивах с электрической передачей наиболее распространен индивидуальный привод, следовательно, число двигателей равно числу осей локомотива и обычно четное. Это позволяет комбинировать схемы соединения двигателей. Последовательное соединение следует применять в условиях, требующих развития большой силы тяги, а следовательно, и большого тока двигателей. Этим избегается перегрузка генератора, так как при этом  $I_r = I_{тд}$ .

Параллельное соединение следует применять на легких участках профиля, где при последовательном соединении  $I_r = I_{тд} < I_{г\text{min}}$ . Двукратное увеличение тока генератора  $I_r = \Sigma I_{тд\text{ пар}}$  смещает рабочую точку в зону гиперболической части характеристики.

На тепловозах ТЭ1, ТЭ2 и ТЭМ2 применяется автоматическое изменение схемы соединения двигателей. На схеме (рис. 22) при замкнутом контакторе С и разомкнутых контакторах СП1 и СП2 группы двигателей соединены последовательно, при замкнутых СП и разомкнутом С — параллельно. На отечественных тепловозах этот способ регулирования не применяется, так как ток нагрузки генератора в момент изменения схемы резко возрастает и этим вызывается наиболее трудный переходный процесс в электрической цепи генератора с многократными, хотя и затухающими колебаниями. Кроме того, узел автоматического переключения двигателей является одним из самых сложных узлов схемы управления.

Другой способ регулирования тяговых двигателей — изменение магнитного потока возбуждения. Из выражения (2) следует, что при развитии определенной силы тяги  $F$  с уменьшением магнитного потока  $\Phi$  увеличивается ток нагрузки двигателя  $I$ , т. е. при ослаблении возбуждения тягового электродвигателя ток нагрузки двигателя, а значит, и генератора возрастает. При легких условиях движения система может быть введена в режим работы генератора на гиперболической части его характеристики. Ослабление возбуждения широко применяется во всех видах тягового электропривода постоянного тока (рис. 23). Преимущественное, повсеместное применение имеет ослабление возбуждения путем ответвления части тока  $I_{ш}$  в некоторый резистор с сопротивлением  $r_{ш}$  (рис. 23, а). Для ослабления возбуждения необходимы выводы от катушек возбуждения. Это усложняет устройство двигателя и коммуникаций проводов тем более, что в современном тяговом электроприводе целесообразно применять не одну, а несколько ступеней ослабления возбуждения.

Количественно ослабление возбуждения оценивается коэффициентом ослабления  $\beta$ , иногда называемым коэффициентом шунтировки, что напоми-

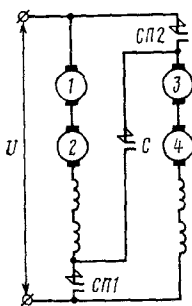


Рис. 22. Принципиальная схема силовой цепи с последовательно - параллельным переключением тяговых электродвигателей

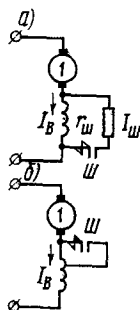


Рис. 23. Схемы регулирования ослабления возбуждения двигателя постоянного тока:

а — шунтированием обмотки возбуждения; б — выключением части витков обмотки возбуждения

нает о способе ослабления. В электроприводе с  $u = \text{const}$  непосредственным следствием ослабления возбуждения является увеличение скорости, что можно видеть по выражению (2). На тепловозе скорость изменяется меньше, так как с увеличением тока уменьшается напряжение. Существенным результатом ослабления возбуждения является сужение диапазона тока и напряжения тяговых электродвигателей и генератора, т. е. работа электрических элементов энергетической цепи, а также и дизеля в оптимальных условиях  $N_d = \text{const}$ .

Управление регулированием ослабления возбуждения тяговых электродвигателей тепловозов автоматизировано. Включение и выключение контакторов *Ш* (рис. 23, а) осуществляется реле, которые реагируют на ток и напряжение генератора. При достижении  $I_{г\text{min}}$ , а значит  $U_{г\text{max}}$  контакторы реле замыкают цепи питания катушек контактора *Ш*; при токе, близком к  $I_{г\text{max}}$ , реле размыкает эти контакторы, что возвращает двигатели к работе с полным возбуждением.

На современных тепловозах, где все шесть или восемь двигателей соединены параллельно, для управления ослаблением возбуждения применяются групповые контакторы (см. гл. 5 и 8). Характеристики генератора, на которые нанесены линии, проходящие через точки включения и размыкания контакторов *Ш* *ОП1* и *ОП2*, приведены на рис. 24. На всех современных отечественных тепловозах с постоянной схемой соединения электродвигателей применяются две ступени ослабления возбуждения. На тепловозах с изменением схемы соединения электродвигателей ступень ослабления одна, т. е. предусмотрены также два режима автоматического регулирования тяговых двигателей.

Глубина ослабления возбуждения тяговых двигателей постоянного тока ограничена коммутационными условиями, которые при *ОП* затруднены сочетанием больших значений тока и увеличенной скорости. Для двигателей любого типа существует ограничение и по условиям нагревания. По опыту расчетов и исследований завода «Электротяжмаш» и НИИЭТМ, подтвержденных в условиях эксплуатации на отечественных тепловозах, обычно  $\beta_1 \approx 0,60$ ;  $\beta_2 \approx 0,35$ . Этими числами измеряется отношение тока возбуждения к току нагрузки. Отношение магнитного потока при ослабленном  $\Phi_{\text{он}}$  и полном  $\Phi_{\text{шт}}$  возбуждении меньше вследствие нелинейности магнитных характеристик.

Режимы асинхронных короткозамкнутых двигателей необходимо регулировать во всем диапазоне тяговой нагрузки, так как «естественная» характеристика этих двигателей жесткая. Как известно, режим систем переменного тока характеризуется не только током и напряжением, но также и частотой

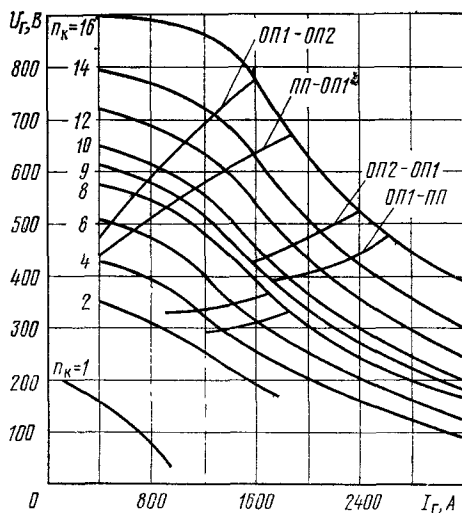


Рис. 24. Характеристики генератора МПТ 99/47

$$f = \frac{pn}{60},$$

где  $p$  — число пар полюсов;  
 $n$  — частота вращения ротора.

Отсюда частота вращения может быть выражена

$$n = \frac{60f}{p}.$$

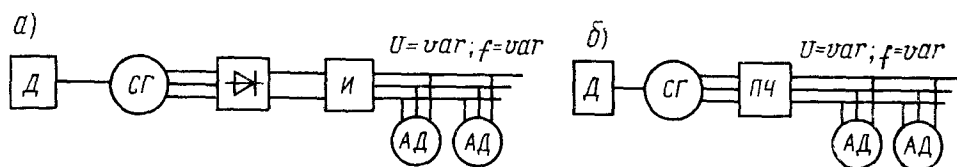


Рис. 25. Принципиальные схемы передачи на переменном токе:  
а — со звеном постоянного тока; б — с непосредственным преобразованием энергии

Академиком М. П. Костенко показана закономерность получения разного вида характеристик асинхронного двигателя за счет одновременного изменения напряжения и частоты его питания. Так, для получения  $M = \text{const}$  требуется

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2};$$

для получения «мягкой» характеристики требуется

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}.$$

На локомотивах с асинхронными тяговыми двигателями АД и применяется этот принцип, т. е. «частотное» регулирование. Поэтому в цепи генератор—двигатель непременно имеется преобразователь частоты ПЧ (рис. 25). Здесь регулирование частоты и напряжения производится в узле инвертирования И. Преимущественное распространение имеет схема, изображенная на рис. 25, а, так как введение дополнительного звена выпрямитель—инвертор при современной полупроводниковой технике усложнений оборудования не вызывает, а возможности регулирования оптимальны.

Второй принципиальный возможный способ регулирования частоты — изменением числа полюсов («полюсопереключение») — находится еще в стадии опытного исследования.

### 3. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

При рассмотрении задач регулирования энергетической цепи и отдельных ее элементов был отмечен один из принципов автоматического регулирования: по *отклонению регулируемой величины*, называемый принципом Ползунова-Уатта по имени ученых, которые впервые осуществили этот принцип в разных регуляторах в XVIII в.

Возможно регулирование по *отклонению возмущения*, осуществленное впервые в XIX в. Чиколевым для первых дуговых ламп и Понселе для электродвигателя. При этом принципе регулирования изменение нагрузки  $F$  (рис. 26), т. е. возмущение, воспринимается датчиком Д и подается на одну из обмоток возбуждения электродвигателя ТД. Заданием является неизменная частота вращения его вала. Система должна быть так рассчитана и построена, чтобы в результате восприятия отклонения возмущения и передачи сигнала регулирования на возбуждение электродвигателя скорость его сохранялась неизменной.

Достоинством такой системы является инвариантность регулируемой величины благодаря предотвращению ее изменения; сохранение некоторого заданного значения выполняется лучше, чем в системах, основанных на принципе Ползунова-Уатта.

Однако регулирование по отклонению регулируемой величины имеет и значительные достоинства, так как задание выполняется независимо от причины отклонения. Система же по Чиколеву—Понселе реагирует только на изменение нагрузки, следовательно, не может обеспечить сохранение заданного режима объекта регулирования при изменении каких-либо иных факторов, например, питающего напряжения, сопротивления обмоток двигателя и т. д.

Большинство технических систем регулирования строится по принципу Ползунова-Уатта с использованием как самого отклонения регулируемой величины, так и его производных и интеграла. Имеются и системы, в которых используются оба принципа. Примером может служить адаптивная система регулирования энергетической цепи тепловоза, разработанная в ЛИИЖТ. Функциональная схема ее приведена на рис. 27.

Система, где задание выполняется с некоторым отклонением — со статической ошибкой, называется *статической*; регулирование без отклонения называется *астатическим*. В отношении характера протекания процесса регулирования следует различать *непрерывное* или плавное регулирование и *дискретное*, в котором имеются разновидности: позиционное (релейное), вибрационное, импульсное.

Рассмотренные системы формирования внешней характеристики по программе  $UI = \text{idem}$  могут служить примером непрерывного регулирования, так как система, реагируя на изменение тока нагрузки генератора и его напряжения, а также на другие координаты состояния энергетической цепи, постоянно воздействует на систему возбуждения генератора, плавно изменяя напряжение в требуемой закономерности.

Примером прерывистого *позиционного* регулирования является регулирование тяговых электродвигателей путем ослабления магнитного потока возбуждения. Реле, управляющее переходами, воспринимает сигналы по току и по напряжению генератора непрерывно, но действует лишь при определенных сочетаниях этих координат: для включения катушек контакторов *Ш* при большом значении  $U$  и малом  $I$  и для выключения этих контакторов при определенном обратном сочетании  $U$  и  $I$ . *Вибрационный* режим характерен для контактных регуляторов напряжения вспомогательного генератора (см. гл. 5).

Все большее применение в энергетических системах приобретает *импульсное* регулирование. В отличие от позиционного регулирования, действие которого обусловлено только значением воздействия, а не продолжительностью, импульсное регулирование осуществляется путем кратковременных импульсов с принудительным заданным чередованием по времени. Регулирование

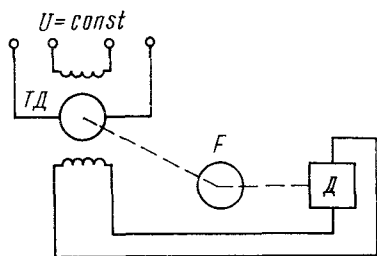


Рис. 26. Схема регулирования частоты вращения электродвигателя по принципу Чиколева—Понселе

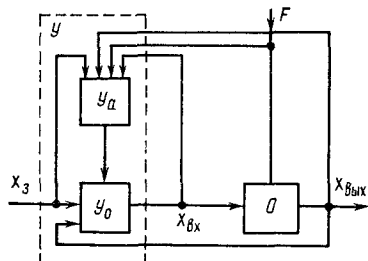


Рис. 27. Принципиальная схема адаптивной системы:

$O$  — объект регулирования;  $Y$  — управляющее устройство;  $Y_o$  — основное;  $Y_a$  — устройство адаптации;  $F$  — возмущающее воздействие;  $X_{вх}$  и  $X_{вых}$  — входная и выходная координаты объекта;  $X_z$  — задание

происходит только в периоды существования импульсов, формируемых каким-либо импульсным элементом или системой. В промежутках между импульсами цепь регулирования разомкнута и воздействия на объект не оказывает.

При импульсном регулировании (рис. 28) непрерывный «сигнал»  $x = f(t)$  «квантуется», т. е. преобразуется в серию импульсов, амплитуда, ширина или число которых в отдельные дискретные отрезки времени пропорциональны этому сигналу. На рис. 28, б непрерывная функция моделируется импульсами, высота  $h$  которых пропорциональна дискретному значению непрерывной величины  $x$ ; длительность или ширина импульса  $t_n$  неизменна. На рис. 28, в ширина импульса  $t_n$  пропорциональна дискретному значению непрерывной функции, высота или амплитуда импульса неизменна. Период квантования  $T$  в обоих приведенных случаях постоянен. Основные характеристики процесса импульсного моделирования: период  $T$ , высота или амплитуда  $h$ , длительность импульса  $t_n$ . В расчетах удобны понятия — скважность  $\gamma = \frac{t_n}{T}$ , длительность или широта импульса  $t_n = \gamma T$ ; частота или фаза модуляции  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ .

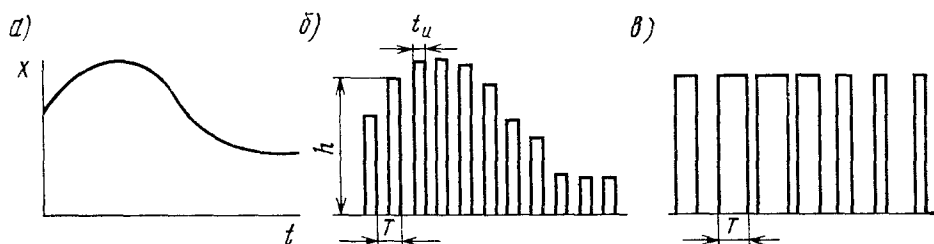


Рис. 28. Диаграммы импульсной модуляции непрерывной функции:  
а — непрерывный сигнал; б — амплитудная модуляция; в — широтная модуляция

Большим достоинством импульсного регулирования является его быстроедействие, обусловленное формированным дискретным воздействием исполнительного элемента на объект регулирования. В ряде систем, как, например, в тиристорных выпрямителях и инверторах (см. гл. 5 и 6), импульсное регулирование обязательно. Характеристиками импульсного регулирования определяется величина выпрямленного напряжения или амплитуда и частота переменного тока при инвертировании.

Примером применения на тепловозе импульсного управления тиристорами являются системы регулирования синхронных генераторов (см. гл. 8). Такого же типа управление тиристорами, но в режиме инвертирования применяется для регулирования напряжения переменного тока и его частоты в системах передачи переменного тока с короткозамкнутыми асинхронными тяговыми двигателями (см. гл. 8).

В системах с выпрямителями или инверторами выбор модуляции импульсов предопределяется требуемой зависимостью величины выпрямленного напряжения или в инвертирующих системах — частоты и напряжения переменного тока от продолжительности открытия тириستоров.

В системах регулирования без изменения рода тока может быть применена как широтная, так и амплитудная модуляция импульсов. В таких системах основанием для импульсного управления является увеличение быстрогодействия системы регулирования, а также малая инерция узла, формирующего импульс, составляемого на полупроводниковых аппаратах.

## ГЛАВА 2

# КОНСТРУКЦИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

---

### 4. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тяговые генераторы предназначены для преобразования механической энергии дизеля в электрическую, которая передается тяговым электродвигателям. Кроме того, в момент пуска дизеля генераторы постоянного тока работают в режиме электродвигателя с последовательным возбуждением, приводящего в движение коленчатый вал дизеля.

Условия работы электрических машин тепловозов очень тяжелые. На них действуют ударные вибрации, вызванные неровностями и стыками пути, вибрации от дизеля частотой, 15—20 Гц, запыленность и загрязненность окружающей среды, изменение в широких пределах температуры окружающего воздуха (от — 60 до + 40° С). Кроме того, электрические машины тепловоза очень стеснены в габаритах, поэтому конструкция их отличается от стационарных электрических машин. Технические данные тепловозных тяговых генераторов приведены в табл. 1, 2.

На тепловозах тяговый генератор соединен с дизелем одним из двух возможных способов. При первом способе станина генератора жестко соединена с картером дизеля, а корпус якоря—с коленчатым валом. Кроме того, станина имеет лапы, которыми опирается на поддизельную раму. Вследствие того, что магнитная система и якорь закреплены независимо и жестко, для получения минимальных биений цилиндрической поверхности коллектора по отношению к щеткодержателям вал центрируется в щите сферическим подшипником. Нагрузка на этот ролик подшипник определяется несоосностью якоря и магнитной системы с щеткодержателями. Так соединены генераторы с дизелями типа Д50 на тепловозах серий ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ1 и ТЭМ2.

Второй способ предусматривает соединение вала или корпуса якоря генератора через полужесткую муфту с коленчатым валом дизеля. Станина генератора опирается лапами на поддизельную раму. На тепловозах с дизелями типа Д100 серий ТЭ3, ТЭ7, ТЭ10, ТЭП10, 2ТЭ10Л, ТЭ40 (с дизелем Д70), ТЭП60 (с дизелем 11Д45), ТЭ109, V-300, 2ТЭ116 (с передачей переменного тока) используется этот способ соединения.

**Вентиляция генераторов.** Тяговые генераторы тепловозов ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ1 и ТЭМ2 имеют защищенное исполнение с самовентиляцией. Воздух для охлаждения генераторов поступает из дизельного помещения. Вентиляция генераторов тепловозов ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ1, ТЭМ2 и ТЭ3 осуществляется центробежным вентилятором, прикрепленным к корпусу якоря со стороны дизеля. На этих генераторах используется *осевая система вентиляции*, при которой охлаждающий воздух проходит в осевом направлении по каналам сердечника якоря и по межполюсным расстояниям.

В генераторах большой мощности (более 1200 кВт), имеющих двухходовую петлевую обмотку, воздух для охлаждения забирается из атмосферы, а в период дождей, снежных или пылевых бурь засасывается из кузова через фильтры.

Генераторы, устанавливаемые на тепловозах мощностью 2210 кВт, имеют независимую вентиляцию (применен быстроходный и высоконапор-

Таблица 1

| Показатель                              | Тип генератора      |             |                     |                        |                                               |
|-----------------------------------------|---------------------|-------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------------------|
|                                         | МПТ-99/47А          | МПТ-120/49  | МПТ-120/55А         | ГП-300Б                | ГП-311Б                                       |
| Тепловоз                                | ТЭЗ                 | ТЭ10        | ТЭП60               | ТЭМ2,<br>ТЭМ5,<br>ТЭМ6 | 2ТЭ10Л,<br>2ТЭ10В                             |
| Способ охлаждения                       | Самовенти-<br>ляция | Независимая |                     | Самовенти-<br>ляция    | Независи-<br>мая                              |
| Номинальная мощность,<br>кВт            | 1350                | 2000        | 2000                | 780                    | 2000                                          |
| Продолжительный ток, А                  | 2460                | 4200        | 4260                | 1210                   | 4320                                          |
| Номинальное напряже-<br>ние, В          | 550                 | 476         | 470                 | 645                    | 465                                           |
| Максимальное напряже-<br>ние, В         | 820                 | 650         | 700                 | 870                    | 700                                           |
| Номинальная частота<br>вращения, об/мин | 850                 | 850         | 750                 | 750                    | 850                                           |
| Обмотка якоря                           | Лягушачья           |             | Простая<br>петлевая |                        | Петлевая<br>двуххо-<br>довая (ля-<br>гушачья) |
| Число главных полюсов                   | 8                   | 10          | 10                  | 8                      | 10                                            |
| Число добавочных полю-<br>сов           | 8                   | 10          | 10                  | 8                      | 10                                            |
| Воздушный зазор, мм:                    |                     |             |                     |                        |                                               |
| главных полюсов                         | 5                   | 5           | 5                   | 4                      | 5                                             |
| добавочных полюсов                      | 9                   | 16          | 13,5                | 9                      | 13,5                                          |
| Число пластин коллекто-<br>ра           | 444                 | 405         | 465                 | 380                    | 465                                           |
| Масса, кг                               | 7460                | 9200        | 9650                | 4800                   | 8700                                          |

Примечания. 1. Все генераторы постоянного тока с независимым возбуждением.  
2. Данные в скобках для тепловозов первых выпусков.

Таблица 2

| Тип<br>генератора | Обмотка                 | Число<br>витков | Сопротивле-<br>ние при<br>15° С, Ом | Марка<br>провода | Размер провода<br>без изоляции, мм | Класс изо-<br>ляции |
|-------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|---------------------|
| ГП-311Б           | Главных полюсов         | 105             | 0,86                                | ПСД              | 4,7×6,9                            | Н                   |
|                   | Добавочных полю-<br>сов | 6               | 0,000865                            | МГМ              | 16×25                              | В                   |
|                   | Пусковая                | 3               | 0,00435                             | МГМ              | (2,26×40)2                         | Н                   |
|                   | Якоря                   | 455             | 0,00114                             | МГМ              | 2,83×5,5                           | В                   |
| ГП-300Б           | Главных полюсов         | 99              | 0,81                                | ПДА              | 4,1×6,9                            | В                   |
|                   | Добавочных полю-<br>сов | 7               | 0,00387                             | МГМ              | 14×20                              | Н                   |
|                   | Пусковая                | 3               | 0,00314                             | МГМ              | 1,95×90                            | В                   |
|                   | Якоря                   | —               | 0,00736                             | ПДА              | 1,81×5,5                           | Н                   |
| МПТ-120/49        | Главных полюсов         | 36+5            | 0,138                               | МГМ              | 75 мм <sup>2</sup>                 | В                   |
|                   | Добавочных полю-<br>сов | 6               | 0,00072                             | МГМ              | 16×30                              | В                   |
|                   | Якоря                   | 465             | 0,00132                             | МГМ              | 2,83×5,5                           | В                   |

| Тип генератора | Обмотка            | Число витков | Сопротивление при 15°C, Ом | Марка провода | Размер провода без изоляции, мм | Класс изоляции |
|----------------|--------------------|--------------|----------------------------|---------------|---------------------------------|----------------|
| МПТ-120/55А    | Главных полюсов    | 30+5         | 0,146                      | МГМ           | 2×40+30×30                      | В              |
|                | Добавочных полюсов | 6            | 0,00095                    | МГМ           | 16×25                           | В              |
|                | Якоря              | 465          | 0,00140                    | МГМ           | 2,83×5,5                        | В              |
| МПТ-99/47А     | Главных полюсов    | 127          | 0,895                      | ПСД           | 4,7—6,0                         | Н              |
|                | Добавочных полюсов | 9            | 0,00066                    | Голая медь    | 14×19,5                         | В              |
|                | Пусковая           | 3            | 0,00475                    | То же         | 2,26×55                         | В              |
|                | Якоря              | 444/8        | 0,00205                    | »             | 2,26×6,9                        | В              |

ный вентилятор подачей до 1500 м³/ч с приводом от дизеля). Это дало возможность для генераторов МПТ-120/49, МПТ-120/55А, ГП-310А и ГП-311 повысить *тепловой фактор* до  $A_j = 3750$  (произведение плотности тока на линейную нагрузку) вместо 2230 для генератора МПТ-99/47А. Тепловой фактор характеризует степень использования активных материалов якоря.

Резкое повышение количества охлаждающего воздуха (на 250%) для генераторов мощностью 2000 кВт по сравнению с генератором МПТ-99/47А при возрастании поперечных размеров его только на 20% потребовало увеличения площади сечения вентиляционных путей, что трудно было выполнить при осевой системе вентиляции. Поэтому для мощных генераторов применена *радиально-осевая система*, которая позволяет охлаждать якорь воздухом, проходящим по радиальным каналам в его сердечнике. Катушки полюсов охлаждаются воздухом, проходящим в осевом направлении между полюсами и выходящим из якоря.

При независимой вентиляции воздух может подаваться как со стороны дизеля, так и с противоположной.

Направление движения охлаждающего воздуха принято от дизеля к коллектору, чтобы меньше загрязнялись части генератора угольной пылью щеток. На всех генераторах мощностью 2000 кВт воздух поступает со стороны дизеля в центральную полость якоря и, проходя по радиальным каналам между пакетами сердечника якоря, созданными вентиляционными листами с распорками, охлаждает сердечник и обмотку якоря и выходит через воздушный зазор между полюсами и якорем к переднему подшипниковому щиту. Воздух также охлаждает коллектор, проходя между петушками коллектора ленточного типа.

При радиально-осевой вентиляции большое число разветвлений создает опасность загрязнения генератора, поэтому необходимо предъявлять более высокие требования к очистке воздуха. На генераторах МПТ-120/49 первых выпусков (тепловозы ТЭ10 и ТЭП10) для вентиляции применен вытяжной вентилятор, что создает внутри него разрежение, приводящее к подосу воздуха из дизельного помещения. На всех последующих тепловозах (ТЭП60, 2ТЭ10Л) установлен нагнетательный вентилятор. В связи с ростом секционной мощности тепловозов резко возросла потребность в воздухе, охлаждающем электрические машины и аппараты.

**Конструкция.** Основными частями генератора постоянного тока типа ГП-311Б тепловоза 2ТЭ10В (рис. 29) являются: якорь, станина, главные полюсы, добавочные полюсы, подшипниковый щит и щеткодержатели.

*Якорь* генератора состоит из вала, корпуса (остова), сердечника, обмотки, коллектора и деталей крепления. Якоря тепловозных генераторов изготовляют с укороченным валом, т. е. применяют так называемую «безвальную конструкцию», что позволяет снизить температуру нагревания обмотки, трудоемкость изготовления и ремонта, а также массу генератора. Так как у генератора ГП-311 применена радиальная вентиляция якоря, при которой необходим свободный подвод воздуха в центральную его часть (для входа в радиальные каналы), корпус имеет ребристую конструкцию и состоит из сварно-литого барабана, к которому приварены литые фланцы: задний используется для соединения с валом дизеля, передний — для напрессовки коллектора.

К барабану корпуса приварены диски 17 продольных ребер. Сердечник якоря состоит из пяти штампованных сегментов, которые собирают на продольные шпильки, проходящие через отверстия в сегментах.

Мощные генераторы ГП-311, МПТ-120/49, МПТ-120/55А имеют диаметр якоря 1200 мм, их сердечники собраны из сегментов, так как наибольший размер листа электротехнической стали 1000 × 2000 мм. Собранный и спрессованный сердечник удерживается на корпусе двумя стальными обмоткодержателями, стянутыми шпильками и прикрепленными к корпусу болтами и призонными штифтами, которые предотвращают обмоткодержатели от смещения под действием угловых ускорений при пуске и работе дизеля.

Так как сердечник якоря собран из отдельных сегментов и не может быть обработан по внутреннему диаметру с точностью, обеспечивающей крепление, процесс посадки его на ребра выполняется одновременно с центровкой. Для крепления сердечника применены встречные клиновые шпонки 16, закладываемые в пазы сегментов и ребер. Радиальный натяг между сердечником и корпусом создается расклиниванием шпонок при нагревом сердечнике.

*Коллектор* работает в условиях воздействия на него динамических нагрузок, загрязнения и увлажнения. Коллектор генератора ГП-311Б собран из 465 пластин твердотянутой коллекторной меди (с присадкой серебра или кад-

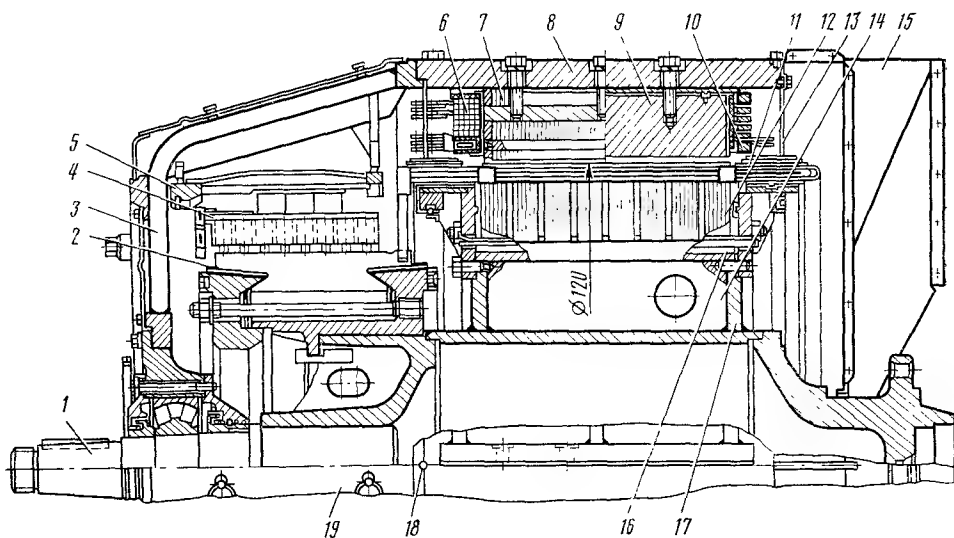


Рис. 29. Тяговый генератор ГП-311Б:

1 — вал; 2 — коллектор; 3 — подшипниковый щит; 4 — щеткодержатель; 5 — поворотная траверса; 6 — катушка главного полюса; 7 — сердечник главного полюса; 8 — станина; 9 — сердечник добавочного полюса; 10 — катушка добавочного полюса; 11 — обмотка якоря; 12 — сердечник якоря; 13 — диафрагма; 14 — корпус якоря; 15 — входной патрубок; 16 — клиновое шпонка; 17 — диски; 18 — штифт для фиксации щита со станиной; 19 — крышка

мией) трапецевидного профиля. Легирующие присадки примерно вдвое увеличивают износоустойчивость коллектора.

На генераторах мощностью 2000 кВт с большим диаметром якоря (1200 мм) применяют коллекторы с ленточными петушками, изготавливаемыми из медной ленты сечением  $2 \times 20$  мм (рис. 30). Ленточный петушок 3 нижней частью припаян твердым припоем к коллекторной пластине, а к верхней его части приклепана и припаяна полоска, в которую впаивают припоем ПОС-61 концы катушек обмотки якоря и уравнильные соединения.

На генераторах меньшей мощности МПТ-84/39, ГП-300Б, МПТ-99/47А петушки выполнены из коллекторной меди и припаяны к пластинам твердым меднофосфористым припоем. Для облегчения коллектора и уменьшения боковой площади пластин в них сделаны отверстия.

Пластины изолированы друг от друга коллекторным миканитом толщиной 1 мм, который является более твердым материалом, чем медь, и изнашивается медленнее. В связи с этим в эксплуатации изоляцию между пластинами периодически углубляют до 0,7—1 мм путем фрезерования, наименьшая глубина в эксплуатации 0,5 мм.

В коллекторе арочного типа пластины имеют выточки в форме ласточкина хвоста, в которые входят конусные части корпуса с одной стороны и нажимной шайбы — с другой. Пластины изолированы от корпуса манжетами толщиной 2 мм из формовочного миканита на глифталевом лаке. Выступающую часть манжеты предохраняют от повреждения бандажом и покрывают, как и торцовые части пластин, изоляционной эмалью. Чтобы внутренние части коллектора не увлажнялись, необходимо уплотнять места посадки нажимной шайбы на корпус коллектора с помощью пропитанного шнура и промазки стыка снаружи густыми цинковыми белилами. Коллектор стянут 18 шпильками из легированной стали, термически обработанными для достижения высокой прочности и вязкости. Коллектор обтачивают и шлифуют после сборки с якорем.

Для правильной работы щеточного аппарата центр окружности коллектора должен точно совпадать с осью его вращения. После обточки коллектора на станке допускается биение поверхности не более 0,03 мм (по индикатору в холодном состоянии). Чтобы исключить деформацию коллектора в эксплуатации, его подвергают динамической формовке, т. е. разгоняют нагретый до  $150^\circ\text{C}$  коллектор до частоты вращения, превышающей на 20% максимальную эксплуатационную частоту вращения. Разгон повторяют несколько раз. После каждого разгона подтягивают коллекторные болты. Диаметр коллектора 850 мм, длина рабочей части 370 мм.

Обмотка якоря для получения большего числа параллельных ветвей без увеличения числа полюсов может быть многоходовая петлевая или лягушачья. Сложные якорные обмотки в генераторах необходимы для больших мощностей тепловозных дизелей, а следовательно, и генераторов при сравнительно высокой частоте вращения. С увеличением мощности и частоты вращения невозможно одновременно выдержать допустимые значения линейной скорости и линейной нагрузки якоря, а также среднее напряжение между соседними пластинами коллектора. При прочих равных условиях многоходовые обмотки якоря снижают среднее минимальное напряжение обратно пропор-

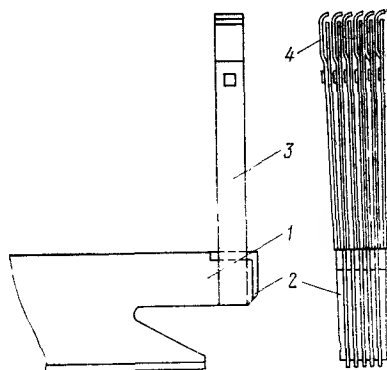


Рис. 30. Коллекторная пластина:  
1 — коллекторная пластина; 2 — миканитовая прокладка; 3 — ленточный петушок; 4 — полоска

ционально кратности обмотки. Тяговые генераторы мощностью 1350 кВт выше выполняют с двухходовой петлевой или лягушачьей обмоткой якоря.

Первые выпуски генераторов ГП-311Б имели двухходовую (однократно замкнутую по волне) лягушачью (параллельно-последовательную) обмотку, состоящую из волновой обмотки, уложенной в пазы с шагом 1—16 (рис. 31). Шаг по коллектору волновой обмотки 1—92, а петлевой 44—46. Секции петлевой и волновой обмоток присоединяют к одним и тем же петушкам коллектора. Секции волновой обмотки, помимо своих основных функций, выполняют роль уравнительных соединений для петлевой обмотки.

В каждом пазу якоря уложены 12 стержней (четыре ряда по три стержня) из шинной меди МГМ сечением  $2,83 \times 5,5$  мм (рис. 32). Верхний и нижний ряды представляют собой стороны катушек волновой обмотки, два средних ряда — стороны катушек петлевой обмотки. Катушка состоит из трех элементарных одновитковых секций и изолируется на полное рабочее напряжение. Следовательно, в прорезь петушка коллектора впаивают четыре плавоводника, расположенных по вертикали. Каждый стержень изолирован одним слоем (вполуперекрышу) микаленты ЛФ41 толщиной 0,1 мм. Три стержня полукаатушки изолированы тремя слоями микаленты толщиной 0,13 мм (вполуперекрышу) и скреплены одним слоем стеклянной ленты толщиной 0,1 мм (встык). В головках катушек стержни изолированы одним слоем микаленты вполуперекрышу, а между слоями обмотки кладут миканитовую изоляцию толщиной не менее 1 мм. Концы пазов якоря дополнительно изолированы картоном и миканитом. На дно паза уложена миканитовая прокладка. Для защиты изоляции от загрязнения охлаждающим воздухом, непосредственно омывающим части катушки, проходящие через радиальные вентиляционные каналы сердечника, катушку дополнительно изолируют коробочкой из электрокартона толщиной 0,3 мм. Обмотка якоря удерживается в пазах текстолитовыми клиньями, под которые кладут электроизоляционный картон. Лобовые части обмотки укреплены двухслойными проволочными бандажами из немагнитной проволоки для уменьшения реактивности рассеяния лобовых частей, так как частота вращения генератора сравнительно большая (1000 об/мин), и коммута-

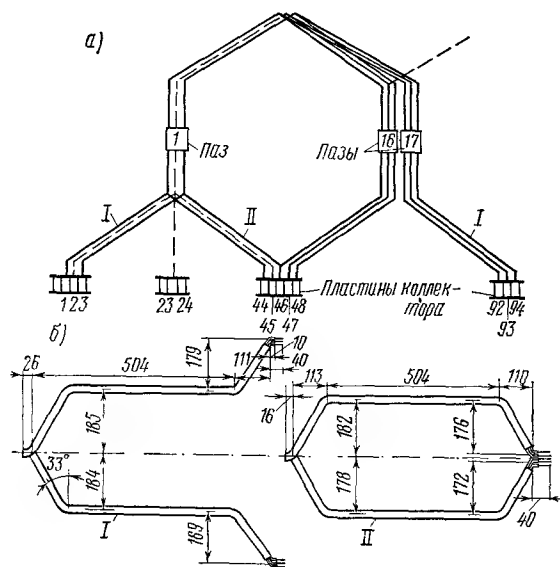


Рис. 31. Схемы обмоток генератора ГП-311:  
а — лягушачьей; б — катушек якоря; I — секция волновой обмотки; II — секция петлевой обмотки

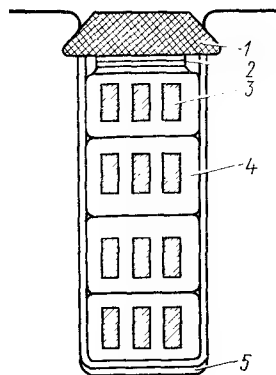


Рис. 32. Разрез паза якоря генератора:

1 — клин; 2 — картон; 3 — проводник; 4 — микалента и стеклянная лента; 5 — миканитовая прокладка

ция осложняется. Диаметр проволоки бандажей 2 мм, н атяжение для нижнего слоя при намотке 2,35—2,45 кН, для верхнего 2,15—2,25 кН. Проволочные бандажы по кругу пропаяны сплошным слоем припоя ПОС-40.

Тяговые генераторы ГП-311Б, выполненные с петлевой ступенчатой двухходовой обмоткой якоря с уравнительными соединениями со стороны коллектора, работают более устойчиво, чем генераторы с лягушачьей обмоткой. Кроме того, ступенчатая двухходовая обмотка позволяет применять стеклобандаж для крепления лобовых частей без ухудшения коммутации. Опыт эксплуатации показал, что использование стеклобандажей на якорях повышает надежность работы тяговых генераторов.

Из курса электрических машин известно, что для получения симметричной двухходовой обмотки якоря уравнительные соединения должны соединять коллекторные пластины одного хода с головками обмоток другого хода. Такие уравнители конструктивно выполнить трудно, кроме того, они требуют большого количества паяных соединений, что снижает надежность работы в эксплуатации обмотки якоря. Поэтому принята несимметричная двухходовая обмотка, позволяющая разместить уравнительные соединения на одной стороне якоря со стороны коллектора, но для этого необходимо выдержать соотношения:  $\frac{z}{p}$  — целое нечетное число и  $\frac{k}{p}$  — целое нечетное число, т. е.  $u$  — нечетное число, где  $z$  — число пазов якоря;  $p$  — число пар полюсов;  $k$  — число коллекторных пластин;  $u$  — число коллекторных пластин на паз.

Шаг по коллектору двухходовой петлевой обмотки равен двум коллекторным делениям, т. е. концы секции присоединяются через одну коллекторную пластину. Получается совокупность двух отдельных обмоток, совмещенных на якоре и работающих параллельно. Число щеток ставится равным числу полюсов, но ширина каждой щетки должна быть такой, чтобы одновременно могли работать две обмотки. Если обмотка после первого обхода попадает в ту же самую коллекторную пластину, с которой начат первый обход, то обмотка называется *двукратно замкнутой*. Если обмотка попадает в первоначальную пластину только после второго обхода, то она называется *однократно замкнутой*.

Двукратно замкнутые обмотки имеют четное количество коллекторных пластин и число пар полюсов, а однократно замкнутые — нечетное. Двукратно и однократно замкнутые обмотки удовлетворяют только одному условию симметрии<sup>1</sup> обмотки, а именно  $\frac{2p}{a}$  равно целому числу, поэтому они являются *несимметричными*. Однако многолетняя практика электромашиностроения доказала их преимущества по снижению напряжения между коллекторными пластинами в предельном случае до двух раз. Двухходовая несимметричная ступенчатая петлевая обмотка с шагом по пазам 1—16, 1—17 по коллектору представлена (на рис. 33).

Крепление лобовых частей обмотки осуществляется бандажками из стеклотенты на эпоксидном компаунде. После наложения бандажей якорь испытывают, сушат, покрывают серой эмалью ПФ-115 и динамически балансируют на станке. В обмотке якоря применена изоляция класса В.

Передний *подшипниковый щит* тяговых генераторов воспринимает большие усилия. Чтобы не допускать вибрации и смещения щеткодержателей, щит имеет сварную конструкцию, состоящую из ребер и колец. Ребра наклонены к оси машины, что обеспечивает жесткость и легкость конструкции, в центральной части щита образуется кольцо, к которому крепится крышка. Та-

<sup>1</sup> Условия симметрии обмоток:  $\frac{z}{a}$ ,  $\frac{k}{a}$ ,  $\frac{2p}{a}$  должны быть целыми числами.

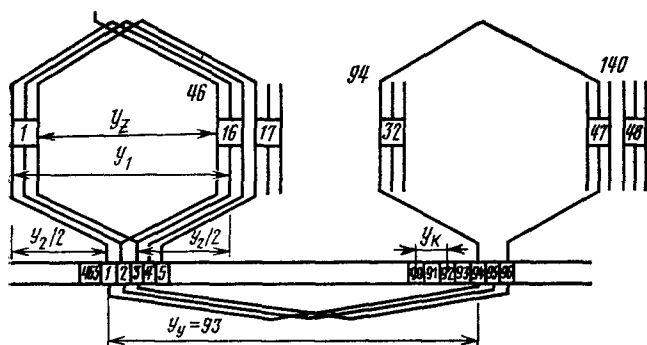


Рис. 33. Принципиальная схема двухходовой ступенчатой петлевой обмотки якоря генератора ГП-311Б:

$y_z$  — шаг по пазам,  $y_z=1-16, 17$ ;  
 $y_k$  — коллекторный шаг,  $y_k=2$ ;  
 $y_y$  — шаг уравнивательных соединений;  $y_y=93$ ;  $y_1$  — первый частичный шаг,  $y_1=46$ ;  $y_2$  — второй частичный шаг,  $y_2=44$

кая конструкция позволяет снять крышку и заменить подшипник без снятия подшипникового щита.

Задний подшипниковый щит защищает генератор от загрязнения. Для присоединения напорного воздухопровода он имеет два люка. На переднем щите закрепляют щеткодержатели или поворотную траверсу, а также монтируют подшипник. Для расположения щеток на геометрической нейтрали щиты без поворотной траверсы имеют овальные отверстия под болты крепления, позволяющие поворачивать щит.

В машинах с постоянным направлением вращения применяют *реактивные щеткодержатели*, в которых щетки наклонены к поверхности коллектора. Такая конструкция щеткодержателя уменьшает потери на трение щетки в корпусе и создает более спокойную работу щеточного аппарата. Тяговый генератор ГП-311Б имеет 10 бракетов, на каждом из них укреплено по девять реактивных щеткодержателей. Корпус 3 щеткодержателя (рис. 34) отлит из кремнистой латуни и имеет две прорези: с наклоном  $30^\circ$  к радиусу коллектора (для набегающей щетки) и  $10^\circ$  (для сбегающей щетки).

Бракет 1 отлит из алюминиевого сплава и крепится к щиту или поворотной траверсе двумя изоляционными подвесками, изготовленными из микалеса, армированного специальным болтом с одной стороны и гайкой с другой. Нажатие на щетки марки ЭГ-74 размером  $12,5 \times 32 \times 65/60$  мм осуществляется спиральными пружинами через курки 5. Силу нажатия регулируют изменением натяжки пружины путем перестановки ее конца из одного зубца храповика в другой. Нажатие на щетку должно быть 8—12 Н. Ток от щеток отводится по медным шунтам, наконечники 8 которых прикреплены винтами к бракету. Положение щеткодержателей относительно поверхности коллектора в корпусе щеткодержателя регулируют прорезью под болтом 2. Расстояние от

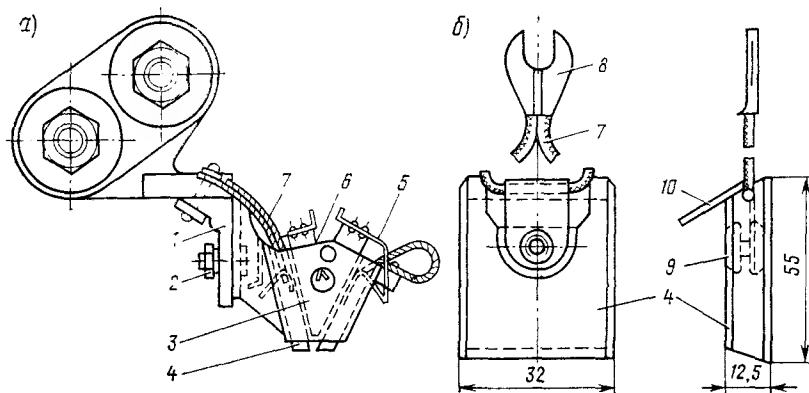


Рис. 34. Щеточный аппарат:

а — щеткодержатель; б — щетка тягового генератора; 1 — бракет; 2 — болт; 3 — корпус; 4 — щетка; 5 — курок; 6 — храповик; 7 — медный шунт; 8 — наконечник; 9 — заклепка; 10 — пластина

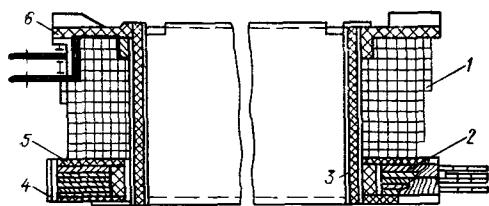


Рис. 35. Катушка главного полюса генератора ГП-311Б

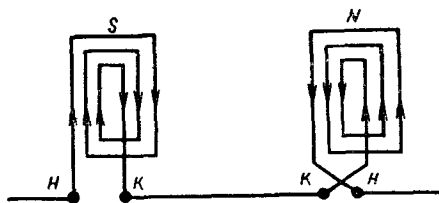


Рис. 36. Схема намотки катушек с открытыми выводами и с перекрещенными выводами:  $H$  — начало;  $K$  — конец

коллектора до щеткодержателя должно быть 2—3 мм. Установка на тяговый генератор щеток разных марок недопустима, так как это приводит к неравномерному распределению тока в щетках.

Бракеты расположены так, что оси щеткодержателей находятся на нейтральной. Для осмотра щеток имеется поворотная траверса, представляющая собой легкую конструкцию из двух колец, соединенных ребрами по числу полюсов, к которым прикреплены brackets. Траверсу в положении, соответствующем нейтрали, фиксируют стопорными болтами. Траверса со щеткодержателями может поворачиваться на угол  $360^\circ$ . Для привода траверсы на щите установлено зубчатое колесо, имеющее зацепление с одним из колец траверсы с зубчатой нарезкой. Поворот осуществляется при помощи валоповоротного устройства дизеля. Каждые пять бракетов одной полярности соединены собирательной шиной.

На станине генератора расположены главные и добавочные полюсы с катушками, составляющие его магнитную систему, которая имеет большее число полюсов, чем магнитная система обычных машин одинаковой мощности и угловой скорости. Тяговые генераторы с  $D_{\text{я}} = 100 \div 120$  см имеют  $2p = 10$  или 12, а общепромышленные машины  $2p = 6$  или 8. Повышенное число полюсов снижает массу генератора, так как площадь сечения магнитопровода станины обратно пропорциональна числу полюсов. Повышение числа полюсов влечет за собой увеличение числа коллекторных пластин, что ограничивается малым значением коллекторного деления и резким повышением потенциальных градиентов по окружности коллектора.

Станина состоит из кольцевого магнитопровода, изготовленного из листовой стали Ст3, и приваренных двух лап, которыми она опирается на поддизельную раму.

Главные полюсы состоят из сердечников и катушек. Сердечники главных полюсов набираются из листов холоднокатаной электротехнической стали марки Э310 толщиной 1 мм. Листы покрыты лаком с обеих сторон, спрессованы под давлением 29 МПа и стянуты заклепками. Сталь Э310 обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что приводит к уменьшению требуемой м. д. с. полюсов, т. е. снижению габаритов катушек. В каждом листе сердечника выштамповано прямоугольное отверстие, куда закладывается стальной стержень с резьбовыми отверстиями для крепления полюса к станине.

На главных полюсах размещены катушки обмоток независимого возбуждения и пусковой (рис. 35). Катушки намотаны на каркас 3, выполненный из листовой стали толщиной 1 мм. Каркас имеет бурты, удерживающие рамки 4 и 6, изготовленные из прочной и теплостойкой пластмассы. На каркас наложена изоляция из четырех слоев гибкого стекломиканита на кремнийорганическом лаке и одного слоя стеклотолы. Пусковая обмотка 2 выполнена в виде отдельной шайбы и расположена у полюсного башмака, затем установлена

стеклотекстолитовая изоляционная шайба 5, выше которой намотана обмотка независимого возбуждения 1. В процессе намотки каждый слой промазывают кремнийорганическим компаундом. Готовую катушку покрывают эмалью ПВЭ6. Изоляция может длительно выдерживать температуру 200° С. Из 10 главных полюсов генератора пять имеют перекрещенные выводы, а пять — открытые (рис. 36). Это сделано для чередования полярности полюсов и упрощения конструкции соединительных шин. Обмотки независимого возбуждения и пусковая, уложенные на каждом полюсе, соединены между собой последовательно.

В генераторах МПТ-99/47А (тепловоз ТЭЗ), ГП-300Б (ТЭМ2) МПТ-84/39 (ТЭМ1) и других обе обмотки главного полюса наматывают на общий каркас. Пусковую обмотку наматывают из широкой медной полосы непосредственно на изолированный каркас, а обмотку независимого возбуждения — на пусковую. Между катушками укладывают миканитовую изоляцию.

*Добавочные полюсы* так же, как и главные полюсы, состоят из сердечника и катушки. Сердечники изготовлены из стали марки Ст3. Они сужены в части, обращенной к якору. Внизу к сердечнику приклепаны латунные или дюралюминиевые угольники, служащие для крепления катушек и уменьшения рассеивания магнитного потока. Сердечник полюса изолирован от катушки опрессованным и спеченным миканитом или стеклотканью на эпоксидной смоле.

Катушка полюса состоит из шести витков шинной меди. Крайние витки изолированы двумя слоями микаленты и одним слоем стеклотенты. Между витками уложены стеклотекстолитовые прокладки толщиной 2 мм. Катушка зажата на сердечнике при помощи стальной накладки, привинченной к нему винтами со стороны, обращенной к станине. Между накладкой и полюсом помещена немагнитная прокладка, создающая второй воздушный зазор. Весь полюс перед креплением его к станине пропитывают в термореактивном лаке, цементирующем его изоляцию. Под верхнюю рамку укладывают пружинную рамку из ленточной стали 65Г для предотвращения перемещения катушки на сердечнике из-за усыхания изоляции и других деформаций. Между добавочным полюсом и станиной помещен набор из шести стальных прокладок общей толщиной 3 мм, служащих для регулирования зазора под добавочным полюсом при настройке коммутации.

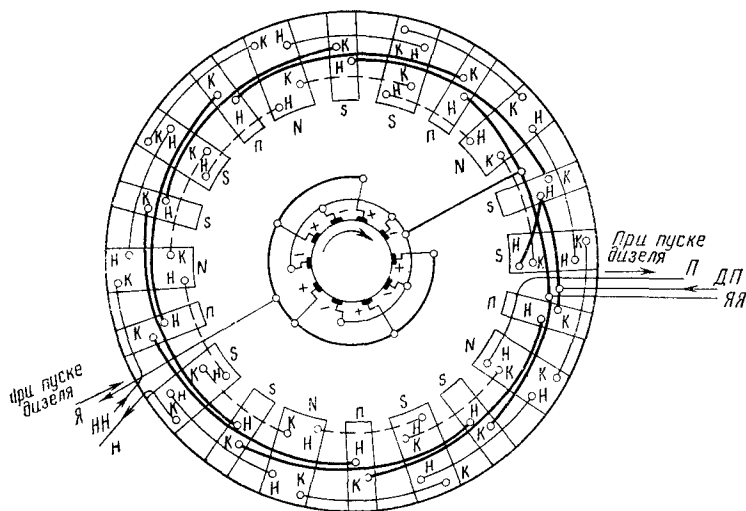


Рис. 37. Схема внутренних соединений тягового генератора ГП-311Б (вид со стороны коллектора):

штриховой линией показаны соединения катушек пусковой обмотки, расположенные со стороны, противоположной коллектору; Я и ЯЯ — начало и конец обмотки якоря; Н и НН — начало и конец обмотки независимого возбуждения; П — начало пусковой обмотки; ДП — конец пусковой обмотки и добавочных полюсов

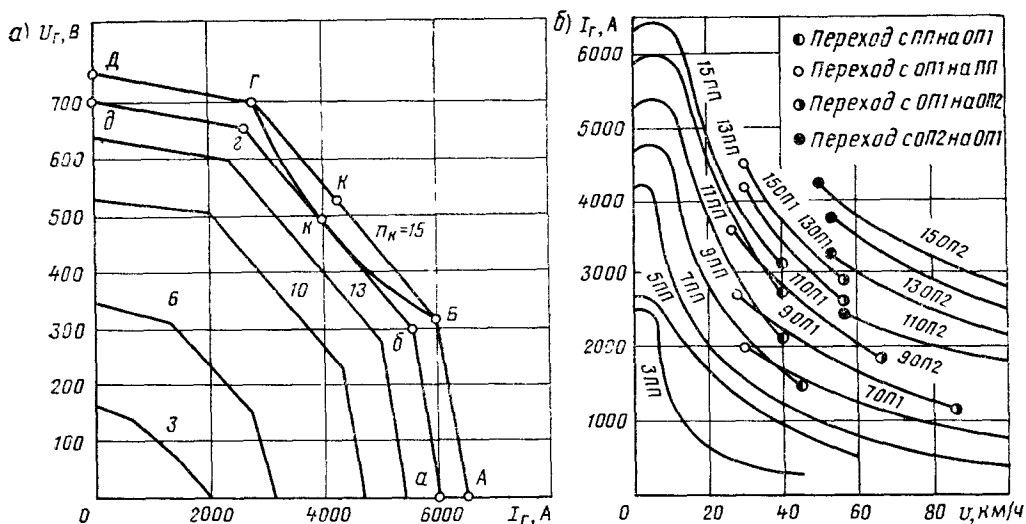


Рис. 38. Характеристики генератора:

$a$  — внешние на различных положениях контроллера;  $b$  — изменение тока генератора  $I_r$  в зависимости от скорости движения  $v$ ;  $U_T$  — напряжение тягового генератора;  $п_k$  — положение рукоятки контроллера машиниста; ПП — параллельное соединение; ОП1—ОП2 — то же с ослаблением возбуждения

Схема внутренних электрических соединений генератора показана на рис.37. Ток от полюсовых щеток по кабелю Я поступает в тяговые электродвигатели и по кабелю ДП, добавочным полюсам (соединенным в две параллельные группы) возвращается к минусовым щеткам. При пуске дизеля ток от полюса аккумуляторной батареи идет по кабелю Я, якорю генератора, добавочным полюсам, кабелю ДП, пусковой обмотке, кабелю П на минус батареи. На рис. 38 приведены внешние характеристики генератора для различных позиций контроллера и зависимость тока генератора от скорости с указанием точек подключения и отключения ослабления возбуждения.

## 5. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Синхронный генератор исключает проблему коммутации при любой мощности, которую можно практически осуществить на тепловозе. Кроме того, он обладает еще рядом преимуществ.

Генератор более надежен из-за отсутствия коллектора и сложной, легко уязвимой изоляции на вращающейся части машины — якоре. Уменьшаются эксплуатационные расходы из-за значительного уменьшения количества щеток, а также снижения их износа на контактных кольцах и времени на профилактические работы в депо, так как уход за контактными кольцами значительно проще ухода за коллектором; резко уменьшается трудоемкость при ремонтах.

Увеличиваются электромагнитные нагрузки вследствие исключения проблемы коммутации. Снижается масса генератора в основном за счет уменьшения расходов особо дорогостоящих материалов: электротехнической стали и меди. Это хорошо видно из сравнения расходов материалов на генераторы переменного тока ГС-504 и постоянного тока ГП-313Б (табл. 3). Следует отметить, что уменьшение массы генератора частично перекрывается необходимостью применения выпрямительной установки, масса которой равна 650 кг. Однако система тяговой электропередачи при помощи передачи переменного-постоянного тока только начала развиваться и можно рассчитывать на дальнейшее снижение

Таблица 3

| Показатели               | Тип генератора |         | Показатели      | Тип генератора |         |
|--------------------------|----------------|---------|-----------------|----------------|---------|
|                          | ГС-504         | ГП-313Б |                 | ГС-504         | ГП-313Б |
| Мощность, кВт            | 2750           | 2700    | Масса меди, кг  | 860            | 1907    |
| Частота вращения, об/мин | 1000           | 1000    | Масса стали, кг | 2534           | 3032    |
| Масса, кг                | 6500           | 9000    |                 |                |         |

массы, учитывая также теоретически возможное исключение возбудителя генератора и перевод его на самовозбуждение; действительно, синхронный генератор ГС-504А имеет массу уже 6500 кг.

Стоимость генератора снижается потому, что уменьшается расход цветного металла и электротехнической стали, снижается трудоемкость вследствие упрощения конструкции. Синхронный генератор допускает частоту вращения более высокую, чем генератор постоянного тока, что позволяет снизить массу дизель-генераторной установки.

Синхронный генератор ГС-501, который изготавливается для дорог СССР с индексом А, имеет следующие параметры:

|                                        | ГС-501А                         | ГС-501АТ                        |
|----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Активная мощность, кВт                 | 2190                            | 1850                            |
| Линейное напряжение, В                 | 300/535                         | 345/535                         |
| Действующее значение линейного тока, А | $2 \times 2270 / 2 \times 1130$ | $2 \times 1700 / 2 \times 1100$ |
| Максимальный ток в течение 2 мин, А    | $2 \times 3400$                 | $2 \times 2700$                 |
| Частота вращения, об/мин               | 1000                            | 1000                            |
| Частота, Гц                            | 100                             | 100                             |
| К. п. д., %                            | 94,3                            | 95                              |
| Режим работы                           | Продолжительный                 |                                 |
| Масса, кг                              | 6000                            | 6000                            |

Синхронный генератор (рис. 39) представляет собой явнополюсную машину с двумя трехфазными обмотками на статоре, сдвинутыми на  $30^\circ \text{эл}^1$ . В генераторе применена независимая осевая вентиляция с поступлением воздуха извне и очисткой его специальными фильтрами. Подача воздуха осуществляется сверху со стороны привода, а выброс — через боковые патрубки щита. Расход охлаждающего воздуха  $4,45 \text{ м}^3/\text{с}$  при напоре не более  $1,5 \text{ кПа}$ .

Корпус 13 ротора генератора сварной, выполнен по типу корпуса якоря генератора тепловоза ТЭЗ, т. е. имеет безвальную конструкцию. С одного конца в цилиндрическую часть корпуса (бочку) вварена литая стальная втулка, на которой монтируют токосъемные кольца и подшипник, с другого вварен фланец для соединения с коленчатым валом дизеля призонными болтами. На корпусе ротора расположен несущий обод из листовой стали со штампованными пазами для крепления полюсов. Листы обода стянуты нажимными шайбами. Сердечники полюсов набраны из отдельных листов электротехнической стали толщиной  $1,4 \text{ мм}$  марки 08 кп, стянутых между собой при помощи нажимных шайб, шпилек и гаек.

Генератор имеет 12 полюсов, прикрепляемых к ободу ротора при помощи соединения «ласточкин хвост» и клиновых шпонок. Полюсы имеют успокоительную (демпферную) обмотку 18, выполненную из восьми медных стержней

<sup>1</sup>  $1^\circ \text{эл.} = 1/360$  части периода переменного тока. На окружности якоря ему соответствует  $\frac{1}{p}$  геом.  $^\circ$ . При  $2p = 12$ ,  $30^\circ \text{эл.} = 5 \text{ геом. } ^\circ$ .

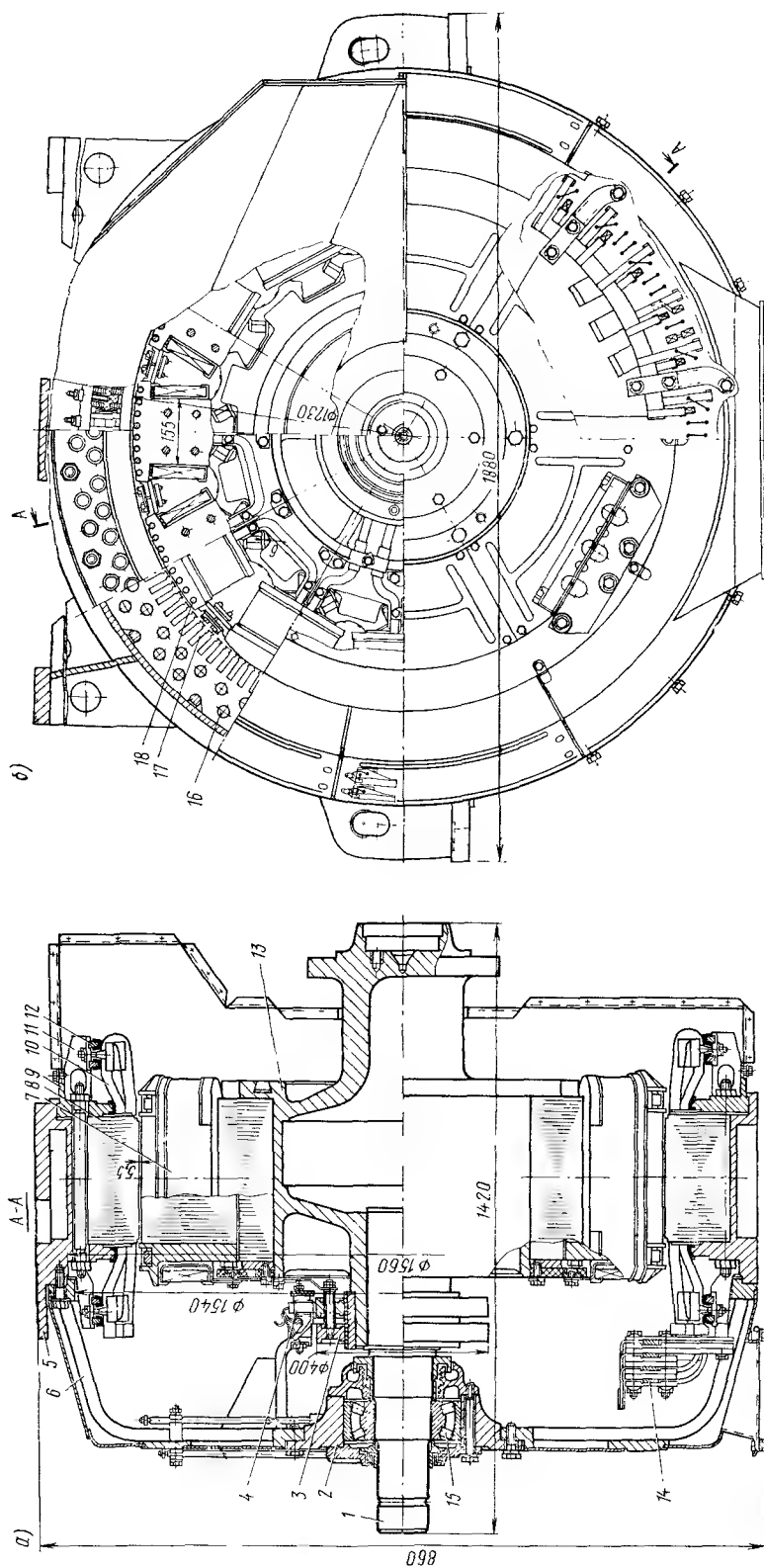


Рис. 39. Синхронный тяговый генератор:

а — продольный разрез; б — поперечный разрез; 1 — вал; 2 — крышка; 3 — контактные кольца; 4 — щеткодержатель; 5 — станна; 6 — подшипниковый щит; 7 — катушка полюса ротора; 8 — сердечник статора; 9 — нажимная шайба; 10 — обмотка статора; 11 — ребро; 12 — кольцо; 13 — корпус ротора; 14 — выводя; 15 — подшипник; 16 — вентиляционный канал; 17 — паз; 18 — демпферная обмотка

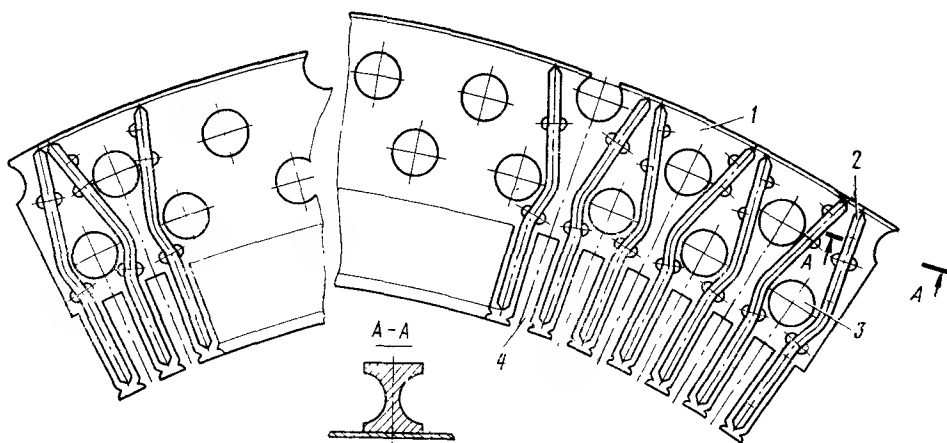


Рис. 40. Лист сердечника статора (сегмент):

1 — лист статорный; 2 — палец нажимной; 3 — вентиляционные отверстия; 4 — паз

диаметром 12 мм и дуг. Стержни вложены в специальные пазы, расположенные в полюсном башмаке. Катушки 7 полюсов выполнены из шинной меди  $1,35 \times 25$  мм, намотанной на узкое ребро, и закреплены на полюсе при помощи заливки эпоксидным компаундом, который служит также изоляцией катушки от корпуса. Класс изоляции В, число витков на полюс 66. Сопротивление обмотки при  $20^\circ \text{C}$  0,458 Ом. Все катушки соединены последовательно. Начало и конец обмотки возбуждения выведены на стальные контактные кольца 3 и присоединены к ним шпильками, ввернутыми в кольца и закрепленными сваркой.

Щетки марки ЭГ-4 (размер  $25 \times 32 \times 64$  мм), помещенные в латунные щеткодержатели 4, подводят ток к обмотке возбуждения. Щеткодержатели закреплены сегментами через изолированную подвеску на специальном выступе щита. Контактные кольца смонтированы на стальной втулке, изолированы пластмассой и насажены на втулку корпуса ротора.

Генератор имеет один сферический радиальный роликовый подшипник 15 с одним щитом сварной конструкции. В подшипниковом щите имеется съемная крышка 2, обеспечивающая замену подшипника без снятия щита. Станина 5 сварная, выполнена так, чтобы при заданном внешнем диаметре статора получить максимальный момент инерции и минимальную массу.

В станине собирается сердечник из сегментов электротехнической стали (рис. 40), которые стягиваются при помощи шпилек и нажимных шайб. Сердечник статора набран из листов толщиной 0,5 мм стали Э-43; имеет 144 паза и 120 вентиляционных отверстий диаметром 27 мм. Обмотка статора двухслойная, волновая, стержневая. Шаг по пазам 1—13—25. Сопротивление одной фазы при  $20^\circ \text{C}$  0,0011 Ом. Обмотка выполнена из медного изолированного провода размером  $2,1 \times 9,3$  мм (рис. 41) и уложена в пазы. Пайка катушек между собой и к выводным шинам производится серебряным припоем.

Соединение катушечных групп выполнено шинной медью. Обмотки в пазах закреплены пластмассовыми клиньями, а в лобовых частях — специальными колодка-

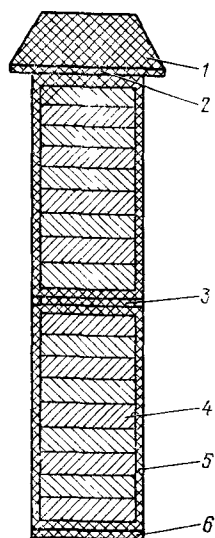


Рис. 41. Расположение обмотки статора в пазу:

1 — клин; 2, 3, 6 — изоляционные прокладки; 4 — медь; 5 — изоляция от корпуса

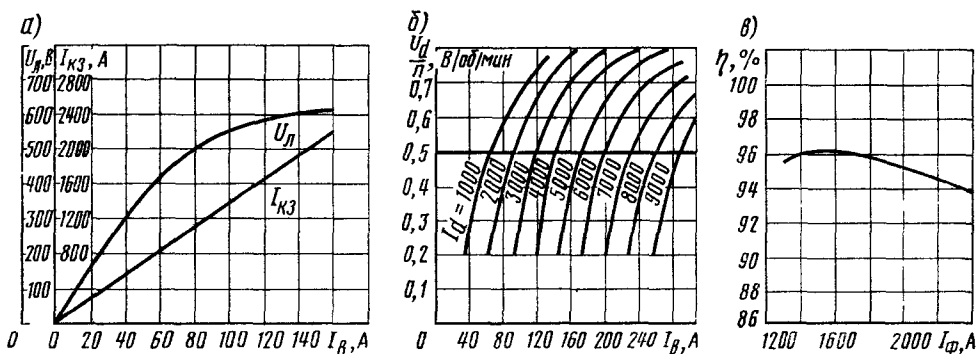


Рис. 42. Характеристика генератора ГС-501А:  
 а — холостого хода и короткого замыкания; б — нагрузочные; в — к. п. д.

ми, притянутыми к изолированным кольцам 12 (см. рис. 39), укрепленным на ребрах 11 нажимных шайб. Генератор имеет шесть выводов фаз, два вывода от нулевых точек обмоток статора и два вывода от обмотки полюсов ротора. Основные характеристики синхронного генератора показаны на рис. 42.

Генератор должен надежно работать в условиях вибрации с амплитудой 0,25 мм (на лапах генератора) при частоте 6—17 Гц. Генератор допускает превышение частоты вращения в аварийных режимах до 1150 об/мин. Срок службы изоляции до полной замены устанавливается для статора 1,2 млн. км, для ротора 1,5 млн. км; в перспективе для статора и ротора срок службы до 2,5 млн. км. Срок службы генератора 25 лет. Нельзя не отметить, что рост секционной мощности тепловозов, увеличение мощности вспомогательных нагрузок, отбора значительной мощности на электрическое отопление пассажирского поезда выдвигает повышенные требования к агрегатам электрического оборудования по снижению массы, габаритов, числа машин, приводов и улучшения их компоновки. На тепловозах ближайшей перспективы 2ТЭ121 и ТЭП75 применены тяговые агрегаты, которые включают в себя тяговые синхронные генераторы и синхронные генераторы собственных нужд с самовозбуждением.

## 6. ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Тяговые электродвигатели должны обеспечивать в условиях жестко ограниченного габарита широкий диапазон изменения частоты вращения, значительные вращающие моменты, надежно работать в условиях многократных и одиночных ударов, вибрации (неизбежных при движении тепловоза) и изменения температуры окружающей среды в диапазоне от  $-50$  до  $+40^\circ\text{C}$ , а в специальном исполнении от  $-60$  до  $+40^\circ\text{C}$ . В тяговые электродвигатели через неплотности и выходные отверстия для охлаждающего воздуха может попадать снег (особенно на стоянках), песок и пыль, поэтому конструкция всех узлов двигателей должна обеспечивать их герметичность. Все двигатели постоянного тока имеют независимую вентиляцию осевого типа с подачей воздуха со стороны коллектора.

Для примера рассмотрим конструкцию наиболее распространенных тяговых электродвигателей постоянного тока ЭД-118А и ЭД-107А, которые отличаются друг от друга изоляцией обмотки якоря, катушек главных и добавочных полюсов, соединительными шинами, щеткодержателями. Эти двигатели устанавливаются на тепловозах 2ТЭ10В, 2ТЭ10Л, М62, V-300, 2ТЭ116, ТЭМ2 и др. (рис. 43).

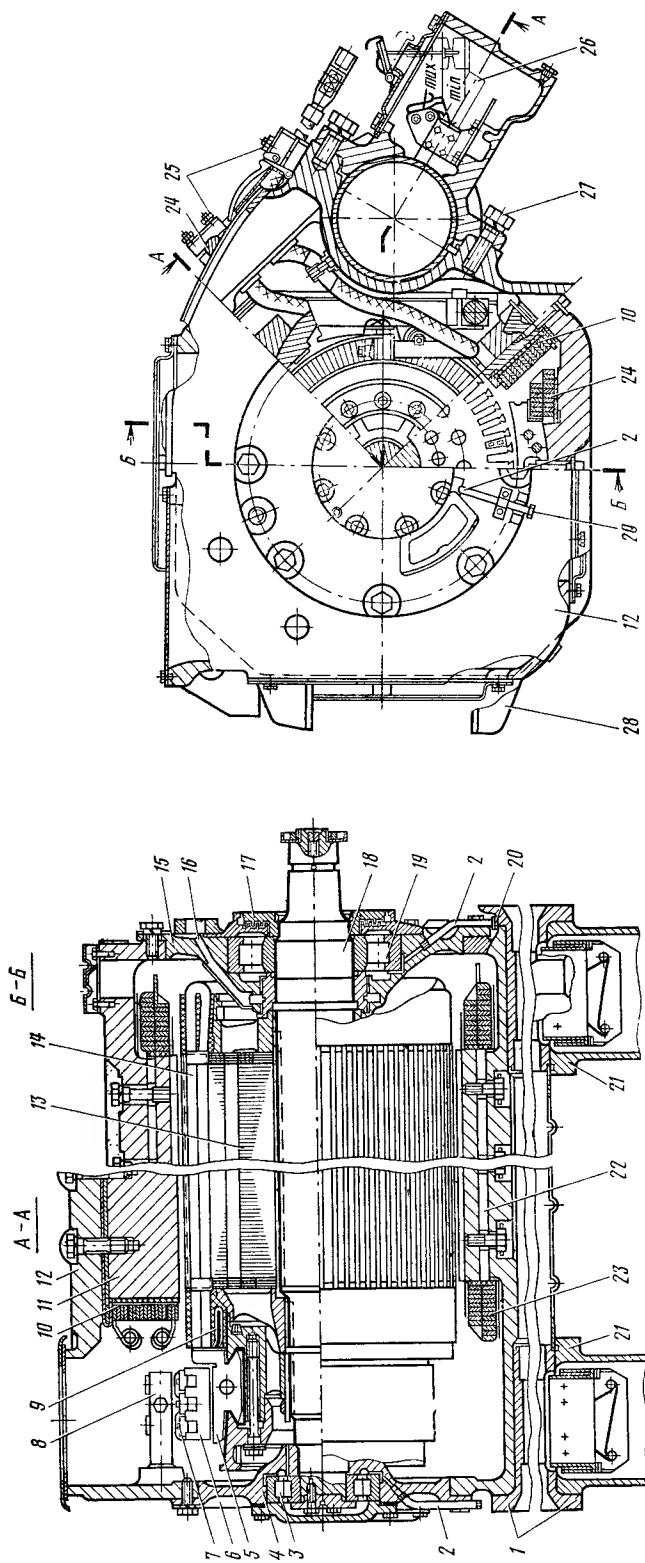


Рис. 43 Тяговый электродвигатель ЭД-118А:

1 — вкладыши моторно осевого подшипника; 2 — трубки подачи смазки; 3 — роликовый подшипник передний; 4 — щит подшипниковый передний; 5 — коллектор; 6 — щеткодержатель; 7 — изолятор; 8 — кронштейн; 9 — уравнительные соединения; 10 — катушка добавочного полюса; 11 — добавочный полюс; 12 — остова; 13 — сердечник якоря; 14 — обмотка якоря; 15 — щит подшипниковый задний; 16 — дренажное отверстие; 17 — уплотнительное лабиринтное кольцо; 18 — вал; 19 — роликовый подшипник задний; 20 — пробки трубок подачи смазки; 21 — корпус (шапка) моторно осевого подшипника; 22 — главный полюс; 23 — катушка главного полюса; 24 — клинцы; 25 — выводной провод; 26 — болты; 27 — фитиль; 28 — опорные выступы («носки»)

Основные характеристики электродвигателя ЭД-118А следующие:

|                                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|
| Мощность                          | 305 кВт          |
| Напряжение номинальное            | 463 В            |
| Напряжение максимальное           | 700 В            |
| Ток номинальный                   | 720 А            |
| Ток максимальный, кратковременный | 1100 А           |
| Частота вращения                  | 585/2290 об/мин* |
| К. п. д.                          | 91,5%            |
| Число главных полюсов             | 4                |
| Число добавочных полюсов          | 4                |
| Соппротивление обмоток при 20° С: |                  |
| главных полюсов                   | 0,0105 Ом        |
| добавочных полюсов                | 0,00812 Ом       |
| якоря                             | 0,013 Ом         |
| Класс изоляции                    |                  |
| катушек главных полюсов           | F                |
| катушек добавочных полюсов        | F                |
| обмотки якоря                     | B                |
| Масса                             | 3100 кг          |

\* В числителе — номинальная, в знаменателе — максимальная.

Остов выполняет функции магнитопровода и является основой всей конструкции двигателя. Магнитная система включает в себя остов и полюсы с катушками. В расточках остова установлены вкладыши моторно-осевых подшипников, корпуса которых крепятся болтами к площадкам остова. С другой стороны остов имеет два прилива («носика»), предназначенные для закрепления электродвигателя на тележке тепловоза. К торцовой стенке остова со стороны коллектора приварены четыре кронштейна для крепления щеткодержателей.

Тяговые электродвигатели являются реверсивными и разница частот вращения при вращении в разные стороны при одной и той же нагрузке не должна превышать 4% (ГОСТ 2582—72). Этим обусловлены жесткие требования к установке щеток по нейтрали. Допуск на расположение кронштейнов после приварки их к остову равен  $\pm 0,5$  мм. Остов имеет восьмигранную форму и отлит из углеродистой стали.

Тяговый электродвигатель имеет четыре главных и четыре добавочных полюса. Сердечники главных полюсов собирают (шихтуют) из штампованных листов малоуглеродистой стали Ст2, спрессовывают и скрепляют заклепками, сердечники добавочных полюсов изготовлены из проката Ст3. Катушки главных полюсов намотаны из голой полосовой меди плашмя в два слоя. Катушки добавочных полюсов намотаны также из голой полосовой меди, но на ребро.

Витковая изоляция катушек главных полюсов выполнена из асбестовой бумаги, слои катушки изолированы один от другого стеклотекстолитовой прокладкой. Для обеспечения закрепления катушки на сердечнике зазоры между ними заполняют асбестовой лентой ЛАЭ и затем пропитывают в компаунде монолит-2. Изоляция класса F.

Катушки добавочных полюсов от сердечника изолированы бумагой асбестовой, лентой ЛС40РУ и стеклянной лентой ЛЭС. Пустоты заполняются замазкой П-11. Затем катушка пропитывается в компаунде. Класс изоляции F. Чтобы компенсировать усадку изоляции катушек при эксплуатации, на главных и добавочных полюсах установлены пружинные рамки.

Межполюсные соединения катушек и крепления соединений являются также немаловажным элементом магнитной системы. Опыт эксплуатации

показал, что межполюсные соединения, выполненные шинами или гибкими кабелями, при неудовлетворительном креплении вибрируют, что приводит к изломам как самих соединений, так и выводов катушек. Предпочтение отдают межполюсным соединениям, выполненным из шинной меди, и креплениям с резиновыми прокладками, гасящими высокочастотные вибрации.

Сердечник якоря собран на валу из штампованных листов электротехнической стали марки Э1300 толщиной 0,5 мм, лакированных с обеих сторон; крайние листы имеют толщину 1 мм. Они имеют уширенные пазы для укладки усиленной изоляции. Число пазов 54. Листы набираются по массе 363 кг. В спрессованном состоянии сердечник удерживается при помощи нажимных шайб, которые одновременно являются обмоткодержателями. Обмоткодержатели покрывают стеклотканью, пропитанной в эпоксидном лаке, затем спрессовывают и запекают. Образуется монолитный слой изоляции.

В пазах сердечника уложена петлевая обмотка 14, имеющая шаг по пазам 1—14, шаг по коллектору 1—2 (рис. 44). В пазу размещены две стороны различных катушек. Каждая катушка состоит из четырех элементарных новитковых секций. Секция состоит из трех параллельных проводников, которые расположены по высоте паза, а четыре витка, входящих в катушку, — по ширине паза, т. е. имеют горизонтальную укладку (рис. 45).

Вихревые токи, наводимые потоком рассеяния, уменьшаются путем разделения витка на три параллельных провода по высоте. В пазовой части катушка изолирована стеклослюдянитовой лентой ЛС-ПЭ и одним слоем стеклянной ленты ЛЭС. Передние и задние лобовые части дополнительно имеют между витками секций прокладки из слюды. Концы катушек в изгибах дополнительно изолируются полиамидной пленкой ПМА.

Секции якорной обмотки закладывают в петушки коллекторных пластин; для предотвращения их обрыва изолируют специальной замазкой, а образовавшиеся пустоты заполняют изоляционной замазкой.

На дно паза и под стеклотекстолитовый клин устанавливают стеклотекстолитовые прокладки, предохраняющие от повреждения изоляцию при укладке и усадке катушек и забивке клиньев, а также компенсирующие отклонения по высоте катушек для заполнения паза. Шаг по коллектору уравнильных соединений первого рода 1—109. В электродвигателях ЭД-118А улучшен по сравнению с электродвигателями ЭД-107 технологический процесс намотки стеклобандажной ленты на задние лобовые части обмотки якоря и введено покрытие пропитанного якоря влагостойкой эмалью с последующей запечкой. Эмалевая пленка предохраняет изоляцию от проникновения влаги через поры и микротрещины в поверхностном слое пропиточного лака. Продольный разбег якоря 0,08—0,5 мм.

Коллектор тягового электродвигателя арочного типа состоит из втулки, нажимного конуса, пластин, двух изоляционных манжет, изоляционного цилиндра и стяжных болтов (см. рис. 43). Диаметр коллектора 400 мм. Пластины отштампованы из твердотянутой профильной меди, легированной кадмием или серебром, за одно целое с петушком. В нижней части они имеют форму ласточкина хвоста, позволяющего прочно скрепить коллектор. Втулка и нажимной конус, конусные выступы которых входят в выточки пластин, сжаты под прессом и стянуты 12-ю болтами. Надежность крепления коллектора проверяют при частоте вращения 2800 об/мин.

Щеткодержатели установлены против главных полюсов, т. е. по горизонтальной и вертикальной осям. Щеткодержатель имеет литой латунный корпус 1 (рис. 46), укрепленный в кронштейне, сваренном в торцовую стенку остова. В корпус запрессованы два стальных пальца 11, служащих для крепления щеткодержателей в кронштейне. Пальцы изолированы от корпуса прессматериалом АГ-4с или твердым изоляционным слоем из эпоксидного компаун-

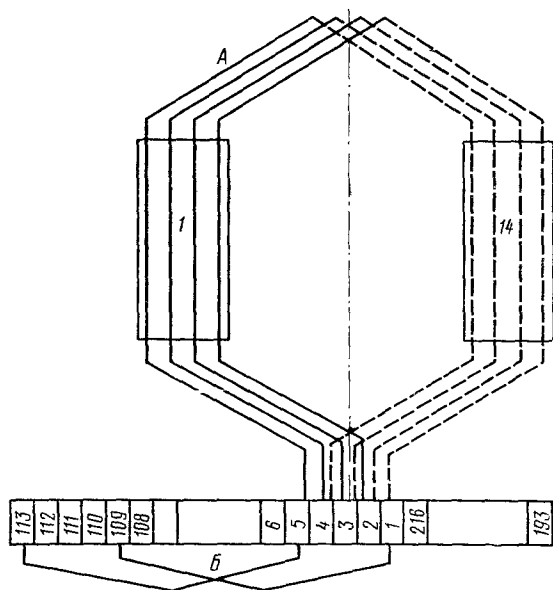


Рис. 44. Схема обмотки якоря:

1—216 — коллекторные пластины; 1—14 — пазы сердечника якоря; А — секции обмотки якоря; В — уравнивательные соединения

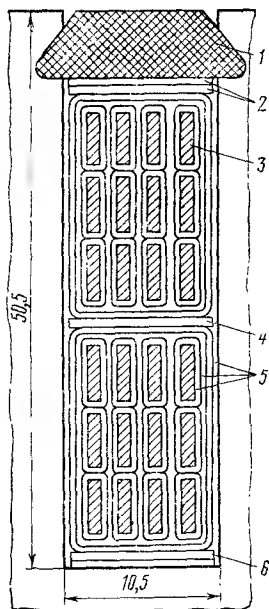


Рис. 45. Разрез паза якоря:

1 — клин; 2 — прокладка под клин; 3 — медь; 4 — прокладка между катушками; 5 — изоляция от корпуса; 6 — прокладка на дне паза

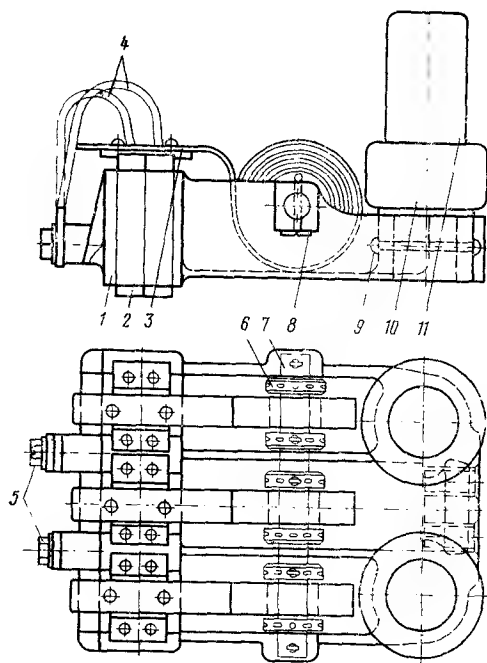


Рис. 46. Щеткодержатель:

1 — корпус щеткодержателя; 2 — щетка; 3 — пружина спиральная; 4 — шунт медный; 5 — болт; 6 — втулка; 7 — ось; 8 — шпилька; 9 — заклепка; 10 — изолятор; 11 — палец щеткодержателя

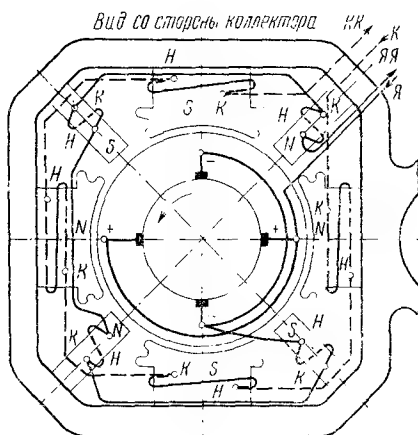


Рис. 47. Схема соединения обмоток полюсов и якоря электродвигателя ЭД-118:

Я, ЯЯ — выводы обмотки якоря и добавочных полюсов; К, КК — выводы обмотки возбуждения главных полюсов. Штриховой линией показаны соединения со стороны шестерни

да, на который надеты изоляторы из пресс-материала К-78-51, которые обеспечивают высокие изоляционные свойства.

В корпусе щеткодержателя имеется два гнезда. В одно гнездо вставлена одна пара щеток, а в другое — две пары. Щетки разрезные размером 2 (12,5 × 40 × 60 мм) марки ЭГ-61 с резиновыми амортизаторами. Щетки в гнездах должны перемещаться свободно, но не иметь качения. Нажатие их на коллектор осуществляется спиральными пружинами 3. Нажатие 41—47 Н, регулируется поворотом втулки, находящейся в центре пружины, на 9°. Щетки также снабжены гибкими шунтами, прикрепленными болтами к корпусу щеткодержателя. В эксплуатации необходимо следить за тем, чтобы контакт гибких шунтов не нарушался.

На электродвигателях должны быть установлены щетки одной марки. Это особенно важно при петлевой обмотке, так как различие в марках щеток может вызвать протекание больших токов по уравнительным соединениям, что приводит к выплавлению их пайки в петушках коллектора и разрушению изоляции.

Катушки главных полюсов, так же как и добавочных, соединены последовательно (рис. 47). Электромеханические характеристики электродвигателя, построенные для напряжения на зажимах двигателя при работе тепловоза на 15-й позиции контроллера, показаны на рис. 48.

На электродвигателе ЭД-118А применяется стеклобандаж (нетканая лента из стекла), который наматывают на лобовые части обмотки, так же как и металлический бандаж, но без изоляции из миканита и картона. Лента пропитана лаком; после запечки образуются как бы стеклотекстолитовые кольца. Стеклобандажи, помимо экономии дефицитного миканита, позволяют избежать сползания бандажа. Кроме того, в эксплуатации при разрыве бандажа не выходят из строя катушки главных полюсов. Повышена плотность соединений деталей коллектора с тем, чтобы влага не могла проникнуть во внутреннюю полость. Применено более

совершенное крепление балансировочных грузов. Увеличено число отверстий для крепления подшипниковых щитов, на торцевой части остова добавлены две бонки для крепления кожуха зубчатой передачи.

Увеличена толщина магнитопроводной части остова, откорректирован зазор под добавочными полюсами. Для удобства замены и осмотра щеток на щеткодержателях установлены стойки с заплечиками, позволяющие фиксировать пружины в приподнятом состоянии.

В подшипниковых щитах установлены более мощные якорные подшипники: со стороны коллектора № 8Н92417К1М, со стороны шестерни № 8Н32330М. Усилено крепление крышек подшипников, изменена конструкция лабиринтного уплотнительного кольца со стороны шестер-

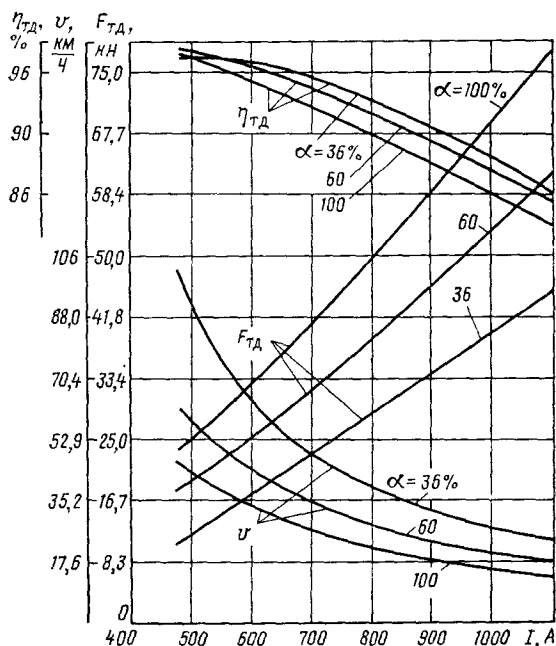


Рис. 48. Основные характеристики тягового электродвигателя ЭД-118А

ни с тем, чтобы смазка из редуктора не попадала в подшипник. Для лучшей работы моторно-осевых подшипников разработана масляная камера увеличенного объема с польстерным устройством.

**Тяговые электродвигатели переменного тока.** Асинхронные двигатели, особенно с короткозамкнутым ротором, из всех видов электродвигателей являются наиболее простыми по конструкции, дешевыми в изготовлении, самыми надежными в эксплуатации, требуют небольших затрат на обслуживание и ремонт, имеют минимальную массу на единицу мощности и высокий к. п. д. Учитывая тяжелые условия работы тяговых электродвигателей и рост секционной мощности тепловозов, использование асинхронных двигателей для тяги постоянно привлекало к себе внимание ученых и конструкторов подвижного состава.

Наряду с указанными выше достоинствами асинхронные электродвигатели имеют ряд недостатков, затрудняющих их использование на подвижном составе:

1. Пусковая характеристика двигателя с короткозамкнутым ротором при постоянной частоте тока не обеспечивает высоких ускорений, так как момент при трогании относительно мал и увеличивается до максимального значения с ростом скорости.

2. Управление частотой вращения электродвигателя затруднено.

3. Воздушный зазор между статором и ротором очень мал. Увеличение зазора повышает массу и увеличивает размеры двигателя.

4. Пуск электродвигателя с короткозамкнутым ротором связан с большими потерями мощности и нагреванием обмоток. Успехи силовой полупроводниковой техники и средств автоматики дают возможность создать надежные и экономичные статические преобразователи частоты с приемлемыми для тепловозов размерами и массой. Этим обуславливается практическое использование в тепловозной тяге передачи переменного тока с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями, тем более, что для тепловозов с дизелями мощностью более 2940 кВт в секции при использовании тяговых электродвигателей постоянного тока придется существенно усложнять их конструкцию (применять сборные или сварные остовы, компенсационные обмотки и т. п. или увеличивать число осей). Харьковский завод «Электротяжмаш» им. Ленина, Ворошиловградский тепловозостроительный завод им. Октябрьской революции и Таллинский электромеханический завод им. Калинина создали опытный тепловоз ТЭ120 мощностью 2940 кВт с передачей переменного тока, на котором применены асинхронные короткозамкнутые тяговые электродвигатели ЭД-900 (рис. 49). Тяговые электродвигатели ЭД-900 с опорно-осевой подвеской имеют следующие основные характеристики:

|                                           |                        |
|-------------------------------------------|------------------------|
| Мощность                                  | 380 кВт                |
| Напряжение                                | 720/960 В              |
| Ток                                       | 413/290 А              |
| Частота вращения при постоянной мощности  | 490/2460 об/мин        |
| Коэффициент полезного действия            | 91/93,5%               |
| Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ )   | 0,81/0,85              |
| Подача охлаждающего воздуха               | 1,25 м <sup>3</sup> /с |
| Напор                                     | 2,60 кПа               |
| Момент на валу при продолжительном режиме | 7355 Н·м               |
| Соединение фаз                            | звезда                 |
| Масса                                     | 2300 кг                |

В тяговых машинах переменного тока магнитопровод, выполняемый из листов электротехнической стали, не может служить одновременно остовом машины (недостаточная устойчивость его формы), поэтому он закреплен в кор-

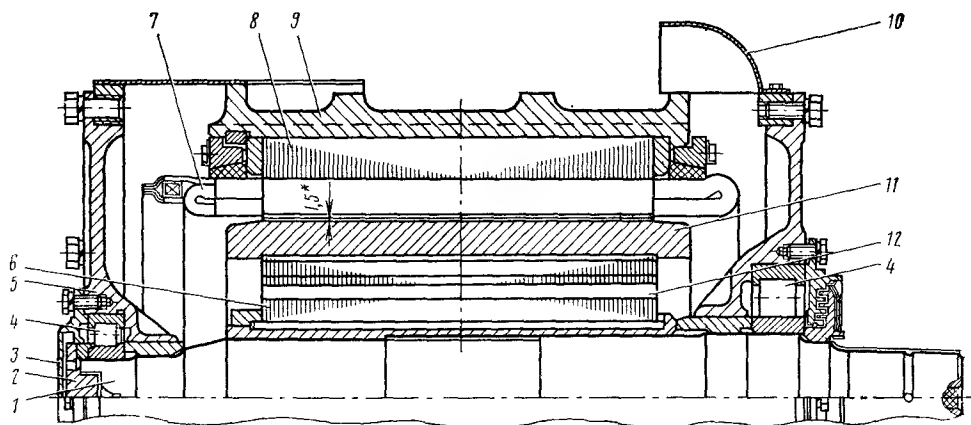


Рис. 49. Асинхронный тяговый электродвигатель ЭД-900:

1 — вал; 2 — шайба; 3 — крышка подшипника; 4 — роликовый подшипник; 5 — подшипниковый щит; 6 — сердечник ротора; 7 — обмотка статора; 8 — сердечник статора; 9 — остов; 10 — кожух защитный; 11 — кортказамкнутая обмотка ротора; 12 — вентиляционные отверстия в сердечнике ротора

пусе статора. Толщина стенок остова определяется из условий прочности и сопряжения с другими частями машины: подшипниковыми щитами, деталями воздуховода и др.

Внутренние продольные и радиальные стенки и ребра должны образовывать каналы, определяемые вентиляционной схемой машины. Литой круглый остов электродвигателя ЭД-900 имеет внутренние осевые ребра жесткости, образующие каналы для прохода охлаждающего статор воздуха. Для входа и выхода воздуха остов имеет два люка. Выходной люк снабжен защитным кожухом, предохраняющим от попадания внутрь двигателя воды (при мойке тележек).

Независимая вентиляция осуществляется продувкой воздуха двумя параллельными потоками: через вентиляционные каналы между стальным пакетом статора и корпус и через два ряда круглых вентиляционных отверстий в роторе. Воздушный зазор между статором и ротором 1,5 мм.

Пакет статора набирают из листов электротехнической стали на специальные призмы. Обмотку статора укладывают в пазы сердечника статора и закрепляют в них изоляционными клиньями, затем выполняют пропитку, сушку и закрепление лобовых частей. Обмотанный статор обтачивают по призмам и запрессовывают в остов. Изоляция от корпуса обмотки статора выполнена из полиамидной пленки.

На вал электродвигателя напрессована втулка, на которую напрессован сердечник ротора, набранный из листов электротехнической стали. Пазы ротора, имеющие овальную, полузакрытую форму, заливают алюминием. Конструкция подшипниковых узлов подобна подшипниковым узлам тяговых электродвигателей постоянного тока.

Внешняя характеристика асинхронного двигателя жесткая, такую же характеристику имеет двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, но перегружаемость двигателя постоянного тока ограничивается нагреванием и коммутацией, а асинхронного — развиваемым им максимальным моментом. Поэтому асинхронный двигатель допускает пе-

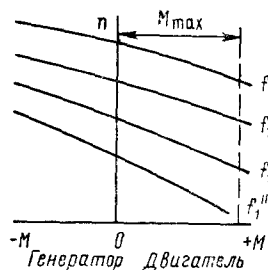


Рис. 50. Рабочие характеристики асинхронной машины при различной частоте

регрузку, ограничиваемую той частью внешней характеристики, которая обуславливает устойчивый характер работы машины. Рабочие характеристики асинхронной машины при различной частоте изображены на рис. 50, причем  $f_1 > f'_1 > f''_1 > f'''_1$ .

Максимальный (опрокидывающий) момент, развиваемый ротором в двигательном режиме,

$$M_{\max} = \frac{1}{4\pi} \frac{pm_1 U_1^2}{f_1 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2})},$$

где  $p$  и  $m$  — число пар полюсов и число фаз обмотки статора;

$f_1$  — частота питающей сети, Гц;

$R_1$  — приведенное активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

Приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_K = \sigma_1 X_1 + \sigma_2' X_2'.$$

Коэффициент рассеяния  $\sigma_1 = 1 + \frac{X_1}{X_m} = 1,04 \dots 1,08$ . Большое значение коэффициента рассеяния принимается для многополюсных машин ( $2p > 6$ ). Регулирование частоты вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей осуществляется регулированием частоты питания  $f_1$ . Так как индуктивное сопротивление обмоток  $X_K = f$ , а активное сопротивление  $R_1$  для больших машин незначительно сравнительно с  $X_K$ , то при сравнительно большой частоте (10—15 Гц) можно пренебречь значением  $R_1$ . Учитывая, что  $X = 2\pi fL$ , получим

$$M_{\max} = 0,08 \frac{pm_1 U_1^2}{f_1 X_K} = C' \frac{U_1^2}{f_1^2 L_K} = C \frac{U_1}{f_1}.$$

Из полученного выражения видно, что для сохранения максимального момента примерно постоянным при регулировании частоты вращения изменением частоты питающего напряжения необходимо выдерживать соотношение  $U_1/f_1 = \text{const}$ . Из приведенных на рис. 50 характеристик усматривается некоторое снижение максимального момента при уменьшении  $f_1$ . При пуске двигателя ( $f_1 = 2 \div 6$  Гц)  $R_1$  оказывает влияние на значение максимального момента. Следовательно, необходимо подводить к электродвигателю напряжение большее, чем получается из приведенного соотношения.

### ГЛАВА 3

## ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ МАШИН

---

### 7. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Требования к конструкции тяговых электрических машин более жесткие, чем стационарных, что определяется, как уже указывалось, размещением их на локомотиве. Существенными являются и затруднения текущего ухода, в особенности применительно к машинам, расположенным под рамой локомотива, т. е. к тяговым электродвигателям. Параметры машин, определяемые допустимыми электрическими и магнитными нагрузками, а также условия нагревания и коммутации, которые особенно трудны для тяговых двигателей вследствие того, что  $n_{\max}$  имеет место при  $U_{\max}$ , создают ряд особенностей в проектировании и расчете тяговых машин тепловозов.

Одним из основных условий расчета тяговых машин является сохранение постоянства нагрузки дизеля в широком диапазоне изменения внешней тяговой нагрузки локомотива (см. гл. I). Существенно важно определение границ гиперболической части характеристики, т. е. значений  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$ . Для использования мощности дизеля в возможно большем диапазоне тяговой нагрузки желательно, чтобы диапазон тока был как можно шире. Практически необходимо считаться с рядом ограничений по параметрам электрических машин. Для машин постоянного тока максимальное напряжение генератора ограничено допустимой величиной среднего напряжения между пластинами коллектора ( $\approx 18$  В) и максимально допустимым значением реактивной э. д. с. Магнитные материалы обладают свойством насыщения. Следовательно, при определенных материалах для повышения максимальной э. д. с. машины необходимо увеличение размеров ее полюсов и других участков магнитопровода.

По опыту проектирования и эксплуатации для тепловозных генераторов постоянного тока мощностью  $\geq 1000$  кВт рационально принимать  $U_{\text{гmax}} = 700 \div 800$  В. В пределах гиперболической части характеристики генератора лежит его номинальный продолжительный ток нагрузки.

Номинальное напряжение генератора  $U_{\text{гном}}$  находится в определенном соотношении с наибольшим напряжением  $U_{\text{гmax}}$ . Кратность изменения напряжения называется *коэффициентом регулирования* генератора  $C_r = U_{\text{гmax}}/U_{\text{гном}}$ . При допустимых размерах тепловозного генератора  $C_r = 1,4 \div 1,6$ .

В передаче на постоянном токе применяют генераторы независимого возбуждения, тяговые двигатели последовательного возбуждения. В последнее время имеется тенденция к применению двигателей независимого и смешанного возбуждения. Независимое возбуждение генератора представляет наилучшие возможности автоматического программного регулирования возбуждения, а следовательно, напряжения генератора.

Двигатели последовательного возбуждения имеют «мягкую» характеристику  $n_{\text{д-г}} = f(I)$ , а следовательно, и  $M_{\text{д-г}} = \varphi(I)$ ; это наиболее соответствует требованиям тяговой нагрузки. Однако современный уровень полупроводниковой техники позволяет осуществлять автоматическое регулирование системы возбуждения и этим задавать вид рабочих характеристик каждого двигателя. В этих условиях приемлемо независимое возбуждение как в тяговом,

так и в тормозном режиме двигателей. Расчет тяговых машин удобно вести по номинальной мощности, но при этом необходимо принимать магнитные нагрузки меньше, чем для машин общего применения. Иначе не будут практически достижимы магнитные нагрузки, обеспечивающие работу машины с максимальным напряжением.

При одних и тех же значениях частоты вращения якоря, а также магнитных и электрических нагрузок параметры машин зависят от типа обмотки якоря (см. табл. 2). На основании теории и практики конструирования машин проф. В. Т. Касьяновым (завод «Электросила») предложено выражение для определения мощности генератора с учетом его основных параметров

$$P_r = 0,00157 A D_{\text{я}} e \frac{am}{p} 10^{-3},$$

где  $e$  — среднее напряжение между коллекторными пластинами. При  $C_r = 1,5$ ; в номинальном режиме  $e \approx 14$  В;

$a$  — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;

$m$  — число ходов обмотки якоря.

Если  $A = 500$  А/см и  $e = 14$  В при одноходовой петлевой обмотке  $P_r = 11 D_{\text{я}} = 11 \cdot 120 = 1320$  кВт.

Для тепловозного генератора по условиям расположения его в кузове внешний диаметр станины  $D_{\text{ст}} \leq 160$  см. По опыту конструирования  $D_{\text{ст}} \approx (D_{\text{я}} + 40)$  см. Следовательно, для генератора постоянного тока наибольший диаметр якоря  $D_{\text{я}} = 120$  см.

Предельная мощность генератора при одноходовой петлевой обмотке  $P_r = 11 D_{\text{я}} = 1320$  кВт.

При двухходовой несимметричной петлевой обмотке  $P_r = 16,5 D_{\text{я}}$ . С тем же предельным диаметром якоря, но при сложной обмотке может быть выполнен генератор мощностью  $\approx 2000$  кВт. Необходимо учитывать также условия коммутации, которые зависят от напряжения между коллекторными пластинами и частоты переключений, а следовательно, от частоты вращения якоря. В. Т. Касьяновым установлен критерий благоприятной коммутации  $P_r n \leq \leq 2 \cdot 10^6$ . Например, на тепловозах с дизелями Д49 и Д70 может работать генератор мощностью

$$P_r = \frac{2 \cdot 10^6}{10^3} = 2000 \text{ кВт.}$$

Простые расчеты показывают, что при  $n > 1000$  об/мин генератор постоянного тока мощностью 2000 кВт является предельным и по габаритам и по условиям коммутации. Этим обусловлено применение на новых мощных тепловозах синхронных генераторов.

Размеры тяговых электродвигателей тоже ограничены. По опыту расчета и конструирования подвесных тепловозных электродвигателей установлены рациональные размеры  $D_{\text{я}} \leq 493$  мм и  $l_{\text{я}} \leq 430$  мм. При  $D_{\text{я}} = 493$  мм число полюсов может быть четыре или шесть.

Машина общего применения получается в шестиполусным исполнении на  $\approx 50\%$  легче, чем в четырехполусным. Для тяговых двигателей эта разница не более 10%, так как ограничение поперечных размеров приводит к необходимости при шестиполусным исполнении увеличивать длину сердечника, что вызывает затруднения в размещении зубчатой передачи.

Очертания станины шестиполусного двигателя приближаются к цилиндру, что менее выгодно для размещения, чем восьмигранная форма четырехполусного двигателя. Кроме того, при шестиполусным исполнении ограничение по напряжению на коллекторе ниже, чем при четырехполусным. В итоге рациональным является четырехполусное исполнение тепловозного тягового

электродвигателя постоянного тока, которое приводит к необходимости высокого использования активных материалов машин.

В отечественных тепловозных двигателях современных типов при изоляции класса Н линейная плотность тока якоря в номинальном режиме превышает уже 600 А/см.

По условиям коммутации теплового электродвигателя наиболее труден режим максимальной частоты вращения, так как при этом напряжение между коллекторными пластинами и реактивной э. д. с. имеет наибольшие значения.

Мощность тягового электродвигателя на валу

$$P_{\text{тд}} = \frac{\pi D_{\text{я}}}{2 \cdot 10^3} A e \eta,$$

где  $e$  — среднее напряжение между пластинами коллектора, В;

$\eta$  — к. п. д. двигателя.

Напряжение между пластинами определяется значениями реактивной э. д. с. и нагрузками активных материалов

$$e = \frac{e_p B_{\delta} \alpha}{\varepsilon A},$$

где  $\alpha$  — коэффициент полюсного перекрытия;

$\varepsilon$  — коэффициент рассеяния обмотки якоря.

Пользуясь этим выражением, получим мощность двигателя

$$P_{\text{тд}} = e_p D_{\text{я}} B_{\delta} \frac{\alpha}{2 \cdot 10^3 \varepsilon} \eta.$$

Магнитная индукция  $B_{\delta}$  в воздушном зазоре при максимальной угловой скорости якоря может быть выражена через индукцию при наименьшей длительной скорости

$$B_{\delta 0} = \beta \frac{B_{\delta}}{C_r} k_{\text{нас}},$$

где  $\beta$  — коэффициент ослабления возбуждения двигателя;

$k_{\text{нас}}$  — коэффициент насыщения тягового двигателя.

Для мощности двигателя получаем выражение

$$P_{\text{тд}} = \frac{e_p \pi D_{\text{я}} B_{\delta} \alpha k_{\text{нас}} \beta}{2 \cdot 10^3 \varepsilon C_r} \eta.$$

По опыту проектирования и эксплуатации отечественных тепловозных машин можно принять  $e_p \leq 8$  В;  $C_r = 1,5$ ;  $k_{\text{нас}} = 1,7$ ;  $\beta = 0,36$ ;  $\alpha = 0,7$ ;  $B_{\delta} = 1,0$  Тл;  $\varepsilon = 4,0$ ;  $\eta = 0,92$ . При таких параметрах мощность двигателя по допустимой реактивной э. д. с.  $P_{\text{тд}} \approx 9 D_{\text{я}}$ . По условиям коммутации для современных тепловозных четырехполюсных двигателей при основных размерах:  $D_{\text{я}} = 49$  см и  $l_{\text{я}} = 43$  см

$$P_{\text{тд}} n_{\text{max}} \leq 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{об/мин.}$$

Для наибольшей мощности  $P_{\text{тд}} = 450$  кВт, которая может быть вложена в двигатель с диаметром сердечника якоря  $D_{\text{я}} = 49$  см, допустимая частота вращения якоря  $n_{\text{max}} = 2230$  об/мин.

Эти положения приводят к выводу, что возможности выполнения тяговых электрических машин на постоянном токе достигли предела как по габаритам машин, так и по условиям коммутации. Переход на переменный ток стал реальной необходимостью. Общепринятая система постоянного тока была выбрана ввиду наибольшего соответствия характеристик двигателя постоян-

ного тока последовательного возбуждения требованиям тяговой характеристики тепловоза и простоты автоматического регулирования напряжения генератора постоянного тока независимого возбуждения. Однако таковы же и возможности регулирования напряжения синхронного генератора.

Тяговый двигатель постоянного тока является наименее надежным звеном энергетической цепи тепловоза вследствие коммутационной и механической напряженности, приводящей к частым неисправностям щеточного аппарата, коллектора и как следствие этого обмотки якоря.

Наиболее надежным может быть асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Этот двигатель долго не получал применения в локомотивной тяге ввиду несоответствия его характеристики режиму тяговой нагрузки. Возможность видоизменять характеристику асинхронного двигателя по требуемому закону доказана давно [3, 7]. Практическому осуществлению препятствовала сложность и громоздкость машинного оборудования для регулирования напряжения и частоты тока, питающего двигатель, что необходимо для получения требуемого вида характеристики. Современный уровень полупроводниковой техники (см. гл. 6 и 7) позволяет создавать системы регулирования, которые по габаритам и массе удовлетворяют условиям размещения на локомотиве.

При одинаковом использовании магнитных и электрических материалов размеры машин переменного тока меньше, так как допустима более высокая частота вращения ротора. Уменьшение размеров машины и ее массы обусловлено также отсутствием коллектора. Особенно значительно это уменьшение для короткозамкнутого асинхронного двигателя, не имеющего колец.

Общая компоновка машин переменного тока в основном определяется, как и машин постоянного тока, наличием подвижных и вращающихся частей, но роли этих частей различаются, чем обусловлено и различие в их названии. В машинах переменного тока основные неподвижные и подвижные элементы называются не полюсы и якорь, а статор и ротор, т. е. не по роли, а по признаку неподвижности или вращения.

Это обусловлено тем, что в машинах постоянного тока поле возбуждения всегда неподвижно и создается полюсами, размещенными в станине, а в машине переменного тока возбуждение может осуществляться как на статоре, так и на роторе, за исключением асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, где обмотками статора создается вращающееся поле, действием которого обусловлено вращение короткозамкнутого ротора.

В большинстве конструкций машин переменного тока обе ее активные части—ротор и статор—имеют зубчатую рабочую поверхность. Основными расчетными размерами являются внутренний диаметр статора  $D_i$  (диаметр расточки), определяемый так же, как диаметр якоря машины постоянного тока, и длина воздушного зазора  $l_6$ , являющаяся также длиной якоря.

## 8. МАШИННАЯ ПОСТОЯННАЯ. ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Машинная постоянная, называемая также постоянной Арнольда,

$$C_A = \frac{D^2 l n}{P} = \frac{6,1 \cdot 10^{11}}{\alpha k_B k_0 AB_\delta},$$

где  $D$  — диаметр якоря машины постоянного тока или расточки статора машины переменного тока;

$l$  — длина якоря, ротора, статора;

$\alpha$  — коэффициент полюсного перекрытия;

$k_B$  — коэффициент формы кривой поля; при синусоидальном поле 1,11;

$k_o$  — обмоточный коэффициент. Для машин постоянного тока  $k_b k_o = 1$ ;

$A$  — линейная плотность тока;

$B_\delta$  — индукция в воздушном зазоре.

Расчетная мощность машины

$$P_{тд} = mEI \cdot 10^{-3},$$

где  $m$  — число фаз;

$E$  — э. д. с. машины,  $E = k_U U_n$ ;

$I$  — ток машины,  $I = k_I I_n$ .

$U_n$  и  $I_n$  — номинальные значения тока и напряжения.

Для генераторов постоянного тока:  $k_U k_I = 1,03 \div 1,10$ , а для электродвигателей  $k_U k_I = 0,90 \div 0,97$ . Мощность синхронных генераторов:

$$P = mEI_n \cdot 10^{-3} = m k_E U_n I_n \cdot 10^{-3} = \frac{k_E P_n}{\cos \varphi},$$

где  $k_E$  — коэффициент, зависящий от заданного  $\cos \varphi$  и от индуктивного сопротивления рассеяния (например, при  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $k_E = 1,08$ );

$P_n$  — заданная номинальная мощность. Если  $P_n$  задана в кВА, то  $P = k_E P_n$ .

Для асинхронных двигателей

$$P = \frac{k_E P_n}{\cos \varphi \eta_n}; \quad P = \frac{k_E P_n}{\eta_n},$$

где  $\eta_n$  — к. п. д. двигателя;

$k_E = 0,98 \div 0,93$ .

Коэффициенты  $k_E$  и  $\eta_n$  определяют по графикам и таблицам, где их значения даны в зависимости от  $\cos \varphi$  [2, 4].

Машина постоянная  $C_A$  позволяет определить приведенный объем якоря машины  $D^2 l$ , а при определенных сочетаниях основных размеров  $D$  и  $l$  каждый из этих размеров в отдельности. Например, для тепловозных генераторов постоянного тока  $D/l \approx 1,8 \div 2,2$ ; для тяговых двигателей постоянного тока  $D_{я}/l_{я} = 1,1 \div 1,2$ ; для машин переменного тока  $D_i/l_{я} = 0,7 \div 0,75$ . При уточнении размеров необходимо руководствоваться соображениями рационального использования материалов.

Сердечник якоря машин изготавливают из листовой электротехнической стали. Размеры листов стандартизованы; следовательно, нужно так выбирать  $D$ , чтобы листы сердечника могли быть изготовлены с наименьшими отходами. Наибольшая ширина листа 1000 мм. С учетом раскроя  $D_{\max} = 990$  мм.

Для машины постоянного тока это диаметр якоря  $D_{я}$ , для машины переменного тока — внешний диаметр пакета статора  $D_c = kD$  (где  $D$  — диаметр расточки статора;  $k$  — зависит от числа полюсов  $p$  машины:  $k \approx 1,35$  при  $2p = 8$ ;  $k = 1,4$  при  $2p = 6$ ;  $k \approx 1,90$  при  $2p = 4$ ).

Может быть использовано также и выражение  $D_c = D + (0,8 \div 0,9) \tau$ . Если требуемая величина  $D_c$  или  $D_{я}$  превышает 99 см, сердечник собирается из сегментов.

## 9. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЯГОВЫХ МАШИН

Электромагнитный расчет для машин постоянного тока рекомендуется начинать с обмотки якоря, его пазов и коллектора, а затем, определив воздушный зазор, производить расчет магнитной цепи; рассчитать полюсы, станину, параметры обмотки возбуждения и т. д.

Для машин переменного тока следует начинать расчет со статора — рассчитать его обмотки и полюсы, а затем, выбрав воздушный зазор, проектировать ротор, т. е. рассчитывать его обмотки и магнитопровод. Значения индук-

ции в стальных частях машин постоянного и переменного тока примерно одинаковы:

| Участок магнитной цепи                   | Индукция, Тл |
|------------------------------------------|--------------|
| Воздушный зазор                          | 0,75—1,0     |
| Зубцы статора (в наиболее узком сечении) | 1,5—2,0      |
| Зубцы ротора (в наиболее узком сечении)  | 1,6—2,2      |
| Ярмо статора                             | 1,0—1,5      |
| Ярмо ротора                              | 1,0—1,6      |

**Магнитная цепь машин.** Картина распределения магнитного поля в электрической машине в пределах ее сектора  $AOB$  (рис. 51) для всех секторов одинакова. Для определения магнитодвижущей силы (м. д. с.), создающей магнитный поток, достаточно ограничиться расчетом магнитного поля в пределах одного сектора. Искомая м. д. с.  $\Sigma F$  для любого замкнутого контура магнитной силовой линии определяется равенством

$$\oint Hdl = \Sigma F, \quad (4)$$

где  $H$  — напряженность поля в направлении  $dl$ .

При расчете выбирается контур, проходящий через минимальный воздушный зазор машины. Интеграл заменяется суммой  $\Sigma H_i l_i$ , а отдельные участки магнитной цепи длиной  $l_i$  выбираются таким образом, чтобы  $H_1, H_2, \dots, H_n$  вдоль этих участков можно было считать приблизительно постоянными. При этом равенство (4) заменяется равенством

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = \Sigma F. \quad (5)$$

Левая часть его представляет собой сумму магнитодвижущих сил, измеряемых в амперах. Равенство (5) можно написать в следующем виде:

$$F_1 + F_2 + \dots + F_n = \Sigma F; \quad \Sigma F_i = \Sigma F.$$

Здесь  $F_i = H_i l_i$ , т. е.  $F_i$  равно м. д. с. какого-либо участка магнитной цепи ( $i = 2, 3, \dots, n$ ).

Магнитная цепь электрической машины разделяется на следующие участки: воздушный зазор; зубцы (или полюс) ротора; ярмо ротора; зубцы (или полюс) статора; ярмо статора.

Расчет м. д. с.  $\Sigma F$  производится в таком порядке: по э. д. с., которая должна наводиться в обмотке якоря, находится магнитный поток  $\Phi$ ; по размерам машины определяется площадь  $S_i$  для каждого участка магнитной цепи; затем вычисляется индукция в каждом участке

$$B_i = \frac{\Phi}{S_i}$$

по значению  $B_i$ ; пользуясь кривыми или таблицами [2] намагничивания для соответствующего материала, находят  $H_i$  и  $H_i l_i$ ; наконец, просуммировав магнитные напряжения всех участков, получают м. д. с.  $\Sigma F$ . Наибольшая м. д. с. при холостом ходе и магнитном потоке, соответствующем  $E = U_n$ , приходится обычно на воздушный зазор — 60—90%  $\Sigma F$ .

**Магнитодвижущая сила воздушного зазора** при гладком якоре пропорциональна индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  и длине  $\delta$ . В рассматриваемом замкнутом контуре магнитной линии воздушный зазор встречается 2 раза, но расчет удобно вести на один полюс

$$F_\delta = H_\delta \delta = 0,8 B_\delta \delta_p;$$

здесь

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}; \quad \mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6}.$$

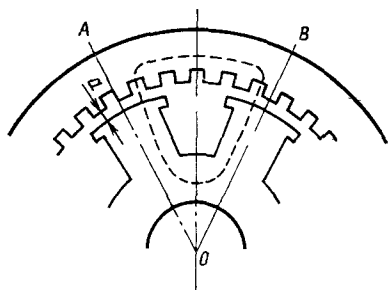


Рис. 51. Магнитная цепь электрической машины

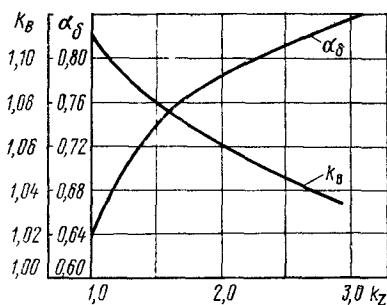


Рис. 52. Кривые к расчету асинхронных машин

Значение  $B_\delta$  при расчете по номинальному режиму для тяговых машин тепловоза принимается 0,75—0,9 Тл.

Для машин постоянного тока небольшой мощности, так же как для машин с компенсационной обмоткой, воздушный зазор под полюсом иногда делается равномерным. В этом случае можно приближенно принять  $\delta_p = \delta$ . Для тяговых машин постоянного тока без компенсационной обмотки обычно выбирается «эксцентричный» зазор с целью снизить максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами.

Расчетный зазор

$$\delta_p \approx \delta + \frac{1}{6} (\delta_m - \delta),$$

где  $\delta$  — зазор под серединой полюсного наконечника и  $\delta_m$  — зазор под его краями.

Для асинхронных машин нормального исполнения кривая поля в воздушном зазоре вследствие насыщения стальных участков магнитной цепи отличается от синусоиды, делаясь уплощенной. Поэтому коэффициент  $\alpha_\delta$ , называемый также коэффициентом уплощения, получается больше, чем  $2/\pi$ , что мы имели бы для синусоиды.

Уплощение кривой поля, а следовательно, и значение  $\alpha_\delta$  зависят главным образом от насыщения зубцов статора и ротора:  $\alpha$  тем больше, чем больше коэффициент насыщения зубцов (рис. 52):

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta},$$

где  $F_\delta$  — м. д. с. воздушного зазора;

$F_{z1}$  и  $F_{z2}$  — м. д. с. зубцов статора и зубцов ротора.

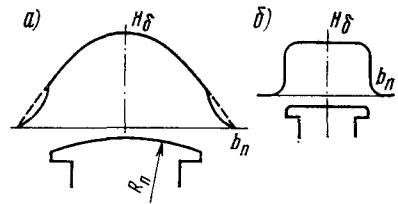
На рис. 53 значения  $\alpha_\delta$  определены по кривым полей, построенным для большого числа асинхронных машин. На том же рисунке представлена кривая  $k_B = f(k_z)$ . Значения коэффициента  $k_B$  используются при определении  $\Phi$ . Расчетная длина якоря (статора)  $l_\delta$  может быть принята равной длине пакетов якоря при  $\delta < 1,5$  мм

$$l_\delta = l_1 - n_B b'_B.$$

Если  $\delta > 1,5$  мм, то  $l_\delta = l_1 - n_B b'_B$ , где  $b'_B$  имеет следующие значения:

| $\delta$ , мм            | 1,5  | 1,75 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,77 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $b'_B$ при $b_B = 10$ мм | 7,4  | 7,1  | 6,8  | 6,3  | 5,8  | 5,5  | 5,1  |
| $b'_B$ при $b_B = 15$ мм | 12,4 | 12,0 | 11,7 | 11,0 | 10,4 | 9,8  | 9,3  |

Рис. 53. Полюсный наконечник для:  
 а — синусоидальной кривой поля; б — прямоугольной кривой поля



Для явнополусных синхронных машин форма кривой поля зависит от формы очертания полюсного наконечника, длины полюсной дуги, отношения зазора к полюсному делению  $\delta/\tau$  и в небольшой степени от насыщения стали, так как воздушный зазор в этих машинах берется относительно большой. Длину полюсной дуги принимают  $(0,55 \div 0,75) \tau$ , причем меньшие значения обычно берут для небольших диаметров и чисел полюсов. Это объясняется необходимостью уменьшить высоту полюсного наконечника в его средней части, которая, например при  $2p = 4$ , сильно зависит от отношения  $b_{\text{п}}/\tau$ .

Форма очертания полюсного наконечника (рис. 53, а) соответствует приблизительно синусоидальной кривой поля в пределах полюсной дуги. Очертание полюсного наконечника выбирается по дуге радиуса  $R_{\text{п}}$ , который можно вычислить по формуле

$$R_{\text{п}} = \frac{D}{2 + \frac{8D(\delta_{\text{м}} - \delta)}{b_{\text{п}}^2}},$$

где  $D$  — внутренний диаметр статора;

$\delta_{\text{м}}$  — воздушный зазор под краями полюсного наконечника. Для нормальных синхронных машин обычно выбирается  $\delta_{\text{м}} = (1,5 \div 2,0) \delta$ , что дает кривую поля, достаточно близкую к синусоиде;

$b_{\text{п}}$  — длина полюсной дуги.

Полюсные наконечники (рис. 53, б), при которых получается приблизительно прямоугольная кривая поля, применяются сравнительно редко и только для небольших машин ( $< 50$  кВА). Расчетная длина  $l_{\delta}$  для синхронной машины определяется так же, как для машины постоянного тока.

При зубчатом якоре магнитная проводимость воздушного зазора распределяется неравномерно: над зубцом она больше, чем над пазом,  $\delta' = k_{\delta} \delta$ , где  $k_{\delta} > 1$ . Коэффициент  $k_{\delta}$  называется коэффициентом воздушного зазора (или коэффициентом Картера)

$$k_{\delta} = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta},$$

где  $t_1$  — зубцовое деление по окружности якоря;

$b_{z1}$  — ширина коронки зубца.

Если пазы имеются на роторе и статоре: машины постоянного тока с компенсационной обмоткой, асинхронные машины, синхронные машины с вспомогательной обмоткой, то коэффициент воздушного зазора

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2},$$

где

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta}; \quad k_{\delta 2} = \frac{t_2 + 10\delta}{b_{z2} + 10\delta}.$$

Таким образом, м. д. с. воздушного зазора

$$F_{\delta} = 0,8 B_{\delta} k_{\delta} \delta A.$$

Магнитодвижущая сила зубцов

$$F_z = h_z H_z,$$

где  $h_z$  — высота зубца в радиальном направлении;

$H_z$  — расчетная напряженность поля, определение которой указано.  
На зубцовое деление приходится поток

$$\Phi_t = B_\delta l_\delta t_z.$$

По отношению к этому потоку зубец и паз включены параллельно. Так как магнитная проводимость стали во много раз больше, чем воздуха, то большая часть потока  $\Phi_t$  проходит через зубец. Если  $b_{zx}$  обозначает ширину зубца, соответствующую диаметру  $D_x$ , то активная площадь зубца  $S_{zx} = k_c l b_{zx}$  (где  $k_c$  — коэффициент заполнения пакета сталью;  $l$  — длина якоря без вентиляционных каналов).

Для машин с пазами, имеющими параллельные стенки, ширина зубца изменяется вместе с диаметром окружности  $D_x$ . Если на окружности якоря расположено  $z$  пазов, то

$$t_{zx} = \frac{\pi D_x}{z} \text{ и } b_{zx} = t_{zx} - b_\Pi.$$

Расчетная индукция в зубце

$$B'_{zx} = \frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{B_\delta l_\delta t_z}{k l b_{zx}}.$$

При  $B'_{zx} \leq 1,8$  Тл можно считать, что поток  $\Phi_t$  проходит только через зубец. В этом случае действительная индукция в зубце  $B_{zx}$  принимается равной  $B'_{zx}$ . При  $B'_{zx} > 1,8$  Тл следует учитывать, что через зубец проходит только часть потока  $\Phi_t$  и действительная индукция в зубце  $B_{zx}$  будет меньше, чем  $B'_{zx}$ .

Ответвление потока в паз учитывается коэффициентом

$$k_{zx} = \frac{S_\Pi}{S_{zx}} = \frac{b_\Pi l_\delta}{k_c l b_{zx}}.$$

При практических расчетах обычно пользуются кривыми, выражающими зависимость  $B'_{zx}$  от  $H_{zx}$  при различных значениях  $k_{zx}$ . Для прямоугольных открытых пазов с параллельными стенками при  $B'_{z\max} \leq 2,1$  Тл достаточно при практических расчетах найти напряженность поля на  $1/3$  высоты зубца, считая от его наиболее узкого сечения, и принять  $H_z = H_{z\frac{1}{3}}$ .

Для машин, имеющих пазы на статоре и роторе, необходимо найти магнитные напряжения  $F_{z1}$  и  $F_{z2}$  зубцов статора и ротора. Размеры, по которым определяются расчетные значения  $h_z$  и  $H_z$ , зависят от формы пазов. В руководствах к расчету машин можно найти выражения расчетной ширины зубца при пазах различной формы [2, 4].

При двойной клетке на роторе рассчитывают частичные магнитные напряжения верхней  $F_{zv}$  и нижней  $F_{zn}$  частей зубцов. Их сумма принимается равной полной м. д. с. зубцов ротора  $F_z = F_{zv} + F_{zn}$ .

**Магнитодвижущая сила полюсов.** Поток  $\Phi_m$  в сердечнике полюса больше потока  $\Phi$  в воздушном зазоре на значение потока рассеяния полюсов  $\Phi_\sigma$ :

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \sigma \Phi,$$

где  $\sigma$  — коэффициент рассеяния полюсов.

Так как поток по высоте полюса изменяется незначительно, то можно расчетную индукцию в полюсе принять

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} = \frac{\sigma\Phi}{S_m},$$

где  $S_m$  — активная площадь полюсного сердечника.

Если  $b_m$  обозначает ширину полюсного сердечника;  $l_m$  — его длину по оси, то активная площадь полюса  $S_m = k_c b_m l_m$ . Коэффициент заполнения сталью  $k_c$  при полюсах, собранных из листов, можно принять равным 0,95—0,97.

Определив для  $B_m$  по кривой (или таблице) намагничивания напряженность  $H_m$ , находят м. д. с. полюсов (на один полюс)  $F_m = H_m L_m$  (где  $L_m$  — высота полюса).

Поток в ярме статора равен  $0,5\sigma\Phi$ . При расположении полюсов на роторе следует брать  $\sigma = 1$ , а при расположении на статоре — таким же, как и для полюсов. В расчет вводится среднее значение индукции в среднем сечении ярма статора, т. е.

$$B_c = \frac{\sigma\Phi}{2S_c},$$

где  $S_c$  — активная площадь ярма статора.

При обычной конструкции явнополюсной синхронной машины (при расположении полюсов на роторе), а также для асинхронных машин

$$S_c = h_c l k_c.$$

Высота ярма статора

$$h_c = \frac{D_a - D}{2} - h_{z1} - \frac{2}{3} m_{a1} d_{a1},$$

где  $D_a$  и  $D$  — внешний и внутренний диаметры статора;

$h_{z1}$  — высота зубцового слоя статора;

$m_{a1}$  — число рядов осевых вентиляционных каналов по высоте ярма (обычно  $m_{a1} = 1$ );

$d_{a1}$  — диаметр круглого канала.

При отсутствии осевых каналов последнее слагаемое равно нулю. Площадь  $S_c$  для машины, имеющей полюсы на статоре, определяется по геометрическим размерам ярма статора.

Найдя для  $B_c$  по кривой (или таблице) намагничивания напряженность поля  $H_c$ , определяют м. д. с. ярма статора (на полюс)  $F_c = \xi H_c l_c$ .

Средняя длина индукционных линий в ярме

$$l_c \approx \frac{\pi (D_a - h_c)}{2p}.$$

Коэффициент  $\xi$  учитывает, что индукция вдоль линии  $l_c$  не остается постоянной: она имеет наибольшее значение в сечении ярма, соответствующем  $0,5l_c$ , и уменьшается в обоих направлениях от этого сечения. При расположении полюсов на статоре принимается  $\xi = 1$ , а на роторе  $\xi$  рекомендуется брать по кривой (рис. 54). При расчете м. д. с. ярма статора синхронной машины поток в ярме статора принимается равным  $\Phi/2$ , т. е. половине потока в воздушном зазоре. Значение  $\xi$  при этом также рекомендуется брать по рис. 55.

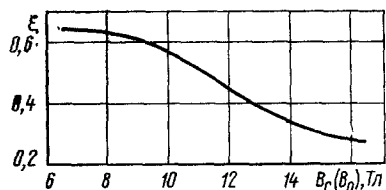


Рис. 54. Определение магнитного напряжения ярма статора или ротора

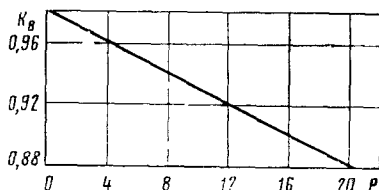


Рис. 55. Значение  $k_a$  в зависимости от числа пар полюсов  $p$  для нормальных асинхронных двигателей

Поток в ярме ротора равен  $0,5\sigma\Phi$ , причем при расположении полюсов на статоре следует принять  $\sigma = 1$ . Среднее значение индукции в среднем (по длине  $l_p$ ) сечении ярма ротора

$$B_p = \frac{\sigma\Phi}{2S_p},$$

где  $S_p$  — активная площадь ярма ротора.

Для обычной синхронной машины  $S_p$  определяется по размерам ярма. Для машин постоянного тока и асинхронных  $S_p = h_p l k_c$ . Высота ярма ротора

$$h_p = \frac{D' - D'_a}{2} - h_{z2} - \frac{2}{3} m_{a2} d_{a2},$$

здесь  $D'$

и  $D'_a$  — внешний и внутренний диаметры ротора;

$h_{z2}$  — высота зубцового слоя ротора;

$m_{a2}$  — число рядов осевых вентиляционных каналов по высоте ярма (обычно  $m_{a2} = 1$ );

$d_{a2}$  — диаметр канала.

Магнитодвижущая сила ротора  $F_p = \xi H_p l_p$ . При расположении полюсов на роторе и для машин постоянного тока  $\xi = 1$ ; для асинхронных машин при  $2p > 2$  следует  $\xi$  брать по рис. 54. Средняя длина индукционных линий  $l_p$  определяется по чертежу или (для асинхронных машин при  $2p > 2$  и машин постоянного тока) по формуле

$$l_p = \frac{\pi (D'_a + h_p)}{2p}.$$

Для асинхронных машин с посадкой пакетов ротора непосредственно на вал высоту ярма ротора следует рассчитывать по формуле

$$h_p = \frac{D' - D'_a + \frac{1}{6} D'_a}{2} - h_{z2} - \frac{2}{3} m_{a2} d_{a2}.$$

Здесь учитывается, что часть магнитного потока проходит и по валу, так как при малой частоте перемагничивания ( $f_2 = S f_1$  при  $S \approx 0,10 \div 0,05$ ) глубиной проникновения поля в массивный вал не следует пренебрегать. Для асинхронных машин при  $2p = 2$  расчет магнитного напряжения производится в таком порядке.

Определив индукцию в части ярма ротора, не имеющей аксиальных вентиляционных отверстий,

$$B'_p = \frac{\Phi}{2S'_p},$$

где  $S'_p = h'k_c l$  при  $h'_p = \frac{D'}{2} - h_{z2} - m_{a2} d_{a2}$ , и длину пути потока в этой части ярма ротора  $L'_p = h'_p$ , вычисляем соответствующую м. д. с.  $F'_p = H'_p L'_p$  (где  $H'_p$  должно быть взято для  $B'_p$ ). Затем находят индукцию в части ярма ротора с аксиальными вентиляционными отверстиями

$$B''_p = \frac{\bar{\Phi}''}{2S''_p},$$

$$\text{где } \bar{\Phi}'' = \Phi \frac{D_{B2}^* - d_{a2}}{2h'_p}; S''_p = 0,5 \left( \frac{\pi D_{B2} - n_{a2} d_{a2}}{2} \right) l k_c$$

( $n_{a2}$  — число отверстий в одном ряду).

Длина пути потока в этой части ярма ротора  $L_p^* = 2d_{a2}$ ; соответствующая м. д. с.  $F_p^* = H_p^* L_p^*$ , где  $H_p^*$  берется для  $B_p^*$ .

Далее находят полную м. д. с. ярма ротора (на один полюс)  $F'_p = F'_p + F_p^*$ . При отсутствии аксиальных вентиляционных каналов принимают  $m_{a2} d_{a2} = 0$  и  $F_p = F'_p$ .

**Характеристика холостого хода.** Суммирование м. д. с. отдельных участков магнитной цепи дает м. д. с. полного обхода или магнитодвижущую силу возбуждения на один полюс; например, для явнополюсной машины  $\Sigma F = I_b \omega_b$ , где  $I_b$  — ток возбуждения;  $\omega_b$  — число витков обмотки возбуждения на один полюс.

Магнитодвижущую силу  $\Sigma F$  рассчитывают для определенного потока. Если определить  $\Sigma F$  для различных значений потока  $\Phi$  и нанести этот поток как функцию  $\Sigma F$ , то получится магнитная характеристика  $\Phi = f(\Sigma F)$ . Так как э. д. с. машины при постоянной частоте вращения пропорциональна потоку  $\Phi$ , то кривая  $\Phi = f(\Sigma F)$  при других масштабах дает также характеристику холостого хода:  $E = f(I_b)$ . Для *машин постоянного тока* э. д. с. якоря

$$E = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi, \quad (6)$$

где  $N$  — общее число проводников;

$a$  — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  
или при заданной э. д. с. расчетный поток

$$\Phi = \frac{E}{\frac{pn}{60} \frac{N}{a}}.$$

Обычно для *асинхронной машины* нет необходимости рассчитывать всю характеристику холостого хода, а достаточно определить только одну ее точку, а именно точку, соответствующую холостому ходу при номинальном напряжении. Электродвижущая сила, наведенная в обмотке статора,

$$E_1 = 4k_b f_1 \omega_1 k_{01} \Phi. \quad (7)$$

Значения коэффициента формы кривой поля  $k_b$  в зависимости от  $k_z$  приведены на рис. 53. Для асинхронных машин нормального исполнения коэффициент насыщения зубцов  $k_z = 1,15 \div 1,5$ . Значения обмоточных коэффициентов трехфазных обмоток для первой гармоники э. д. с. могут быть взяты из таблиц и кривых [2].

Для асинхронных двигателей можно принять, что э. д. с.  $E_1$  при холостом ходе меньше напряжения на зажимах  $U_1$  на значение падения напряжения в

\* При наличии нескольких рядов отверстий расчеты должны быть произведены для каждого ряда при соответствующем диаметре  $D_{B2}$ .

индуктивном сопротивлении рассеяния первичной обмотки  $I_\mu x_1$ , где  $I_\mu$  — намагничивающий ток (приблизительно равен току холостого хода). Следовательно,

$$E_1 = U_1 - I_\mu x_1 = \left(1 - \frac{I_\mu x_1}{U_1}\right) U_1 = k_E U_1.$$

Для нормальных машин при  $P_n > 10$  кВт значения  $k_E$  в зависимости от числа пар полюсов можно брать по кривой на рис. 55.

Расчетное значение потока

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4k_B f_1 \omega_1 k_{01}}.$$

В первом приближении можно принять  $k_B = 1,09 \div 1,12$ :

$$\Sigma F = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_p + F_c.$$

Для  $\Sigma F$  определяется намагничивающий ток  $I_\mu$  по соотношению

$$I_\mu = \frac{2p\Sigma F}{0,9k_{01}m_1\omega_1}.$$

Магнитный поток *явнополюсной синхронной машины* рассчитывается по формуле

$$\Phi = \frac{E_o}{4k_B f \omega k_o},$$

где  $E_o$  — э. д. с., наведенная в обмотке якоря;

$k_B$  — коэффициент формы кривой поля;

$k_B = 1,08 \div 1,20$ ;

$k_o$  — обмоточный коэффициент для первой гармоники, определяемый так же, как для асинхронной машины.

Для потока  $\Phi$  находят м. д. с. воздушного зазора, зубцов и ярма якоря. Для определения м. д. с. полюсов и их ярма нужно взять поток  $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \sigma\Phi$ . Вначале вычисляют  $F_\sigma + F_z + F_c$ , где  $F_c$  — м. д. с. статора, если полюсы расположены на роторе; в противном случае вместо  $F_c$  нужно взять  $F_p$ . Затем рассчитывают поток рассеяния  $\Phi_\sigma$  и для потока  $\Phi + \Phi_\sigma$  — магнитодвижущие силы  $F_m$  и  $F_p$  (или  $F_m$  и  $F_c$ ). При наличии успокоительной системы необходимо найти м. д. с. зубцового слоя полюсов  $F_{zn}$ . Для больших синхронных машин нужно также учитывать  $F_{\delta m}$  зазоров в стыках полюсных сердечников с ярмом ротора. М. д. с. магнитной цепи

$$F_\delta + F_z + F_c + F_{zn} + F_m + F_p + F_{\delta m} = \Sigma F = I_B \omega_B.$$

Для получения нагрузочных характеристик, т. е. зависимости э. д. с. от м. д. с.  $\Sigma F$  при нагрузке машины, удобно выражать характеристику холостого хода, как  $E = f(\Sigma F)$ .

Э. д. с. машин постоянного и переменного тока по формуле (6) имеют одно и то же физическое происхождение. Различия этих выражений обусловлены видом магнитного поля при наведении его постоянным или переменным током и соображениями удобства ввода в выражение э. д. с. тех или иных параметров машины.

Общее выражение э. д. с. в проводнике  $e_n = Blv$ , где  $B$  — расчетная индукция в воздушном зазоре;  $l$  — активная длина проводника;  $v$  — частота вращения проводника в магнитном поле или частота вращения поля (индуктора) относительно проводника.

**Э. д. с. машины.** При формулировке выражений э. д. с. машин удобно пользоваться геометрическим определением полюсной дуги  $\tau = \frac{\pi D_p}{2p}$ , фи-

зически представляющей зону действия пары полюсов. Обмотка якоря машины постоянного тока характеризуется числом параллельных ветвей  $2a$  и числом проводников обмотки якоря  $N$ . Э. д. с. машины равна э. д. с. одной параллельной ветви

$$E = e_n \frac{N}{2a} \text{ или } E = Blv \frac{N}{2a},$$

где  $v = \frac{\pi D_{\text{я}} n}{60}$ , или, вводя  $\tau = \frac{\pi D_{\text{я}}}{2p}$ , э. д. с. можно выразить, как

$$E = Bl \frac{p\tau n}{60a}.$$

Магнитный поток  $\Phi = BS$  или  $\Phi = Bl\tau$ . Выражение э. д. с. приобретает вид  $E = \frac{pN}{60a} \Phi n$ .

Обозначив произведение постоянных параметров машины через  $C_e = \frac{pN}{60a}$ , получим известное выражение э. д. с. машины постоянного тока  $E = C_e \Phi n$ .

Э. д. с. машины переменного тока характеризуется не только значением, но также еще частотой и формой. В практических расчетах полагают магнитное поле машины переменного тока, а значит, и ее э. д. с. синусоидальными (рис. 56). Действительная картина магнитного поля, представляющего собой периодическую функцию времени, характеризуется значением периода  $T$  или частотой  $f = \frac{1}{T}$ . При разложении периодической функции в гармонический ряд, как показано на рис. 56, а, получается сумма синусоид, представляющая гармонические составляющие нечетного порядка. Первая составляющая, период которой  $T$  равен периоду исходной периодической функции, принимается за расчетное выражение индукции, а значит, и э. д. с. (а также напряжения и тока) синусоидального переменного тока. Следующие гармонические составляющие имеют периоды: третья —  $T/3$  (рис. 56, б), пятая —  $T/5$  (рис. 56, в) и т. д. В обычных расчетах машин коэффициентом формы кривой поля учитывают третью и пятую составляющие. При некоторых исследованиях, например при рассмотрении процессов, обусловленных «частотным» регулированием асинхронных двигателей, учитывают и гармонические составляющие более высоких порядков [3, 7].

Ранее приведено выражение расчетного или «действующего» значения э. д. с. машины переменного тока. В это выражение входит и коэффициент «формы кривой поля» (э. д. с., напряжения, тока):

$$k_{\bullet} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Для машин переменного тока удобно преобразовать выражение частоты вращения якоря следующим образом:

$$v = \frac{\pi D_{\text{я}} n}{60} = \frac{2p\tau n}{60} = 2\tau f,$$

где  $f = pn/60$  частота (перемagnичивания, э. д. с., напряжения).

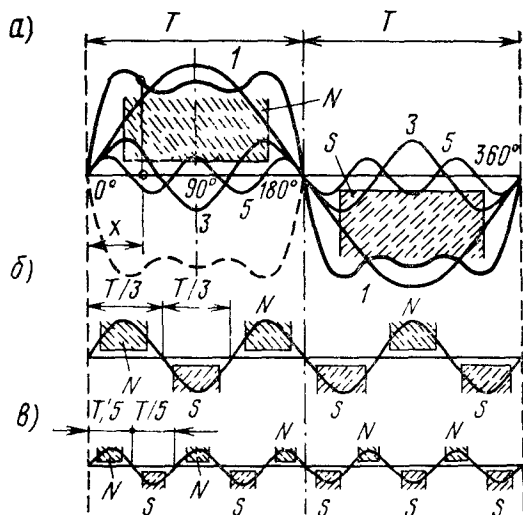


Рис. 56. Гармонические составляющие магнитного поля и э.д.с.

Выражение э. д. с. в проводнике приобретает вид  $e_n = k_e 2Blvf$ . Ранее напоминалось, что  $Blv = \Phi$ . Число проводников обмотки якоря машины переменного тока  $N_n = 2wm$ . Выражение э. д. с. машины переменного тока приобретает вид  $E = 2 \cdot 2\Phi wmf k_0 k_n$ . Во многих учебниках это выражение приводится в виде  $E = 4,44\Phi wmf k_0 k_n$ .

**Нагрузочные характеристики тяговых машин.** В гл. 1 рассмотрены «рабочие» или «выходные» характеристики тяговых машин. Для генератора — это его внешняя характеристика или зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки якоря  $U_r = f(I_r)$ . Для тягового двигателя «рабочими» являются характеристика  $n_{тд} = f(I)$  и характеристика момента на валу  $M_{тд} = f(I)$ .

Вид рабочих характеристик и их количественные параметры зависят от вида и параметров нагрузочных характеристик, на основании которых выделяют «естественные» рабочие характеристики машин [1, 12].

Нагрузочные характеристики представляют собой зависимости э. д. с. машины от суммарной намагничивающей силы  $E = f(\Sigma F)$  при различных значениях тока нагрузки якоря, действием которого обусловлено возникновение размагничивающей силы, так называемой *реакции якоря*. Существует несколько методов расчета нагрузочных характеристик при наличии характеристики холостого хода  $E_{xx} = f(\Sigma F)$  и при известных конструктивных параметрах машины. Наибольшее распространение имеют графические и графоаналитические методы.

Для машин постоянного тока — генератора и тяговых двигателей — заводом «Электротяжмаш» применяется метод А. Б. Иоффе [5]. Для синхронных генераторов следует рекомендовать метод Потье [2]. Для асинхронных двигателей нагрузочные характеристики не строят. Рабочие характеристики получают на основании характеристики холостого хода методом построения круговых диаграмм [2].

Методы Иоффе и Потье основаны на одном и том же приеме. Расчет сводится к определению «размагничивающей» силы реакции якоря при определенных значениях тока нагрузки его, следовательно, той дополнительной магнитодвижущей силы индуктора, при которой э. д. с. машины будет равна э. д. с. холостого хода. Примеры расчета нагрузочных характеристик машин постоянного тока и теоретические его обоснования приведены во всех учебниках и учебных пособиях по электрической передаче тепловоза [6, 12], а также в книгах по расчету и проектированию электрических машин [1, 2, 4, 5].

## 10. ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ МАШИН

Тяговые электрические машины должны удовлетворять соответствующим требованиям и нормам, установленным ГОСТ 2582—72, ведомственными техническими условиями (ТУ) и Правилами ремонта электрических машин тепловозов (ЦТ 3545, 1979). Для тяговых машин стандартом предусматриваются три вида испытаний — приемно-сдаточные, типовые и периодические.

Приемо-сдаточным испытаниям подвергается каждая машина, выпускаемая заводом-изготовителем или прошедшая ремонт для проверки номинальных данных машин, качества изготовления или ремонта, пригодности к эксплуатации и соответствия ТУ и ГОСТ. Типовые испытания проводятся при выпуске электрических машин новых типов, при изменении конструкции, материалов, технологического процесса изготовления, могущих повлиять на характеристику машин, и при освоении производства новым изготовителем для определения основных характеристик и проверки соответствия их расчетным данным и действующим ГОСТ. Периодические испытания серийных машин, находящихся в производстве, проводятся один раз в два года по программе ти-

повых. Программа приемо-сдаточных испытаний машины постоянного тока состоит из внешнего осмотра, измерения сопротивления обмоток, испытания на нагревание в течение 1 ч, проверки частоты вращения и реверсирования при номинальных значениях напряжения, токов нагрузки и возбуждения для электродвигателей, для тяговых генераторов — проверки напряжений, соответствующих продолжительному режиму при низшем и высшем напряжении, при номинальной частоте вращения, испытания на повышенную частоту вращения, проверки биения коллектора, коммутации, сопротивления и электрической прочности изоляции. Результаты испытаний фиксируются в протоколе, на основании которого составляется паспорт машины.

В программу типовых испытаний входят: все пункты приемо-сдаточных испытаний; определение тока, соответствующего превышению температуры при номинальном режиме работы (при этом токе проводят приемо-сдаточные испытания на нагревание); испытание на нагревание при продолжительной или соответственно при повторно-кратковременной мощности; построение сетки кривых нагревания и охлаждения тяговых электродвигателей и генераторов; снятие: а) скоростных характеристик при номинальной мощности двигателя (на характеристике наносится зависимость питающего напряжения от тока якоря) и для всех основных ступеней регулирования возбуждения электродвигателей; б) нагрузочных характеристик при разных токах нагрузки до 1,5 номинального тока для генераторов и для электродвигателей при токах якоря 0; 0,5; 1,0; 1,5 номинального; определение потерь, к. п. д. и зоны наилучшей коммутации; определение зависимости статического давления в камере со стороны входа воздуха в машину от количества продуваемого через машину воздуха; испытание на вибропрочность (допускается проверка по узлам); определение массы (допускается проверка по узлам). Примерно в таком же объеме проводятся испытания для тяговых синхронных генераторов.

При осмотре машины, поступившей на испытание, обязательно проверяют состояние коллектора, установку щеткодержателей, состояние и сопротивление изоляции, проворачивание якоря от руки и его разбег, положение траверсы щеткодержателя и исправность щеточного аппарата, заправку подшипников смазкой. На коллекторе не должно быть пластин с острыми кромками и заусенцами, грязи и остатков графита между пластинами, краски, масла и забойн. Биение коллекторов тяговых электродвигателей на нагретой машине не должно превышать 0,04 мм, а коллекторов и контактных колец тяговых генераторов — 0,06 мм.

*Испытание на холостом ходу.* Перед испытанием под нагрузкой сборку машины проверяют на холостом ходу. При этом оценивается работа подшипников и приработка щеток по коллектору. Для проверки тяговых электродвигателей в режиме холостого хода к выводам двигателей последовательного возбуждения  $Я$  и  $КК$  при соединенных  $ЯЯ$  и  $К$  подводится напряжение, равное  $1/8 \dots 1/10$  номинального значения, а генераторы приводятся во вращение от привода. Электродвигатели проверяют в течение 30 мин при 600 об/мин, тяговые генераторы при 500 об/мин, а вспомогательные машины при частоте вращения, равной 15—40% номинальной.

*Измерение омического сопротивления обмоток в холодном состоянии.* При измерении сопротивления в холодном состоянии  $r_x$  должны соблюдаться условия, обеспечивающие высокую точность замеров, так как от  $r_x$  зависит правильность определения рабочих характеристик машины. Обмотки находятся в холодном состоянии, если температура всех частей машины не отличается от окружающей более чем на  $3^\circ\text{C}$ .

Для измерения сопротивления обмоток используется метод сопротивления (вольтметра—амперметра), который при применении приборов класса 0,2; 0,5 обеспечивает высокую точность. Вольтметр, измеряющий падение напря-

жения, должен присоединяться непосредственно к выводам измеряемой обмотки. Цепь должна иметь минимальное количество контактов, а измерения производятся быстро во избежание нагрева обмотки под действием протекающего тока. Отсчеты должны сниматься одновременно по амперметру и вольтметру. Вольтметры к главным и добавочным полюсам присоединяются при помощи стационарных зажимов, а к обмотке якоря — специальных щупов, устанавливаемых на коллекторных пластинах, расположенных между щетками (на этих пластинах измеряется сопротивление в горячем состоянии). По снятым замерам на основании закона Ома определяется среднее значение сопротивления обмоток. Полученное сопротивление для сравнения с расчетным приводится к температуре 20° С по формуле

$$r_{20} = r_x [1 + \alpha (20 - t)],$$

где  $r_{20}$  — сопротивление при 20° С;

$t$  — температура, при которой производилось измерение, ° С;

$\alpha$  — температурный коэффициент, равный  $\frac{1}{235 + t}$ .

Сопротивление обмоток при температуре 20° С должно соответствовать расчетному с отклонением  $\pm 5\%$  для новых машин и  $\pm 10\%$  для отремонтированных.

**Испытание машин на нагревание.** Испытания на нагрев при приемосдаточных испытаниях производятся для определения превышения температуры (перегрева) обмоток, коллектора и подшипников над температурой охлаждающего воздуха при номинальном режиме работы. Испытания тяговых электрических машин под нагрузкой проводят методом взаимной нагрузки (возвратной работы). При этом методе две однотипные машины соединяют электрически и механически, одна машина работает в режиме генератора, а другая — двигателя (рис. 57). Для покрытия потерь обеих машин служат два генератора: вольтдобавочная машина ВДМ для компенсации электрических потерь, линейный генератор ЛГ — механических, магнитных и добавочных потерь. Докажем, что вольтдобавочная машина покрывает электрические потери.

Можно допустить, что  $I_{\text{тд}} \cong I_{\text{г}}$ , так как значение тока линейного генератора  $I_{\text{лг}}$  невелико. Таким образом,

$$\begin{aligned} U_{\text{аб}} &= U_{\text{г}} + U_{\text{вдм}}; \quad U_{\text{аб}} = E_{\text{г}} - I_{\text{г}}(R_{\text{яг}} + R_{\text{дпг}}) + U_{\text{вдм}}; \quad U_{\text{аб}} = U_{\text{тд}} + I_{\text{тд}}(R_{\text{втд}} + R_{\text{вг}}); \\ U_{\text{аб}} &= E_{\text{тд}} + I_{\text{тд}}(R_{\text{ятд}} + R_{\text{дптд}} + R_{\text{втд}} + R_{\text{вг}}); \quad E_{\text{г}} - I_{\text{г}}(R_{\text{яг}} + R_{\text{дпг}}) + \\ &+ U_{\text{вдм}} = E_{\text{тд}} + I_{\text{тд}}(R_{\text{ятд}} + R_{\text{дптд}} + R_{\text{втд}} + R_{\text{вг}}). \end{aligned}$$

Если  $E_{\text{дв}} \cong E_{\text{г}}$ , так как машины однотипны, то  $U_{\text{вдм}} = I_{\text{тд}}(\Sigma R_{\text{тд}} + \Sigma R_{\text{г}})$ ;  $U_{\text{вдм}} I_{\text{тд}} = I_{\text{тд}}^2(\Sigma R_{\text{дв}} + \Sigma R_{\text{г}})$ ;  $P_{\text{вдм}} = I_{\text{тд}}^2(\Sigma R_{\text{дв}} + \Sigma R_{\text{г}})$ , где  $I_{\text{тд}}$ ,  $U_{\text{тд}}$ ,  $E_{\text{тд}}$  — ток, напряжение и э. д. с. испытуемого электродвигателя;  $I_{\text{г}}$ ,  $U_{\text{г}}$ ,  $E_{\text{г}}$  — ток, напряжение и э. д. с. двигателя, работающего в режиме генератора;

$U_{\text{вдм}}$ ,  $P_{\text{вдм}}$  — напряжение и мощность вольтдобавочной машины;  $R_{\text{ятд}}$ ,  $R_{\text{дптд}}$ ,  $R_{\text{втд}}$  — сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов и главных полюсов двигателя и генератора.

Таким образом, вольтдобавочная машина покрывает электрические потери, а оставшиеся потери покрывает линейный генератор.

Осмотренную и проверенную машину устанавливают на стенд. При проведении испытаний на нагревание необходимо, чтобы отклонение стрелок приборов было в последней трети их шкал. При независимой вентиляции измеряют температуру и статическое давление охлаждающего воздуха. Количество продуваемого через машину воздуха определяют по статическому давлению в ка-

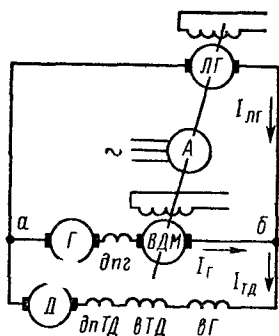


Рис. 57. Принципиальная схема испытания тяговых электродвигателей методом взаимной нагрузки:

ЛГ — линейный генератор; А — асинхронный приводной двигатель; ВДМ — вольтдобавочная машина; Г — тяговый электродвигатель, работающий в режиме генератора; Д — испытываемый тяговый электродвигатель; дпг — обмотки добавочных полюсов двигателя и генератора; втд, вг — обмотки главных полюсов (возбуждения) двигателя и генератора

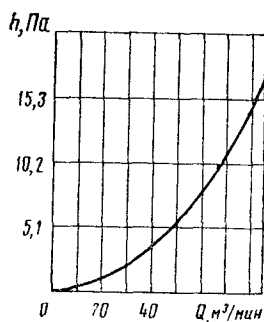


Рис. 58. Зависимость статического давления воздуха  $h$  от расхода  $Q$  для тягового электродвигателя ЭД-107

мере поступления воздуха U-образным манометром. Зависимость статического давления  $h$  от количества продуваемого через машину воздуха  $Q$  выражается опытной кривой (рис. 58), которая определяется для каждого типа машин при типовых испытаниях. Номинальное количество продуваемого через машину воздуха для тяговых машин, имеющих независимую вентиляцию, приведено в табл. 4.

В процессе испытания машины под нагрузкой должны подвергаться постоянному контролю: ток нагрузки, напряжение, частота вращения, температура подшипников, охлаждающего воздуха и неподвижных обмоток (методом сопротивления). Так как температура обмоток определяет долговечность изоляции, то приборы для измерений тока и напряжения при испытаниях на нагревание должны иметь высокий класс точности (0,2 или 0,5).

Превышение температуры обмоток над температурой охлаждающего воздуха (перегрев обмоток)  $\tau$  определяется по формуле

$$\tau = \frac{r_n - r_x}{r_x} (235 + t_x) + (t_n - t_v), \quad (8)$$

где  $r_n$  — сопротивление обмотки в нагретом состоянии;  
 $r_x$  — сопротивление обмотки в холодном состоянии;  
 $t_n$  — температура нагрева обмотки;  
 $t_x$  — температура, при которой измерено сопротивление  $r_x$ ;  
 $t_v$  — температура охлаждающего воздуха при измерении  $r_n$ .

В процессе испытания следят за постоянством нагрузки, частоты вращения, количества продуваемого через машину воздуха, производя замеры через каждые 10—15 мин и фиксируя измеренные величины в журнале. В момент окончания режима записывают показания приборов, и машины быстро останавливают.

Для определения температуры обмотки якоря после остановки машин якорь устанавливают (поворотом от руки) в такое положение, чтобы коллекторные пластины, на которых измерялось падение напряжения в холодном состоянии, были доступны для установки щупов амперметра и милливольтметра для определения падения напряжения нагретой обмотки якоря.

Практически первый замер сопротивления можно произвести через 30—45 с после остановки, поэтому для определения температуры обмотки якоря в момент окончания режима используется метод экстраполяции кривой остыв-

Таблица 4

| Тип                      | Тепловоз | Давление, Па | Подача воздуха м³/мин | Тип                | Тепловоз | Давление, Па | Подача воздуха, м³/мин |
|--------------------------|----------|--------------|-----------------------|--------------------|----------|--------------|------------------------|
| Тяговые электродвигатели |          |              |                       | Тяговые генераторы |          |              |                        |
| ДК-304Б                  | ТЭ1      | 3,6          | 25                    | ГП-311Б            | 2ТЭ10Л,  | 14,3         | 250                    |
|                          | ТЭ2      | 6,1          | 35                    |                    | 2ТЭ10В   |              |                        |
| ЭДТ-200Б                 | ТЭ3      | 4,9          | 55                    | ГС-501А            | 2ТЭ11Б   | 15,3         | 267                    |
| ЭД-107                   | 2ТЭ10Л   | 14,3         | 43                    | МПТ-99/47          | ТЭ3      | —            | 150*                   |
|                          |          |              |                       | МПТ-84/37          | ТЭ1, ТЭ2 | —            | 85**                   |

\* При  $\lambda_n=16$  — самовентилиция.\*\* При  $\lambda_n=8$  — самовентилиция.

вания на момент снятия нагрузки. Для этого в течение 5—8 мин определяют сопротивление обмотки якоря. Промежуток времени между измерениями в течение первых 3 мин не должен превышать 20 с, затем 30 с. По полученным данным строят кривую зависимости изменения сопротивления от времени, называемую *кривой остывания* (ГОСТ 11828—75). Полученное этим способом сопротивление обмотки якоря подставляют в формулу (8) и при известном значении  $r_x$  определяют превышение температуры обмотки в конце режима. Так же подсчитывают превышения температур обмоток главных и добавочных полюсов, результаты сравнивают с предельно допустимыми превышениями температур частей тяговых электрических машин по отношению к температуре охлаждающего воздуха (табл. 5; ГОСТ 2582—72). Тяговые генераторы и тяговые электродвигатели разрешается испытывать без подачи охлаждающего воздуха при открытых люках в течение 1 ч при номинальном токе и напряжении, обеспечивающем превышение температуры, соответствующее превышению температуры при номинальном режиме.

Таблица 5

| Класс изоляции | Режим работы                                                        | Части электрической машины | Метод измерения температуры | Допустимое превышение температуры °С не более |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|
| В              | Продолжительный, повторно-кратковременный, часовой, кратковременный | Обмотки якоря              | Сопротивления               | 120                                           |
|                |                                                                     | Обмотки возбуждения        | Сопротивления               | 130                                           |
|                |                                                                     | Коллектор                  | Термометра                  | 95                                            |
| F              | Продолжительный, повторно-кратковременный, часовой, кратковременный | Обмотки якоря              | Сопротивления               | 140                                           |
|                |                                                                     | Обмотки возбуждения        | Сопротивления               | 155                                           |
|                |                                                                     | Коллектор                  | Термометра                  | 95                                            |
| H              | Продолжительный, повторно-кратковременный, часовой, кратковременный | Обмотки якоря              | Сопротивления               | 160                                           |
|                |                                                                     | Обмотки возбуждения        | Сопротивления               | 180                                           |
|                |                                                                     | Коллектор                  | Термометра                  | 105                                           |

Тяговые генераторы допускается испытывать методом короткого замыкания. Режимы испытаний указаны в правилах ремонта электрических машин тепловозов.

*Испытания на проверку отклонения частоты вращения.* Эти испытания проводятся после испытания на нагревание, так как частота вращения машин постоянного тока зависит от сопротивления обмоток. Допустимые отклонения частоты вращения электродвигателей постоянного тока в точке, соответствующей номинальному режиму, от частоты вращения, установленной при типовых испытаниях, не более  $\pm 3\%$ . У двигателей, предназначенных для вращения в обе стороны, разность между частотами вращения в одну и другую стороны, выраженную в процентах от среднего арифметического обеих частот вращения, должна составлять не более 4%.

*Испытание на повышенную частоту вращения.* Этот вид испытаний проводится при холостом ходе нагретой электрической машины в течение 2 мин при частоте вращения, превышающей на 25% максимальную частоту вращения для тяговых электродвигателей и на 20% — для тяговых генераторов.

После испытаний в машине не должно быть каких-либо изменений, которые могут отразиться на ее нормальной работе. При испытаниях необходимо соблюдать большую осторожность, чтобы не допустить превышения частоты вращения свыше установленной, так как это может привести к аварии.

*Проверка коммутации.* При наиболее тяжелых режимах для установления класса искрения и определения пригодности машины в эксплуатации проверяют ее коммутацию. Оценка качества коммутации производится по степени искрения под сбегавшим краем щетки. ГОСТ 183—74 устанавливает пять классов коммутации:

- 1 — искрение отсутствует;
- 1  $\frac{1}{4}$  — слабое точечное искрение под небольшой частью щетки, приблизительно у одной четверти щеток;
- 1  $\frac{1}{2}$  — слабое искрение под большей частью щетки примерно у половины щеток;
- 2 — искрение под всем краем щетки;
- 3 — значительное искрение под всем краем щетки с крупными вылетающими искрами.

Для тепловозных машин допустимыми классами коммутации являются 1 ... 1  $\frac{1}{2}$ .

Коммутацию тягового генератора при приемо-сдаточных испытаниях проверяют в течение 1 мин при номинальной частоте вращения (последняя позиция контроллера машиниста) на двух режимах: при максимальном токе и напряжении, соответствующем этому току, и при максимальном напряжении. Коммутацию тяговых электродвигателей проверяют в двух направлениях вращения в течение 30 с при двойном номинальном токе, соответствующем по характеристике генератора напряжению и при максимальных напряжениях и частоте вращения и минимальном токе возбуждения. Машина считается выдержавшей испытания, если не произошло остаточных деформаций или механических повреждений коллектора и щеткодержателей или кругового огня. Коллектор должен быть пригоден к работе без очистки или какого-либо исправления.

В случае повышенного искрения проверяют равномерность нажатия пружины щеткодержателей, тщательность приработки щеток к коллектору и правильность установки их, состояние поверхности коллектора, плотность контактов в подводящих и соединительных контактах, биение коллектора, правильность чередования щеткодержателей по коллектору и установки добавочных полюсов. На тяговых генераторах проверяют расположение щеток на нейтрали. Если устранение отмеченных дефектов не улучшит коммутацию,

определяют зону безыскровой работы машины способом положительной и отрицательной подпитки (отпитки) добавочных полюсов.

**Проверка расположения щеток на геометрической нейтрали.** Выполняется проверка на неподвижном якоре индуктивным методом. К двум щеткодержателям, расположенным на расстоянии полюсного деления и установленным примерно по оси главных полюсов, подключается чувствительный магнитоэлектрический вольтметр. Обмотку возбуждения подключают через выключатель к постороннему источнику постоянного тока. В обмотке возбуждения устанавливают ток, равный 1—5% номинального значения, и производят включение и выключение выключателя.

При положении щеток на нейтрали э. д. с. трансформации между обмотками главных полюсов и якоря равна нулю, т. е. стрелка вольтметра отклоняться не будет. В случае смещения щеток с нейтрали стрелка вольтметра будет отклоняться. Необходимо сместить расположение щеток и произвести снова размыкание и замыкание цепи возбуждения, при этом отмечается не только значение, но и направление отклонения стрелки вольтметра. Если показание вольтметра уменьшилось, щетки надо смещать в ту же сторону, если увеличилось — в обратную.

**Определение зоны наилучшей коммутации.** Для оценки качества коммутации имеется ряд методов, но наиболее ясное представление об условиях сложного коммутационного процесса дает способ определения безыскровой зоны, предложенный В. Т. Касьяновым, заключающийся в том, что при каждом значении нагрузки определяются наибольший и наименьший пределы тока добавочных полюсов, между которыми коммутация остается безыскровой. Принципиальная схема положительной и отрицательной подпитки (отпитки) приведена на рис. 59.

Усиливая м. д. с. добавочных полюсов путем положительной подпитки, одновременно ведут наблюдения за искрением под сбегающим краем щетки.

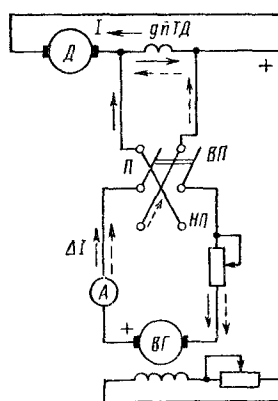


Рис. 59. Принципиальная схема положительной и отрицательной подпитки:

Д — испытуемый электродвигатель;  $gnTD$  — обмотка добавочных полюсов; П — переключатель; ВП — верхнее положение переключателя; НП — нижнее положение переключателя; А — амперметр; ВГ — вспомогательный генератор;  $I$  — ток нагрузки;  $\Delta I$  — ток подпитки;  $\rightarrow$  ток отрицательной подпитки при ВП;  $\leftarrow$  — ток положительной подпитки при НП

При появлении искрения измеряют ток якоря и ток подпитки, затем продолжают увеличивать его до начала искрения 2-го класса и снова измеряют указанные величины. После этого ток подпитки уменьшают до нуля, изменяют его направление, следовательно, м. д. с. добавочных полюсов уменьшается за счет отрицательной подпитки. И снова производят подобные измерения в момент начала искрения и достижения 2-го класса. Опыты проводят для 4—5 значений тока якоря, и по их результатам строят кривые положительной и отрицательной подпитки. Зона безыскровой коммутации тягового генератора ГП-311Б показана на рис. 60. Из рисунка видно, что средняя линия зоны безыскровой работы должна располагаться при токах подпитки, а точка А при номинальном токе генератора  $I_n = 4320$  А иметь ординату от 0,7 до 1,5%. По кривым подпитки и отпитки судят о коммутации машины. Чем больше ширина зоны безыскровой работы и зоны допустимого искрения при каждом токе якоря, тем надежнее и устойчивей коммутация. Если средняя линия расположена выше оси абсцисс, машина недокоммутирована, если ниже — перекоммутирована. При хорошей степени компенсации реакции якоря средняя линия прямая, при плохой — кривая. Чем лучше совпадение зон искрения, тем точнее расположены щетки на геометрической нейтрали.

Коммутация машины трудно поддается расчету, поэтому при выпуске тяговых машин приходится доводить коммутацию опытным путем (подбор ширины наконечников, воздушного зазора). Оптимальные параметры магнитной системы добавочных полюсов обеспечивают совпадение средней линии с осью абсцисс на всем протяжении. Усиление или ослабление действия добавочных полюсов производится изменением воздушных зазоров или числа витков обмотки добавочных полюсов (если изменения воздушных зазоров недостаточно). Зазор между сердечником полюса и якорем, называемый первым, должен быть больше зазора под главными полюсами, а зазор между сердечником полюса и остовом (станиной), называемый вторым, не рекомендуется выбирать маленьким, чтобы вихревые токи остова не искажали коммутацию при переходных процессах. Требуемое значение первого зазора можно определить по формуле, предложенной В. Т. Касьяновым,

$$\delta' = \frac{\delta}{1 \pm \frac{\Delta I}{I} \frac{\theta}{\theta - 1}},$$

где  $\delta'$  — новое и  $\delta$  — прежнее значения зазора;

$I$  — ток якоря (нагрузки);

$\Delta I$  — ток подпитки или отпитки;

$\theta$  — отношение м. д. с. добавочных полюсов к м. д. с. реакции якоря.

Числовое значение  $\theta$  для тяговых генераторов равно 1,29—1,3. Зазоры регулируют при помощи стальных прокладок, расположенных между остовом и сердечниками добавочных полюсов. При необходимости ослабления м. д. с. добавочных полюсов первый зазор увеличивают за счет уменьшения количества стальных прокладок, при необходимости усиления м. д. с. количество прокладок увеличивают.

Если необходимо уменьшить м. д. с. полюсов за счет второго зазора, то вместо убранный стальной прокладки устанавливают диамагнитную (латунную, дюралевую и др.). Так, например, опытом установлено, что для тягового генератора ГП-311Б рекомендуется для регулирования зазоров под добавочными полюсами изменять количество стальных прокладок в зависимости от тока подпитки:  $\Delta I = 35$  А — подложить прокладку толщиной 0,5 мм;  $\Delta I = 75$  А — подложить две прокладки толщиной по 0,5 мм.

**Пусковые испытания.** Тяговые электродвигатели магистрального подвижного состава (при тяговых испытаниях) проходят пусковые испытания током, при котором создается сила тяги, соответствующая коэффициенту сцепления 0,3 при полном возбуждении. Ток не должен превышать 1,7 тока продолжительного режима электродвигателя, а вентиляция должна быть такой же, как в условиях эксплуатации.

Электродвигатель с заторможенным якорем должен выдерживать в течение 15 с установленный ток. Испытание повторяют 4 раза через 5-минутные интервалы, якорь необходимо поворачивать каждый раз на 1/4 полюсного деления (шага) в одном направлении.

**Проверка сопротивления и электрической прочности изоляции.** Состояние электрической изоляции оценивается по сопротивлению и пробивному напряжению. Сопротивление изоляции электрических машин с номинальным напряжением до 500 В измеряется мегаомметром на 500 В, а машин с номинальным напряжением больше 500 В — мегаомметром на 1000 В. Для тяговых

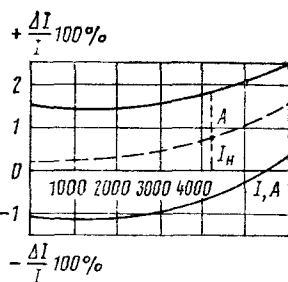


Рис. 60. Зона безыскровой коммутации тягового генератора ГП-311Б

электродвигателей сопротивление изоляции должно быть не менее 1,5 МОм, измеренное после испытания на нагревание. Отсчет по мегаомметру производится через 1 мин после приложения напряжения. Значение сопротивления изоляции тяговых генераторов — не ниже 1 МОм.

Затем проверяют электрическую прочность изоляции в течение 1 мин повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц. Испытуемое напряжение для новых тяговых генераторов и двигателей определяется:  $U_{исп} = 2U + 1000$ , а после среднего или деповского ремонта  $U_{исп} = 0,75 \times (2U + 1000)$ , где  $U = 85\%$  максимального напряжения тягового генератора, но не ниже номинального.

Источником высокого напряжения служит однофазный повышающий трансформатор. Результат испытания считается положительным, если не произойдет пробоя или перекрытия изоляции обмоток. Явление короны во время испытания допустимо. После испытания машина подвергается внешнему осмотру, при этом проверяется состояние коллектора, щеток, изоляторов, миканитового конуса, бандажей и др.

## ГЛАВА 4

# ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

---

### 11. НАЗНАЧЕНИЕ МАШИН

Вспомогательные машины по назначению можно разделить на несколько групп:

1. Машины-регуляторы, выполняющие основные функции по регулированию энергетической цепи тепловоза. К этой группе относятся многообмоточные возбудители постоянного тока специального исполнения, которые принимают сигналы по различным координатам состояния энергетической цепи (напряжение и ток тягового генератора, частота вращения дизеля и т. п.) и, управляя возбуждением тягового генератора в соответствии с этими сигналами, обеспечивают заданную характеристику передачи. На некоторых отечественных и зарубежных тепловозах для этой цели используются возбудители с расщепленными полюсами.

2. Машины, передающие сигналы от тиристорных и магнитных усилителей к системе возбуждения генератора. Для этой цели используются машины постоянного или переменного тока с одной обмоткой возбуждения. Они по существу выполняют роль усилителей.

3. Машины переменного тока, питающие рабочие обмотки магнитных усилителей (подвозбудители). Эти машины обычно имеют повышенную частоту (400 Гц) для уменьшения размеров самой машины и магнитных усилителей.

4. Машины, осуществляющие на тепловозах постройки до 70-х годов обратную связь по частоте вращения дизеля (тахогенераторы). Это небольшие машины постоянного и переменного тока мощностью до 1 кВт, соединенные с валом дизеля через редуктор или клиноременную передачу.

5. Машины — источники питания цепей управления и вспомогательных. Вспомогательные генераторы работают параллельно с аккумуляторной батареей и питают цепи управления аппаратов, задающие обмотки возбудителей и магнитных усилителей, а также вспомогательные двигатели и цепи освещения и сигнализации. На некоторых тепловозах устанавливаются генераторы для питания электрического отопления пассажирских поездов.

6. Электродвигатели вспомогательных агрегатов. Для привода вентиляторов, компрессоров, топливных, масляных и водяных насосов на отечественных и зарубежных тепловозах используются двигатели постоянного и переменного тока как общепромышленные, так и специальной конструкции.

7. Пусковые электродвигатели (стартер-генераторы). На тепловозах с гидравлической и механической передачей, а также с главными генераторами переменного тока для пуска дизеля применяются двигатели постоянного тока, питающиеся от аккумуляторной батареи. Эти машины, кроме того, обычно выполняют функции вспомогательных генераторов.

От работы вспомогательных электрических машин в большой степени зависит экономичность и надежность тепловозов. Поэтому основным требованием, предъявляемым к ним, является высокая надежность и устойчивость их работы.

## 12. ВОЗБУДИТЕЛИ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Возбудители используются для основного регулирования генератора — получения гиперболической внешней характеристики. Регулирование производится за счет введения обратных связей по току генератора и по его напряжению, а также изменения параметров (насыщения магнитной цепи) возбудителя. Введение дополнительных обратных связей позволяет использовать эти возбудители также для автоматического регулирования мощности дизеля и ограничения тока генератора. Такая система применена на тепловозе ТЭЗ (см. гл. 1).

Возбудитель имеет две магнитные системы. В одной из них (ненасыщенной) магнитный поток в рабочем диапазоне практически постоянен, а в другой (насыщающейся, или насыщенной, как ее обычно называют) изменяется по значению и направлению в зависимости от тока генератора. Вторая система насыщается, так как в ее магнитной цепи имеются участки с малой площадью поперечного сечения (магнитные мостики). Электродвижущая сила возбудителя определяется алгебраической суммой магнитных потоков обеих систем.

В электрических передачах тепловозов используются два типа машин такого рода — с продольным и радиальным «расщеплением» полюсов. В первом случае магнитные системы разделены вдоль длины машины, во втором — по ее окружности.

Возбудитель с радиальным расщеплением полюсов типа ВТ 275/120, установленный на тепловозах ТЭЗ, представляет собой шестиполюсную машину с номинальными данными: мощность 10 кВт, напряжение 107 В, ток 95 А, частота вращения 850—1800 об/мин. Два противоположно расположенных полюса возбудителя образуют насыщенную магнитную систему, остальные четыре — ненасыщенную. На ненасыщенных полюсах уложена независимая обмотка возбуждения *НВ*, которая питается от вспомогательного генератора (рис. 61). Магнитодвижущая сила этой обмотки имеет постоянное значение. Кроме того, на этих полюсах размещены последовательная обмотка *КВ*, компенсирующая действие реакции якоря, а также регулировочная и ограничительная обмотки для автоматического регулирования мощности дизеля и ограничения тока генератора (на рис. 61 не показаны).

На насыщающихся полюсах расположены параллельная обмотка возбуждения *ШВ* и дифференциальная обмотка *ДВ*, подключенная параллельно

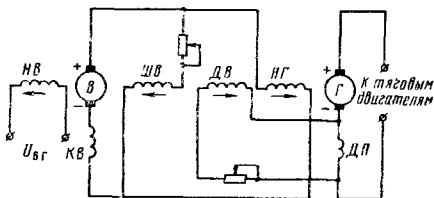


Рис. 61. Принципиальная схема возбуждения генератора на тепловозе ТЭЗ:

Г — якорь тягового генератора; НГ — обмотка возбуждения; ДП — обмотка добавочных полюсов; В — якорь возбuditеля; НВ, ШВ, ДВ, КВ — обмотки возбуждения возбuditеля: независимая, параллельная, дифференциальная, последовательная;  $U_{вг}$  — напряжение вспомогательного генератора

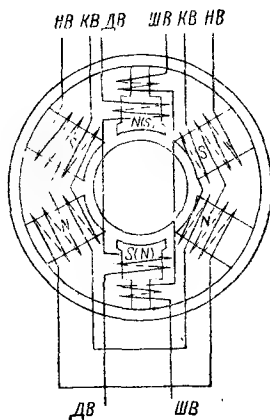


Рис. 62. Схема размещения обмоток возбуждения  
возбудителя с радиальным расщеплением полюсов  
(обозначения см. на рис. 61)

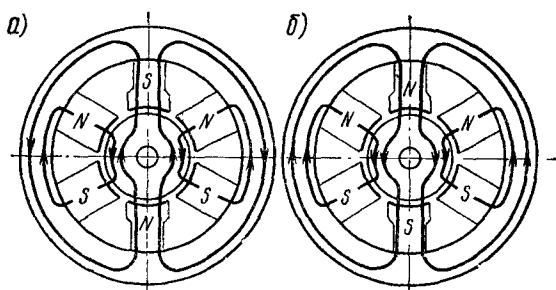


Рис. 63. Магнитная цепь возбудителя с радиальным расщеплением полюсов:  
 а — при малом токе генератора; б — при большом токе генератора

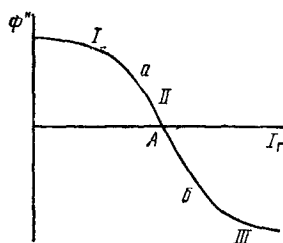


Рис. 64. Зависимость магнитного потока насыщенной системы  $\Phi''$  возбудителя с радиальным расщеплением полюсов от тока генератора  $I_g$

обмотке добавочных полюсов ДП тягового генератора Г. Ток в обмотке ДВ пропорционален току генератора и составляет 2—3% его значения. Магнитодвижущие силы параллельной и дифференциальной обмоток направлены противоположно, и значение магнитного потока насыщенных полюсов определяется их разностью. Схема размещения обмоток возбуждения на полюсах возбудителя приведена на рис. 62.

При малых значениях тока генератора напряжение возбудителя достигает максимального значения. Следовательно, параллельная обмотка создает наибольшую магнитодвижущую силу и, так как магнитодвижущая сила дифференциальной обмотки мала, магнитные мостики насыщаются. Обмотки ШВ и ДВ включены так, что при этом образуется шестиполюсная магнитная система (рис. 63, а).

При увеличении тока генератора магнитный поток за счет размагничивающего действия дифференциальной обмотки вначале мало изменяется (рис. 64, участок I). В точке а магнитный мостик размагничивается, и поток при дальнейшем увеличении тока генератора изменяется практически по прямолинейному закону (участок II). Этому способствует также уменьшение тока и м. д. с. параллельной обмотки вследствие уменьшения напряжения возбудителя. В точке А м. д. с. параллельной и дифференциальной обмоток взаимно уравниваются, а при дальнейшем увеличении тока генератора магнитный поток  $\Phi''$  изменяет направление. В точке б магнитные мостики снова насыщаются. После этого ток генератора мало влияет на магнитный поток насыщенной системы (участок III). После изменения направления магнитного потока  $\Phi''$  возбудитель по существу превращается в двухполюсную машину (см. рис. 63, б).

Простая волновая обмотка, уложенная на якоре возбудителя, как известно, имеет две параллельные ветви ( $2a=2$ ), причем каждая из них располагается под всеми полюсами магнитной системы. При шестиполюсной системе (см. рис. 63, а) э. д. с. возбудителя определяется суммой потоков ненасыщенной  $\Phi'$  и насыщенной  $\Phi''$  систем, при двухполюсной системе (см. рис. 63, б) — их разностью. Зависимость напряжения возбудителя от тока генератора при различных частотах вращения приведена на рис. 65.

Магнитные системы возбудителя практически независимы. Следовательно, можно приближенно рассчитать отдельно э. д. с., наводимые в обмотке якоря каждым магнитным потоком, а затем, суммируя их, определить э. д. с. на зажимах якоря. Некоторая погрешность такого метода расчета обусловлена тем, что потоки насыщенной и ненасыщенной систем имеют два общих участка магнитной цепи — часть станины и часть сердечника якоря между двумя ненасыщенными полюсами. При малых токах генератора магнитные потоки на этих участках направлены противоположно (см. рис. 63, а), а при больших

тока совпадают (см. рис. 63, б). Вследствие некоторого насыщения этих участков расчет, основанный на независимости магнитных систем, при максимальных значениях тока тягового генератора дает несколько завышенные значения э. д. с. возбудителя. Добавочные полюсы практически не влияют на распределение потоков главных полюсов.

Возбудитель аналогичного типа применен на маневровых тепловозах ЧМЭ2 и ЧМЭ3. Он имеет два ненасыщенных и два насыщенных полюса. На ненасыщенных полюсах уложена независимая обмотка, ток которой автоматически регулируется в зависимости от частоты вращения вала дизеля, на насыщенных полюсах, кроме дифференциальной и параллельной обмоток, расположена независимая размагничивающая обмотка, питающаяся от вспомогательного генератора. На тепловозе ЧМЭ2 дифференциальная обмотка включена на полный ток тягового генератора; на тепловозе ЧМЭ3 — на часть этого тока (параллельно обмотке добавочных полюсов).

На тепловозах ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ2, ТЭМ4 используются четырехполюсные возбудители с продольным расщеплением полюсов типа МВТ-25/9, с номинальными данными: 5,6 кВт; 75 В; 75 А; 2000 об/мин.

Каждый полюс этого возбудителя разделен вдоль оси на две неравные части. На одной из них (будем называть ее насыщенной) расположены магнитные мостики в виде вырезов на сердечнике и стальной прокладки между сердечником и станиной (рис. 66). Возбудитель имеет две обмотки возбуждения. Одна из них — основная *ОВ* — охватывает обе части полюса, другая — дифференциальная *ДВ* — расположена на насыщенной части полюса. Магнитодвижущие силы этих обмоток направлены в противоположные стороны. Наконечники двух частей полюса разделены латунной прокладкой. Соответственно сердечник якоря разделен на две части пакетом латунных листов.

Из принципиальной схемы возбуждения генератора тепловозов ТЭ1, ТЭ2 и ТЭМ2 (рис. 67) видно, что основная обмотка *ОВ* питается от двух источников: вспомогательного генератора *ВГ*, дающего постоянное напряжение, и возбудителя *В*. Эта обмотка выполняет одновременно функции независимого и параллельного возбуждения. Дифференциальная обмотка *ДВ* включена последовательно в силовую цепь тягового генератора *Г*. При малых токах генератора, когда м. д. с. дифференциальной обмотки мала, магнитные мостики намагничиваются потоком, созданным основной обмоткой. С увеличением тока генератора м. д. с. дифференциальной обмотки сначала размагничивает, а потом перемagnetивает насыщенную часть полюса. Соответственно сначала

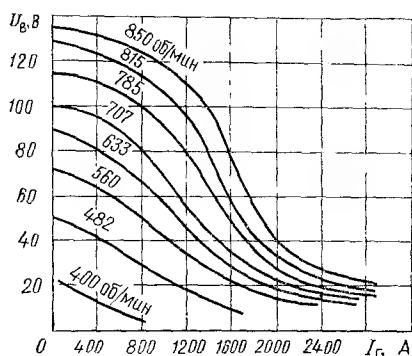


Рис. 65. Зависимость напряжения возбудителя тепловоза ТЭ3 от тока генератора

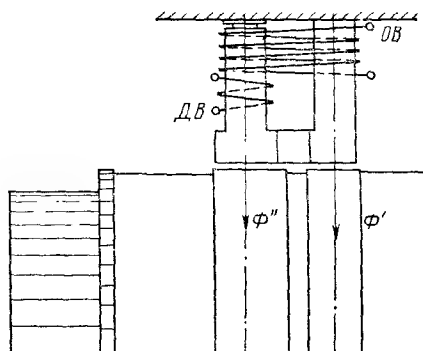
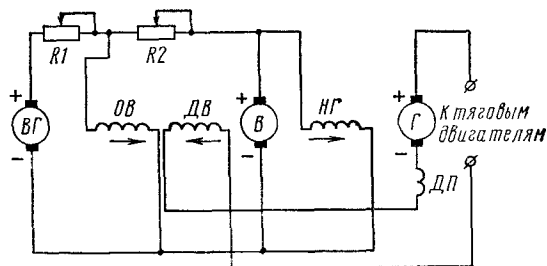


Рис. 66. Магнитная цепь возбудителя с продольным расщеплением полюсов:

*ОВ* — основная обмотка; *ДВ* — дифференциальная обмотка

Рис. 67. Принципиальная схема возбуждения генератора на тепловозах ТЭ1, ТЭ2 и ТЭМ2:

$\Gamma$  — якорь тягового генератора;  $НГ$  — его обмотка возбуждения;  $ДП$  — обмотка добавочных полюсов;  $ВГ$  — вспомогательный генератор;  $В$  — якорь возбудителя;  $ОВ$  — основная обмотка возбуждения;  $ДВ$  — дифференциальная обмотка;  $R1$  и  $R2$  — настраиваемые резисторы



уменьшается, а затем изменяет направление магнитный поток, проникающий из этой части полюса в якорь. При больших токах генератора она снова насыщается, и после увеличения тока до определенного значения магнитный поток насыщенной системы практически не изменяется.

В первом приближении можно считать, что э. д. с. в обмотке якоря наводится двумя независимыми потоками. Один из них  $\Phi'$  (см. рис. 66) создается м. д. с. основной обмотки и замыкается по ненасыщенной части полюса, другой  $\Phi''$  создается разностью м. д. с. основной и дифференциальной обмоток и проходит по насыщенной части полюса. При малых токах генератора второй поток совпадает по направлению с первым, при больших токах потоки имеют противоположное направление. Следует отметить, что взаимное влияние насыщенной и ненасыщенной систем в этом возбудителе значительно больше, чем в возбудителе с радиальным расщеплением полюсов.

Возбудители с радиальным расщеплением полюсов имеют ряд преимуществ по сравнению с возбудителями с продольным расщеплением: более простую и удобную в изготовлении магнитную систему; более точное обеспечение заданной характеристики, большую гибкость при настройке системы в процессе испытаний и в эксплуатации.

Общим недостатком возбудителей с расщепленными полюсами является сравнительно невысокая точность регулирования. Нужная характеристика тягового генератора обеспечивается за счет изменения параметров магнитной цепи возбудителя и, следовательно, в большой степени зависит от точности сборки машины, магнитных свойств стали, температуры обмоток возбудителя.

### 13. РАСЧЕТ И НАСТРОЙКА ВОЗБУДИТЕЛЕЙ

Основным назначением возбудителя в системе автоматического регулирования тепловоза является обеспечение заданной внешней характеристики тягового генератора — зависимости его напряжения от тока якоря  $U_r = f(I_r)$ . В соответствии с этим основной характеристикой возбудителя является зависимость тока возбуждения генератора  $I_{вг}$  от тока его якоря  $I_r$ . Исходными данными для расчета служат характеристика холостого хода  $E_r = f(I_{вг})$  и нагрузочные характеристики  $U_r = f(I_{вг})$  генератора, а также требуемая внешняя характеристика. Все эти зависимости определяются при проектировании тягового генератора (см. гл. 2). Для компенсированных генераторов нагрузочные характеристики практически совпадают с характеристикой холостого хода, так как компенсационная обмотка устраняет размагничивающее действие реакции якоря.

**Расчет основной характеристики.** Характеристика, соответствующая наибольшей частоте вращения дизель-генераторного агрегата, рассчитывается графическим методом в такой последовательности (рис. 68):

1) в первом квадранте строят характеристику холостого хода и нагрузочные характеристики генератора  $E_r = f(I_{вг})$  и  $U_r = f(I_{вг})$ ;

2) во втором квадранте строят требуемую внешнюю характеристику генератора  $U_r = f(I_r)$ ;

3) задаются значениями тока генератора  $I_{r1}; I_{r2}; I_{r3}; I_{r4}; \dots$ , по требуемой характеристике определяют соответствующие значения напряжения, переносят их на нагрузочные характеристики при выбранных значениях тока  $I_r$  и определяют необходимые значения тока возбуждения  $I_{B1}; I_{B2}; I_{B3}; \dots$ ;

4) в третьем квадранте на пересечении соответствующих координат получают точки зависимости  $I_{Br} = f(I_r)$ ;

5) определяют значения э. д. с. возбудителя

$$E = I_{Br}(R_{Br} + R_{я}) + \Delta U_{щ}, \quad (9)$$

где  $R_{Br}$  — сопротивление обмотки возбуждения генератора;

$R_{я}$  — сопротивление обмотки якоря возбудителя;

$\Delta U_{щ}$  — падение напряжения в щеточном контакте возбудителя ( $\sim 2$  В).

В этом расчете приближенно принято, что ток якоря возбудителя равен току возбуждения генератора. Размагничивающее действие реакции якоря возбудителя не учтено, так как оно компенсируется последовательной обмоткой. Чем больше выбрано расчетных точек характеристики, тем точнее она будет определена. Практически достаточно выбрать 8—10 точек, причем в их числе обязательно должны быть следующие основные режимы: режим холостого хода ( $I_r = 0$ ), начало гиперболической части характеристики (точка В на рис. 68), продолжительный (номинальный) режим генератора, режим, соответствующий его максимальному току.

Возбудитель должен обеспечивать длительную работу генератора в любой точке гиперболической части его характеристики. Наиболее тяжелым для возбудителя является режим максимального напряжения генератора, которому соответствует наибольший ток возбуждения. Поэтому номинальную (расчетную) мощность возбудителя следует выбирать по режиму, соответствующему началу гиперболической части характеристики. Эта мощность составляет практически 1—2% номинальной мощности генератора.

Для этого режима выбирают основные размеры возбудителя, производят расчеты магнитной цепи и обмотки якоря. Расчеты в основном выполняются обычными методами, принятыми для машин постоянного тока. Однако они имеют некоторые особенности. Значения магнитной индукции выбирают так, чтобы во всем рабочем диапазоне все участки магнитной цепи, за исключением

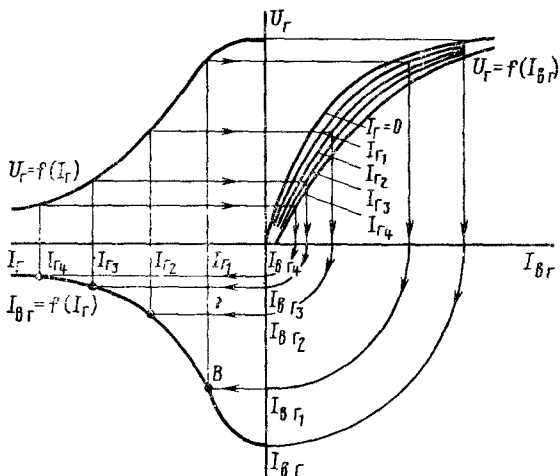


Рис. 68. Построение характеристики возбудителя

магнитных мостиков, не насыщались. От выполнения этого условия в значительной мере зависит точность настройки характеристик возбудителя. Значения магнитной индукции принимают в воздушном зазоре 0,6—0,7 Тл; в зубцах (на  $1/2$  высоты) — 1,1—1,3 Тл; в сердечнике якоря — 0,8—1,0 Тл; в станине — 0,6—0,8 Тл. Эти значения значительно меньше, чем в обычных машинах. Для предварительного расчета можно принять, что в номинальном режиме магнитный поток насыщенной системы составляет половину потока ненасыщенной системы. В машинах с радиальным рас-

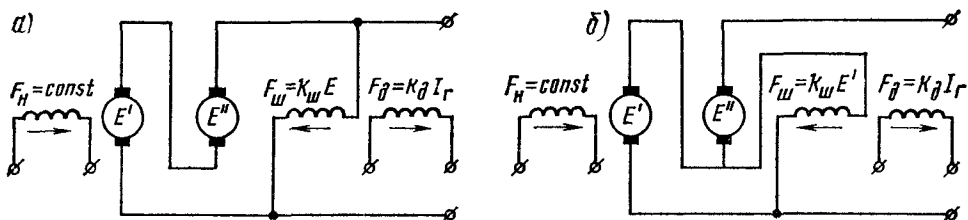


Рис. 69. Эквивалентная схема возбудителя с радиальным расщеплением полюсов

щеплением размеры насыщенных и ненасыщенных полюсов принимают одинаковыми. Плотность тока в обмотках возбуждения принимается малой ( $2 \div 2,5 \text{ А/мм}^2$ ), чтобы уменьшить влияние нагрева обмоток на их сопротивление и характеристики возбудителя.

**Возбудители с радиальным расщеплением полюсов.** Для возбудителя с радиальным расщеплением полюсов имеющего волновую обмотку якоря ( $a = 1$ ).

$$E = \frac{\nu}{60} \pi (p' \Phi' + p'' \Phi''), \quad (10)$$

где  $N$  — общее число проводников обмотки якоря;

$p', p''$  — число пар ненасыщенных и насыщенных полюсов;

$\Phi', \Phi''$  — потоки, проникающие в якорь из ненасыщенной и насыщенной систем на одну пару полюсов, Вб.

Заменив произведение постоянных величин коэффициентами  $C_E'$  и  $C_E''$ , получим

$$E = C_E' \Phi' + C_E'' \Phi'' = E' + E''. \quad (11)$$

Здесь  $E', E''$  — э. д. с., наводимые потоками ненасыщенной и насыщенной систем.

Возбудитель эквивалентен системе последовательно соединенных машин (рис. 69, а). Если пренебречь падением напряжения в обмотке якоря возбудителя, м. д. с. параллельной обмотки можно принять равной

$$F_{\text{ш}} = I_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}} = \frac{E' + E''}{R_{\text{ш}}} \omega_{\text{ш}} = k_{\text{ш}} (E' + E'') = k_{\text{ш}} E, \quad (12)$$

где  $I_{\text{ш}}$  — ток параллельной обмотки;

$\omega_{\text{ш}}$  — число ее витков на полюс;

$R_{\text{ш}}$  — сопротивление цепи обмотки.

Коэффициент пропорциональности между э. д. с. возбудителя и м. д. с. параллельной обмотки равен

$$k_{\text{ш}} = \frac{\omega_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}}.$$

Дифференциальная обмотка включена параллельно обмотке добавочных полюсов тягового генератора, поэтому ее м. д. с. пропорциональна току генератора  $F_{\text{д}} = k_{\text{д}} I_{\text{г}}$ . Коэффициент  $k_{\text{д}}$  зависит от числа витков обмотки и сопротивления ее цепи

$$k_{\text{д}} = a_{\text{д}} \omega_{\text{д}} = \frac{R_{\text{дд}}}{R_{\text{д}}} \omega_{\text{д}}, \quad (13)$$

здесь  $a_{\text{д}}$  — соотношение между токами генератора и дифференциальной обмотки;

$\omega_{\text{д}}$  — число витков дифференциальной обмотки на полюс;

$R_{\text{д}}$  — сопротивление цепи дифференциальной обмотки;

$R_{\text{дд}}$  — сопротивление обмотки добавочных полюсов тягового генератора.

Магнитный поток насыщенной системы индуцирует э. д. с.

$$E'' = C_F \Phi'' = C_F \frac{F_{\text{ш}} - F_{\text{д}}}{R_{\text{ш}}} = C_F' = \frac{k_{\text{ш}}(E' + E'') - k_{\text{д}}I_F}{R_{\text{ш}}},$$

где  $R_{\text{ш}}$  — магнитное сопротивление насыщенной системы.

Решив это уравнение относительно э. д. с.  $E''$ , находим

$$E'' = \frac{C_F (k_{\text{ш}}E' - k_{\text{д}}I_F)}{R_{\text{ш}} - C_F' k_{\text{ш}}}. \quad (14)$$

Из этого равенства следует, что действие параллельной обмотки эквивалентно действию такой же обмотки, питающейся от постоянной э. д. с.  $E'$ , при условии, что магнитное сопротивление насыщенной системы уменьшено на  $C_F' k_{\text{ш}}$ . При этом условия схемы на рис. 69, а и б эквивалентны.

Из равенства (14) можно, кроме того, сделать следующие выводы.

1. Кривая  $E = f(I_F)$  симметрична относительно точки А, соответствующей равенству м. д. с. параллельной и дифференциальной обмоток, т. е.  $k_{\text{ш}}E' = k_{\text{д}}I_F$  (рис. 70).

2. При постоянном значении  $R_{\text{ш}}$ , что соответствует ненасыщенному состоянию магнитных мостиков, зависимость  $E = f(I_F)$  прямолинейна. Наклон этой части характеристики определяется параметрами обмоток возбуждения возбудителя.

3. Положение и форма перегибов характеристики, вызванных насыщением мостиков при малых и больших токах генератора, определяются размерами мостиков.

Параметры обмоток возбуждения рассчитываются исходя из требуемой характеристики возбудителя  $E = f(I_F)$ , полученной по рис. 69 и формуле (9). Для определения положения точки А проводят касательные  $ab$  и  $cd$  к частям характеристики, соответствующим насыщенному состоянию магнитных мостиков (см. рис. 70). Эти касательные должны быть параллельными, так как характеристика симметрична относительно точки А. Затем восстанавливают перпендикуляр к касательным так, чтобы точка пересечения с характеристикой делила его пополам. Эта точка и будет искомой точкой А.

Электродвижущая сила, соответствующая этой точке, создается только потоком ненасыщенной магнитной системы и равна  $E'$ , так как м. д. с. и поток насыщенной системы равны нулю. По кривой намагничивания ненасыщенной системы можно определить требуемую м. д. с. независимой обмотки  $F_{\text{н}}$ . Обоз-

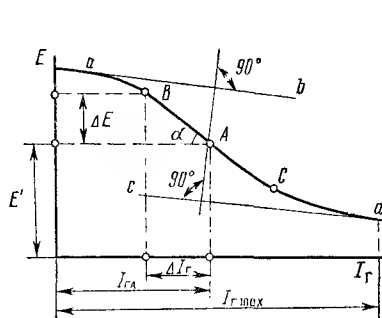


Рис 70. Графическое определение параметров обмоток возбуждения возбудителя

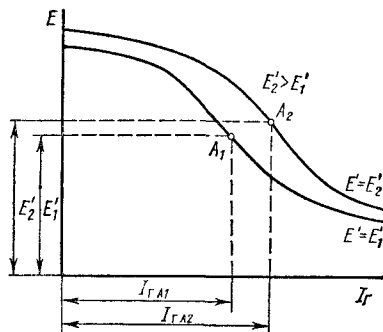


Рис 71. Влияние параметров независимой обмотки на характеристику возбудителя

начив ток генератора, соответствующий точке  $A$ ,  $I_{rA}$  и, исходя из равенства м. д. с.  $k_m E' = k_d I_{rA}$ , получаем соотношение

$$\frac{k_m}{k_d} = \frac{I_{rA}}{E'} . \quad (15)$$

Как было отмечено ранее, единственным насыщающимся элементом магнитной цепи должен быть мостик. Следовательно, магнитное сопротивление остальных участков насыщенной системы постоянно. Оно определяется как отношение м. д. с. к магнитному потоку на прямолинейной части кривой намагничивания насыщенной системы. Обозначим постоянную составляющую магнитного сопротивления  $R_{m1}$ .

Найдем угол  $\alpha$  наклона прямолинейной части характеристики возбудителя к оси абсцисс. Тангенс этого угла равен отношению приращений э. д. с. и тока с учетом их масштабов  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E}{\Delta I_r}$ . Из равенства (14) следует

$$\Delta E = \frac{C_E k_d I_{rA}}{R_m - C_F' k_m} .$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_F' k_d}{R_{m1} - C_F' k_m} . \quad (16)$$

Решив это уравнение совместно с уравнением (15) относительно  $k_d$  и  $k_m$ , получим

$$k_d = \frac{E' R_{m1} \operatorname{tg} \alpha}{C_F' (E' + I_{rA} \operatorname{tg} \alpha)} ; \quad (17)$$

$$k_m = \frac{I_{rA} R_{m1} \operatorname{tg} \alpha}{C_F' (E' + I_{rA} \operatorname{tg} \alpha)} . \quad (18)$$

Последовательность расчета возбудителя:

1. Строят требуемую характеристику  $E = f(I_r)$ .
2. Выбирают размеры якоря и полюсов, рассчитывают обмотку якоря и кривые намагничивания насыщенной и ненасыщенной магнитных систем, определяют их постоянные магнитные сопротивления.
3. Определяют м. д. с. независимой обмотки и коэффициенты  $k_d$  и  $k_m$  по требуемой характеристике (рис. 71) и формулам (17) и (18).
4. Выбирают размеры мостика насыщенного полюса.
5. Рассчитывают действительную характеристику возбудителя, сопоставляют ее с требуемой и при необходимости вносят коррективы.

6. Определяют параметры обмоток возбуждения (число витков, площадь сечения проводов, сопротивление, размещение на полюсах) исходя из лучшего использования обмоточного пространства и технологических соображений.

Для корректировки результатов расчета и настройки системы регулирования в эксплуатации необходимо установить влияние на характеристику параметров обмоток и размеров магнитного мостика. Изменение м. д. с. независимой обмотки приводит к пропорциональному изменению э. д. с. ненасыщенной системы  $E'$ . Как следует из уравнения (15), при неизменных коэффициентах  $k_d$  и  $k_m$  увеличение  $E'$  приводит к пропорциональному увеличению тока  $I_{rA}$ . Таким образом, координаты точки  $A$  изменяются по отношению

$$\frac{k_m}{k_d} = \frac{I_{rA1}}{E'_1} = \frac{I_{rA2}}{E'_2} . \quad (19)$$

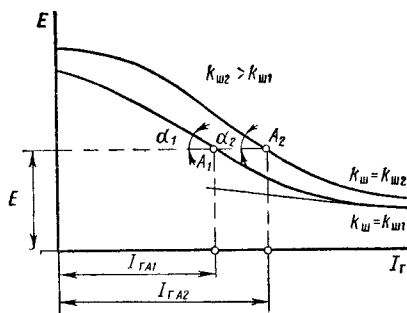


Рис. 72. Влияние параметров параллельной обмотки на характеристики возбудителя

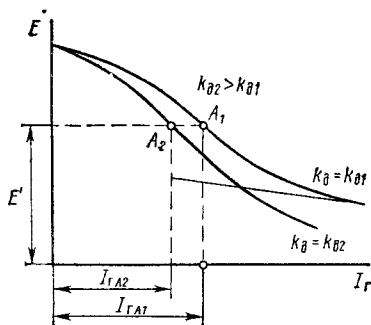


Рис. 73. Влияние параметров дифференциальной обмотки на характеристики возбудителя

Наклон прямолинейной части характеристики при этом не изменяется. Следовательно, при увеличении м. д. с. независимой обмотки прямолинейная часть характеристики смещается вверх и вправо (см. рис. 71), а при уменьшении — вниз и влево. Увеличение  $E'$  приводит к увеличению м. д. с. параллельной обмотки. Поэтому в зоне малых токов генератора суммарная м. д. с. насыщенной системы возрастает, а в зоне больших токов — уменьшается. В результате перегибы характеристики при увеличении м. д. с. независимой обмотки сместятся в сторону больших токов генератора. Очевидно, при уменьшении м. д. с. произойдет обратное явление.

При изменении параметров параллельной обмотки также изменяются координаты точки симметрии  $A$ . Из уравнения (15) видно, что ток  $I_{1A}$  пропорционален коэффициенту  $k_w$ . Угол наклона прямолинейной части характеристики при увеличении  $k_w$  возрастает (16). Кроме того, как и в предыдущем случае, перегибы кривой смещаются в сторону больших токов генератора (рис. 72).

Изменение параметров дифференциальной обмотки также приводит к изменению координат точки симметрии  $A$  и наклона прямолинейной части. Ток генератора  $I_{1A}$  обратно пропорционален, а тангенс угла  $\alpha$  прямо пропорционален значению коэффициента  $k_d$ . Следовательно, при увеличении м. д. с. дифференциальной обмотки точка  $A$  смещается влево, а наклон прямолинейной части возрастает. Часть характеристики, соответствующая малым токам генератора, практически не зависит от параметров дифференциальной обмотки. Точки перегиба кривой намагничивания при увеличении  $k_d$  смещаются в сторону меньших токов (рис. 73).

Увеличение площади сечения мостика вызывает смещение перегибов в сторону больших м. д. с. и приводит к расширению прямолинейной части характеристики. Наклон к оси абсцисс части характеристики, соответствующей насыщенному состоянию магнитной цепи, определяется в основном длиной мостика. При удлинении мостика этот наклон возрастает.

Как уже отмечалось, на насыщенных полюсах возбудителя тепловоза ЧМЭ2 уложена независимая размагничивающая обмотка. Ее действие приводит к смещению всей характеристики возбудителя влево в сторону меньших токов генератора без изменения наклона прямолинейной части.

**Возбудители с продольным расщеплением полюсов.** Для возбудителя с продольным расщеплением полюсов (см. рис. 66)

$$E = \frac{\rho}{a} \frac{N}{60} (\Phi' + \Phi'') n. \quad (20)$$

Это выражение аналогично равенству (10) с той разницей, что число полюсов насыщенной и ненасыщенной систем в этом случае одинаково.

На тепловозах ТЭ1, ТЭ2 и ТЭМ2 основная обмотка возбуждения возбудителя питается от двух источников — вспомогательного генератора и возбудителя, выполняя одновременно функции независимой и параллельной обмотки. Для вывода зависимости тока основной обмотки от параметров системы используем эквивалентную схему возбуждения (рис. 74). Из анализа схемы следует, что ток основной обмотки можно представить в виде двух слагаемых

$$I_o = \frac{U_{вг}}{r_1 + R_o \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right)} + \frac{ER_{вг}}{(R_{я} + R_{вг}) \left[r_2 + R_o \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right)\right]} \quad (21)$$

Первое из них не зависит от режима работы возбудителя, а второе пропорционально его э. д. с. и, таким образом, эквивалентно действию параллельной обмотки возбуждения. Магнитодвижущая сила основной обмотки равна произведению тока на число витков  $F_o = I_o \omega_o$ . Она также может быть представлена в виде суммы двух составляющих: независимой

$$F_{в} = \frac{U_{вг} \omega_o}{r_1 + R_o \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (22)$$

и пропорциональной э. д. с. возбудителя

$$F_{ш} = \frac{EK_{вг} \omega_o}{(R_{я} + K_{вг}) \left[r_2 + R_o \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right)\right]} \quad (23)$$

По аналогии с возбудителем с продольным расщеплением полюсов обозначим коэффициент пропорциональности между переменной составляющей тока возбуждения и э. д. с.

$$k_{ш} = \frac{R_{вг} \omega_o}{(R_{я} + R_{вг}) \left[r_o + K_o \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right)\right]} \quad (24)$$

Магнитодвижущая сила дифференциальной обмотки пропорциональна току тягового генератора  $F_{д} = k_{д} I_{г}$ . Если обмотка включена последовательно в цепь якоря генератора, коэффициент пропорциональности

$$k_{д} = \frac{F_{д}}{I_{г}} = \frac{\omega_{д} I_{г}}{a_{д} I_{г}} = \frac{\omega_{д}}{a_{д}} \quad (25)$$

где  $\omega_{д}$  — число витков дифференциальной обмотки на полюс;

$a_{д}$  — число ее параллельных ветвей.

Суммарная м. д. с. насыщенной части полюса

$$F'' = F_{в} + k_{ш} E - k_{д} I_{г} \quad (26)$$

По приведенным формулам можно для любого режима определить м. д. с., действующие в возбудителе. В результате увеличения сопротивления  $r_1$  уменьшается независимая часть м. д. с. основной обмотки и возрастает коэффициент  $k_{ш}$ . Влияние этих изменений на характеристику возбудителя такое же, как при радиальном расщеплении полюсов (см. рис. 71 и 72).

Экспериментальное исследование распределения магнитных полей в возбудителе показало, что обычно принимаемое допущение о независимости магнитных потоков, создаваемых в частях расщепленного полюса, приводит к значительным погрешностям, особенно при больших токах генератора. В этом режиме потоки насыщенной и ненасыщенной частей полюса имеют противо-

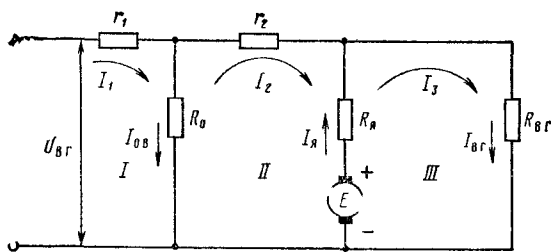


Рис. 74 Эквивалентная схема возбуждения генератора тепловозов ТЭ1 и ТЭ2

$U_{вг}$  — напряжение вспомогательного генератора,  $r_1$ ,  $r_2$  — сопротивления регулировочных резисторов,  $R_0$  — сопротивление основной обмотки возбуждения,  $R_я$  — сопротивление обмотки якоря возбудителя,  $R_{вг}$  — сопротивление обмотки возбуждения тягового генератора  $E$  — э. д. с. возбудителя

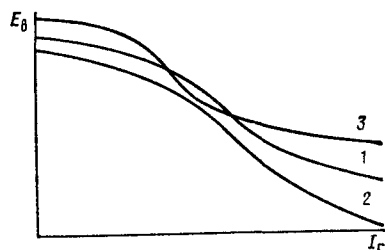


Рис. 75. Влияние магнитного рассеяния на характеристики возбудителя MBT-25/9

положные направления, поэтому значительная часть потока проникает из второй системы в первую, создавая дополнительную э. д. с. В результате действительная э. д. с. на 20—25% превышает значение, полученное из расчета, основанного на независимости магнитных потоков двух систем. На рис. 75 представлены характеристики возбудителя MBT-25/9: опытная (кривая 1) и расчетная, полученная при этом допущении (кривая 2). Потоки рассеяния, замыкающиеся между частями полюса, в большой степени зависят от расстояния между ними. С уменьшением этого расстояния потоки рассеяния увеличиваются. При этом возрастает крутизна характеристики возбудителя. Э. д. с. возрастает при малых и особенно при больших токах генератора и несколько снижается при малых значениях м. д. с. насыщенной части полюса, т. е. в средней части характеристики. Кривая 3 на рис. 75 является расчетной характеристикой, полученной при значительно уменьшенном расстоянии между частями полюса. При проектировании возбудителя можно подбирать нужную характеристику, изменяя проводимость рассеяния за счет размеров немагнитной прокладки между частями полюса.

#### 14. ВОЗБУДИТЕЛИ И ПОДВОЗБУДИТЕЛИ В СИСТЕМАХ С МАГНИТНЫМИ И ТИРИСТОРНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

На отечественных и зарубежных тепловозах преимущественное распространение получили системы электрической передачи с магнитными усилителями (МУ), выполняющими основные функции обеспечения заданной характеристики генератора. В системах с МУ используются вспомогательные электрические машины двух видов: возбудители тяговых генераторов, возбуждаемые в свою очередь от амплистата, и подвозбудители переменного тока, питающие силовые обмотки МУ.

На тепловозах ТЭ10 и ТЭП60 первых выпусков амплистат питает непосредственно обмотку возбуждения тягового генератора. Возбудителем в этой системе является трехфазный синхронный генератор повышенной частоты (400 Гц) типа ГСВ-20, питающий силовую обмотку МУ. Технические данные возбудителя приведены в табл. 6.

Как известно, частота вращения синхронного генератора и частота тока связаны зависимостью  $n = 60 f/p$ . Для получения частоты 400 Гц возбудитель имеет 32 полюса. Трехфазная обмотка статора соединена по схеме звезда с выведенным нулем. Обмотка возбуждения, расположенная на роторе, питается постоянным током через два контактных кольца. Для уменьшения потерь

мощности на вихревые токи статор изготовлен из электротехнической стали в толщину листов 1 мм. Возбудитель приводится от дизеля через клиноременную передачу. В некоторых системах к возбудителю присоединена машина постоянного тока, используемая в качестве тахогенератора.

При постоянном токе возбуждения синхронный генератор имеет падающую характеристику, т. е. при увеличении тока статора его напряжение уменьшается. По условиям работы амплитата напряжение на зажимах его силовой цепи должно быть постоянным. Чтобы удовлетворить это требование, ток возбуждения возбудителя при увеличении его нагрузки (тока возбуждения генератора) должен возрастать. Для этого обмотка возбуждения возбудителя, кроме питания от постоянного напряжения вспомогательного генератора, получает подпитку, пропорциональную току возбуждения тягового генератора, через трансформатор постоянного тока. Эту систему принято называть *узлом коррекции*.

На тепловозах 2ТЭ10Л, ТЭП60, М62 и их модификациях автоматическое регулирование производится амплитатом, питающим обмотку возбуждения возбудителя В-600. Возбудитель усиливает мощность сигнала амплитата и передает его на обмотку возбуждения тягового генератора. Возбудитель постоянного тока В-600 спроектирован на основе возбудителя с расщепленными полюсами ВТ-275/120. Устранение магнитных мостиков и модернизация конструкции (применение коллектора на пластмассе с увеличением его длины на 20%, усиление изоляции обмоток якоря и возбуждения, уменьшение воздушного зазора с 2 до 1,5 мм) при тех же размерах и обмоточных данных позволили увеличить номинальное напряжение машины со 107 до 165—180 В, ток от 95 до 125 А и соответственно мощность с 10 до 20,6—22,5 кВт при частоте вращения 1800 об/мин. Возбудитель имеет две независимые обмотки возбуждения — основную, питаемую от амплитата, и размагничивающую, питаемую от вспомогательного генератора. Размагничивающая обмотка в номинальном режиме служит для уточнения настройки характеристик системы и для получения малого напряжения генератора при трогании тепловоза. В случае повреждения системы регулирования и отключения основной обмотки размагничивающая обмотка используется для возбуждения возбудителя при неавтоматическом управлении. Возбудитель В-600 и вспомогательный генератор ВГТ 275/120 объединяются в двухмашинный агрегат А-706, приводимый от дизеля через клиноременную передачу. На тепловозах ТЭП10, ТЭ40 эти машины установлены отдельно.

Для маневровых тепловозов ТЭМ5 разработан возбудитель В-607 на базе возбудителя с продольным расщеплением полюсов МВТ-25/9, выполняющий те же функции, что и возбудитель В-600. Номинальные данные возбудителя В-607: мощность 6,75 кВт, напряжение 90 В, ток 75 А при частоте вращения 2030 об/мин. Этот возбудитель объединяется в агрегат А-708 со вспомогательным генератором МВГ-25/11.

Для питания силовых обмоток МУ на тепловозах 2ТЭ10Л, ТЭП60, М62, ГЭМ5, ТЭМ6 с 1971 г. выпускаются однофазные синхронные подвозбудители ВС-652. Они по номинальным данным идентичны ранее выпускавшимся подвозбудителям ГС-500А, но отличаются повышенной надежностью. Обмотка возбуждения этих машин расположена на статоре, а обмотка переменного тока на роторе (так называемое *обращенное исполнение*). Номинальные данные подвозбудителя приведены в табл. 6.

На тепловозах с передачей переменного-постоянного тока (синхронный тяговый генератор, полупроводниковый выпрямитель, тяговые двигатели постоянного тока) для возбуждения тягового генератора используется синхронный возбудитель и регулирующий тиристорный блок. Возбудитель ВС-650В, примененный на тепловозах ТЭ109 и ТЭ116, представляет собой восьмипо-

Таблица 6

| Показатели               | Типы генераторов      |            |            |           |
|--------------------------|-----------------------|------------|------------|-----------|
|                          | ГСВ-20<br>3-фазный    | ГС-500     | BC-652     | BC-650B   |
|                          |                       |            |            |           |
| Обмотка возбуждения      | На роторе             | На статоре | На статоре | На роторе |
| Мощность, кВА            | 20                    | 1,1        | 1,1        | 26        |
| Ток длительный А         | 63                    | 10         | 10         | 164—146   |
| Напряжение В             | 230                   | 110        | 110        | 215—287   |
| Частота вращения, об/мин | 1500                  | 4000       | 4000       | 2470—3300 |
| Коэффициент мощности     | 0,8                   | 0,5        | 0,5        | 0,85      |
| К. п. д.                 | 0,82                  | 0,55       | 0,52       | 0,75      |
| Частота, Гц              | 400                   | 133        | 133        | 165—220   |
| Диаметр станины мм       | 560                   | 245        | 265        | 475       |
| Длина станины мм         | 204                   | 151        | 327        | —         |
| Диаметр ротора мм        | 450                   | 83         | 98         | 290       |
| Длина ротора мм          | 115                   | 135        | 115        | 85        |
| Воздушный зазор мм       | 0,8                   | 1,3        | 1,3        | 2         |
| Число полюсов            | 32                    | 4          | 4          | 8         |
| Обмотка статора          | Волновая<br>2 слойная | Катушечная |            |           |
| Шаг по пазам             | 1—6                   | 1—4        | 1—4        | 1—7       |
| Число пазов              | 168                   | 14         | 14         | 48        |
| Ротор                    | Неявнополюсный        | Барабанный |            |           |
| Обмотка ротора           | Многослойная          | Вспыная    |            | Волновая  |

люсный однофазный генератор обращенного типа с явно выраженными полюсами мощностью 26 кВт. Он рассчитан на две частоты вращения 2470 и 3300 об/мин. Номинальные данные приведены в табл. 6.

На возбудителе переменного тока нет коллектора, поэтому он имеет меньшую массу и габаритные размеры, а также обладает большей надежностью в эксплуатации, чем возбудитель постоянного тока. Для сравнения можно отметить, что возбудитель В-600 мощностью 20 кВт имеет массу 384 кг, а возбудитель ВС-650 мощностью 26 кВт — 355 кг. В наконечниках полюсов возбудителя ВС-650 уложена замкнутая накоротко демпферная обмотка. В установившемся режиме токи в этой обмотке отсутствуют. В переходных режимах обмотка способствует увеличению устойчивости системы регулирования. В скользящем контакте между кольцами и щетками, через который замыкается ток порядка 150 А, нередко возникает нежелательное искрение. Этот узел возбудителя требует серьезного внимания в эксплуатации.

## 18. ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

*Тахогенератором* называется электрическая машина постоянного или переменного тока с независимым возбуждением или постоянными магнитами, соединенная с валом регулируемой машины и дающая напряжение, пропорциональное ее частоте вращения. На отечественных тепловозах с электрической передачей используются тахогенераторы постоянного тока. Напряжение тахогенератора не должно существенно изменяться при изменении тока его нагрузки в рабочем диапазоне. Падение напряжения в обмотке якоря компенсируется последовательной обмоткой возбуждения или сдвигом щеток против

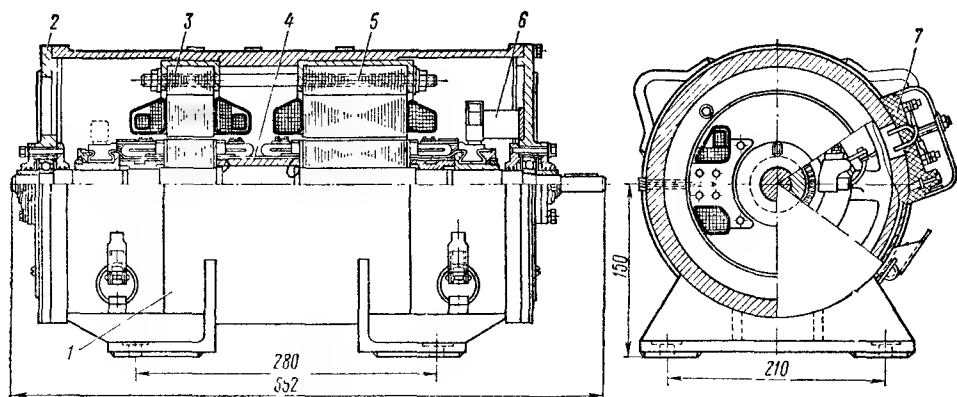


Рис. 76. Тахометрический агрегат тепловоза ТЭЗ:

1 — станина; 2 — подшипниковый щит; 3 — ярмо тахогенератора ТГ-83/45; 4 — якорь; 5 — ярмо тахогенератора ТГ-83/100; 6 — траверса; 7 — коробка выводов

вращения якоря. Требуемая характеристика тахогенератора обеспечивается настройкой независимой обмотки возбуждения. Чтобы исключить влияние внешних магнитных полей, тахогенераторы снабжены массивной стальной станиной, которая отделена от ярма слоем алюминиевого сплава. Ярмо набирают из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Система возбуждения должна быть рассчитана так, чтобы в рабочем диапазоне не происходило насыщение магнитной цепи. Это необходимо для обеспечения точной настройки системы регулирования.

На тепловозе ТЭЗ два тахогенератора ТГ-83/100 и ТГ-83/45 объединены в общем корпусе (рис. 76). Они приводятся от вала дизеля через клиноременную передачу с частотой вращения 4000 об/мин (на последней позиции контроллера). Тахогенератор ТГ-83/100 используется в системе регулирования мощности дизеля. Отклонение его напряжения от номинального значения при любом токе якоря в пределах номинального режима не должно превышать  $\pm 1 - 0,4$  В. Тахогенератор ТГ-83/45 используется в системе ограничения пускового тока тягового генератора. Напряжение тахогенератора при частоте вращения 4000 об/мин без нагрузки поддерживается в пределах 16,7—17,2 В, а при токе якоря 10 А снижается до 12 В.

На тепловозах 2ТЭ10Л, М62 и их модификациях в качестве тахогенератора использован возбудитель В-4Б синхронного генератора, питающего силовые обмотки амплистата. Тахогенераторы в последние годы заменены тахометрическими датчиками. Основные конструкционные узлы тахогенераторов унифицированы. Технические данные тахогенераторов приведены в табл.7.

Таблица 7

| Показатели               | Типы тахогенераторов |          |             |
|--------------------------|----------------------|----------|-------------|
|                          | ТГ-83/100            | ТГ-83/45 | ТГ-83/35    |
| Возбуждение              | Смешанное            |          | Независимое |
| Мощность, кВт            | 0,624                | 0,12     | 0,12        |
| Ток, А                   | 8                    | 10       | 5           |
| Напряжение, В            | 78                   | 12       | 24          |
| Частота вращения, об/мин | 4000                 | 4000     | 4000        |
| Диаметр станины, мм      | 245                  | 245      | 245         |

| Показатели                                     | Типы тахогенераторов |          |          |
|------------------------------------------------|----------------------|----------|----------|
|                                                | ТГ-83/100            | ТГ-83/45 | ТГ-83/35 |
| Число полюсов                                  | 2                    | 2        | 2        |
| Число витков независимой обмотки на полюс      | 150                  | 500      | 220      |
| Число витков последовательной обмотки на полюс | 13,5                 | 30,5     | —        |
| Диаметр якоря, мм                              | 83                   | 83       | 83       |
| Длина якоря, мм                                | 100                  | 45       | 35       |
| Число пазов                                    | 14                   | 14       | 14       |
| Обмотка якоря                                  | Петлевая             |          |          |
| Число витков                                   | 224                  | 112      | 224      |
| Шаг по пазам                                   | 1—8                  | 1—8      | 1—8      |
| Диаметр коллектора, мм                         | 70                   | 70       | 76       |
| Число пластин коллектора                       | 56                   | 56       | 56       |

### 16. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Для привода вспомогательных механизмов современного тепловоза затрачиваются 12—14% номинальной мощности дизеля. С увеличением ее по предварительным расчетам мощность вспомогательных механизмов будет возрастать. По данным МИИТа, распределение мощности на вспомогательные нужды отдельными механизмами представлено в табл. 8.

Рациональный выбор системы приводов вспомогательных механизмов в значительной мере определяет степень использования мощности дизеля и экономичность тепловоза в целом. Как видно из табл. 8, 70—80% вспомогательной мощности расходуется на привод вентиляторов холодильника и электрических машин, поэтому выбор рационального режима работы электроприводов этих механизмов особенно важен.

Механический привод от вала дизеля прост по конструкции и надежен в эксплуатации, но не обеспечивает экономичное регулирование вспомогательных механизмов, так как их производительность при такой системе привода определяется частотой вращения дизеля, а не действительными потребностями. Гидравлический привод, примененный на некоторых тепловозах, сложен и требует значительных расходов при эксплуатации.

Электрический привод обеспечивает автоматизацию управления вспомогательными механизмами, что приводит к существенному уменьшению расхода

Таблица 8

| Показатели                                     | Серии тепловозов |        |       |            |
|------------------------------------------------|------------------|--------|-------|------------|
|                                                | ТЭЗ              | 2ТЭ10Л | ТЭ109 | Строющийся |
| Общая мощность вспомогательных механизмов, кВт | 147              | 258    | 273   | 405        |
| От мощности дизеля                             | 9,7              | 11,6   | 12,3  | 13,6       |
| В том числе, %:                                |                  |        |       |            |
| вентиляторы холодильника                       | 41,2             | 47,3   | 39,5  | 34,0       |
| вентиляторы электрических машин                | 14,5             | 24,3   | 29,5  | 46,0       |
| компрессор                                     | 30,9             | 17,2   | 17,0  | 11,5       |
| возбудитель и вспомогательный генератор        | 12,9             | 10,6   | 12,5  | 7,0        |
| прочее оборудование                            | 0,5              | 0,6    | 1,5   | 1,5        |

энергии и повышению надежности. Размеры и масса механизмов с электроприводом, особенно переменного тока, меньше по сравнению с механизмами, приводимыми от дизеля.

Вспомогательные электродвигатели работают в тяжелых условиях — температура внутри кузова достигает 60—70° С, двигатели подвергаются вибрациям и значительным ударным перегрузкам. Поэтому они должны иметь специальную конструкцию, обеспечивающую теплостойкость и виброустойчивость, изоляцию класса F или H (кремнийорганика и теплостойкие лаки), лобовые части обмоток должны обладать повышенной жесткостью, подшипники усилены. Машины общепромышленного применения не полностью удовлетворяют эти требования.

На тепловозах с электрической передачей переменного тока появилась возможность использовать для привода вспомогательных механизмов простые, дешевые и надежные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Асинхронный двигатель по сравнению с двигателем постоянного тока при одинаковых номинальных значениях мощности и частоты вращения в 1,5—2 раза легче, момент инерции ротора в 2 раза, а стоимость в 3 раза меньше. Вследствие отсутствия коллектора его надежность выше, а расходы на ремонт и содержание в несколько раз меньше, чем у двигателей постоянного тока. Все эти показатели очень важны для вспомогательных механизмов тепловозов. Наиболее рациональным способом управления асинхронными двигателями является регулирование частоты и напряжения.

Акад. М. П. Костенко установлен закон оптимального частотного регулирования асинхронного двигателя в зависимости от изменения момента на валу

$$\frac{U}{U_n} = \frac{1}{1_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}. \quad (27)$$

Здесь  $U_n, f_n, M_n$  — напряжение и частота на зажимах двигателя и момент на валу в номинальном режиме;

$U, f, M$  — напряжение, частота и момент в любом другом режиме.

Уравнение выведено для идеального двигателя без учета падений напряжения в активном сопротивлении обмотки статора, нелинейности кривой намагничивания, неравномерного распределения тока в стержнях обмотки ротора, изменения условий охлаждения при различных частотах вращения. Регулирование частоты и напряжения по этому закону при принятых допущениях обеспечивает работу двигателя с практически постоянными значениями к.п.д., коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ) и перегрузочной способности, т. е. отношения  $M_m/M_n$ , где  $M_m$  — максимальный (опрокидывающий) момент.

При регулировании сохраняется постоянное абсолютное скольжение, равное разности угловых скоростей магнитного поля и ротора

$$\omega = \omega_0 - \omega_2. \quad (28)$$

Здесь  $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$  — угловая скорость магнитного поля;  $p$  — число пар полюсов машины;

$\omega_2$  — угловая скорость ротора.

Частота э. д. с. и тока в обмотке ротора  $f_2$  пропорциональна абсолютному скольжению  $f_2 = \frac{\omega p}{2\pi}$ . Следовательно, при регулировании по рассмотренному закону частота тока в роторе остается неизменной. Более точная формулировка закона регулирования с учетом падений напряжения в активных сопротивлениях обмотки статора имеет вид

$$\frac{E}{E_n} = \frac{1}{1_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}. \quad (29)$$

Здесь  $E_n$  — э. д. с., наводимая в обмотке статора вращающимся магнитным полем в номинальном режиме;  $E$  — то же в любом другом режиме. Векторы э.д.с. определяются из соотношения  $\dot{E} = \dot{U} - I_1 Z_1$ , где  $Z_1 = r_1 + jx_1$  — полное сопротивление обмотки статора. Это уточнение особенно существенно при питании двигателя напряжением малой частоты (меньше 0,25—0,3 номинального значения).

Статический момент, приложенный к валу двигателя со стороны приводимого им вентилятора, пропорционален квадрату частоты вращения, т.е., пренебрегая скольжением, можно считать, что момент пропорционален квадрату частоты питающего напряжения

$$\frac{M}{M_n} = \left( \frac{f}{f_n} \right)^2. \quad (30)$$

Подставляя эту зависимость в формулу (29), получим выражение закона оптимального регулирования для вентиляторной нагрузки

$$\frac{E}{E_n} = \left( \frac{f}{f_n} \right)^2, \quad (31)$$

или приближенно

$$\frac{U}{U_n} = \left( \frac{f}{f_n} \right)^2. \quad (32)$$

Таким образом, оптимальный режим асинхронного двигателя, приводящего в движение вентилятор, будет достигнут, если напряжение на зажимах (точнее э. д. с. обмотки статора) будет изменяться пропорционально квадрату частоты или угловой скорости ротора.

На тепловозе 2ТЭ116 с электрической передачей переменного тока асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором приняты для привода вентиляторов тяговых электродвигателей (два двигателя А2-82-6 на секцию), вентилятора выпрямительной установки (один двигатель АОС2-62-6) и вентилятора холодильной камеры (четыре двигателя АМВ-37-03). Двигатели А2-82-6-100 и АОС2-62-6 выбраны на базе серийных машин общепромышленной серии А2 с пересчетом обмотки статора на номинальную частоту питания 100 Гц. Двигатель АМВ-37-03 встроен в вентилятор и является его составной частью. Ротор с короткозамкнутой обмоткой вращается вокруг неподвижного статора с трехфазной обмоткой. Такой тип двигателя принято называть *обращенным*. Ротор запрессован в рабочее колесо вентилятора. Основные номинальные данные двигателей приведены в табл. 9.

Все двигатели питаются непосредственно от тягового синхронного генератора. Включение и защита их от токов короткого замыкания и перегрузок производятся автоматическими выключателями. Для равномерного распределения нагрузки между двумя обмотками синхронного генератора от одной из них питаются два двигателя вентилятора холодильника и двигатель вентилятора тяговых двигателей задней тележки, от другой — два двигателя вентилятора холодильника, двигатель вентилятора тяговых двигателей передней тележки и двигатель вентилятора выпрямительной установки.

На каждой из 15 позиций контроллера при соответствующей постоянной частоте напряжение тягового генератора в соответствии с его внешней гиперболической характеристикой изменяется в очень широком диапазоне. Напряжение генератора изменяется в зависимости от частоты и позиции контроллера (рис. 77). В качестве минимальных значений (кривая 1) приняты напряжения в режиме короткого замыкания тяговых двигателей (при пуске), а в качестве максимальных значений (кривая 2) — напряжения, соответствующие ограничению на данной позиции контроллера. За единицу принято номинальное на-

| Показатели                                                       | Двигатели |        |         |
|------------------------------------------------------------------|-----------|--------|---------|
|                                                                  | АМВ-37-03 | А2-82  | АОС2 62 |
| Мощность, кВт                                                    | 24        | 24     | 8       |
| Напряжение, В                                                    | 394       | 394    | 394     |
| Ток, А                                                           | 56        | 50     | 16      |
| Соединение обмоток                                               | Звезда    |        |         |
| Частота, Гц                                                      | 100       | 100    | 100     |
| Синхронная частота вращения, об/мин                              | 2000      | 2000   | 2000    |
| К. п. д., %                                                      | 89        | 88     | 85      |
| Коэффициент мощности                                             | 0,7       | 0,82   | 0,72    |
| Класс изоляции                                                   | Н         | Н      | Н       |
| Активное сопротивление обмотки статора при 115° С, Ом            | 0,0649    | 0,0602 | 0,1835  |
| Приведенное активное сопротивление обмотки ротора при 115° С, Ом | 0,0728    | 0,0361 | 0,1863  |
| Индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом                    | 0,203     | 0,22   | 0,465   |
| Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом         | 0,591     | 0,272  | 0,465   |
| Ток холостого хода, А                                            | 27,7      | 28,7   | 10,6    |
| Масса, кг                                                        | 144*      | 340    | 173     |

\* Обмотанный статор + залитый алюминием пакет ротора.

пряжение вспомогательных двигателей. При изменении напряжения на зажимах асинхронного двигателя и постоянной частоте меняется основной магнитный поток. Это следует из уравнения  $\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ , где  $E_1 = c\Phi f$ .

Если пренебречь сравнительно небольшим падением напряжения в обмотке статора, приближенно можно считать, что при данной частоте магнитный поток пропорционален напряжению. Кривая 3 показывает напряжение, необходимое для сохранения постоянного номинального значения магнитного потока асинхронного двигателя. Как видно из рисунка, возможное изменение напряжения в сторону повышения достигает 150%, а в сторону понижения 20 % от значений, соответствующих режиму постоянного магнитного потока. Изменение напряжения по оптимальному закону регулирования при вентиляционной нагрузке

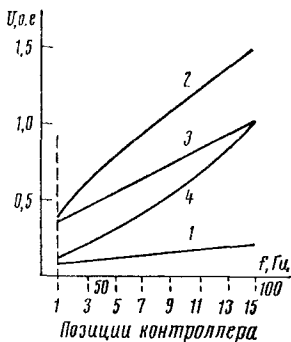


Рис. 77. Напряжение тягового генератора в относительных единицах на различных позициях контроллера

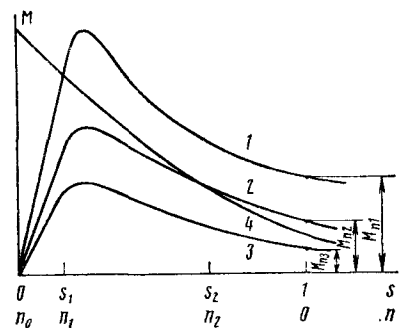


Рис. 78. Совместная работа асинхронного двигателя и вентилятора

(32) представлено кривой 4. Возможные отклонения от этой зависимости также очень велики.

При увеличении магнитного потока резко возрастает реактивная составляющая тока холостого хода, а следовательно, ток статора, снижается коэффициент мощности, увеличиваются потери мощности в стали и в обмотках статора. В двигателях тепловоза 2ТЭ116 при фазном напряжении 350 В и частоте 100 Гц (15-я позиция контроллера) ток статора превышает номинальное значение в 1,5—2 раза, а при частоте 72 Гц (9-я позиция) такая же кратность тока достигается при напряжении 250 В. Момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, поэтому при пониженном напряжении может произойти переход его на неустойчивую часть характеристики с резким снижением частоты вращения и соответствующим снижением производительности вентилятора. Пусковой момент может оказаться недостаточным для трогания двигателя.

Момент асинхронного двигателя в зависимости от скольжения представлен на рис. 78 при трех значениях напряжения:  $U_1$ , (кривая 1),  $U_2$  (кривая 2) и  $U_3$  (кривая 3), причем  $U_1 > U_2 > U_3$ , а зависимость момента сопротивления движению вентилятора от частоты вращения изображена кривой 4. При напряжении  $U_1$  пусковой момент двигателя  $M_{п1}$  больше момента вентилятора при трогании  $M_{пв}$ . Следовательно, пуск произойдет, и система двигатель-вентилятор будет ускоряться, пока моменты двигателя и вентилятора не уравниются в точке с координатами  $M_1, n_1 (s_1)$ . При напряжении  $U_2$  пуск также произойдет ( $M_{п2} > M_{пв}$ ), но моменты уравниваются при скольжении  $s_2$ , соответствующем малой частоте вращения  $n_2$ . Если напряжение снизится до значения  $U_2$  при работающем двигателе, его скольжение возрастет до значения  $s_2$ , а частота вращения соответственно снизится до значения  $n_2$ . Токи статора и ротора в этом режиме в несколько раз превышают номинальные значения. При напряжении  $U_3$  пуск не произойдет, так как  $M_{п3} < M_{пв}$ , а после снижения напряжения до этого значения при работающем двигателе произойдет его опрокидывание, т.е. двигатель остановится, и значения токов статора и ротора будут соответствовать режиму короткого замыкания. При напряжениях, близких к  $U_2$ , работа двигателя будет нестабильной, так как при небольших изменениях напряжения частота вращения будет изменяться от нуля до значения, близкого к  $n_2$ .

Наиболее рациональным решением является установка на тепловозе вспомогательного генератора переменного тока и полупроводникового преобразователя с системой автоматического регулирования частоты и напряжения по оптимальному закону. Исследования В. М. Новикова и И. А. Дидоренко показали, что частотное регулирование двигателя вентилятора холодильника снижает потребляемую им мощность при максимальном напряжении в 1,3—1,4 раза.

Для привода компрессора на тепловозе 2ТЭ116 применен двигатель постоянного тока смешанного возбуждения типа ЭКТ-5 мощностью 30 кВт при напряжении 110 В, токе 340 А и частоте вращения 1450 об/мин. Масса двигателя 395 кг. Двигатель питается от стартера-генератора и работает в повторно-кратковременном режиме с продолжительностью включения ПВ — 50%. Это означает, что из общей продолжительности рабочего цикла (20—30 с) двигатель работает 50% времени. Пуск производится при снижении давления в главных резервуарах до 750 кПа по сигналу реле давления. При этом напряжение стартера-генератора снижается до 22—25 В. По мере увеличения частоты вращения двигателя напряжение в течение 2—5 с увеличивается до номинального значения. Напряжение при пуске регулируется автоматически воздействием регулятора напряжения на независимую обмотку возбуждения стартера-генератора. После окончания пуска компрессор включается под нагрузку. Двигатель отключается, когда давление в главных резервуарах достигает значения 900 кПа.

Таблица 10

| Механизмы                       | Типы двигателей          | Мощность, кВт | Частота вращения, об/мин |
|---------------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| Вспомогательный топливный насос | П-21, П-22, ПН-5         | 0,5           | 1350                     |
| Вспомогательный масляный насос  | П-21, П-22, ПН-5         | 0,5           | 1350*                    |
| Маслопрокачивающий насос        | П-41, ПН-28,5            | 4,2           | 2200                     |
| Котел-подогреватель             | П-21, П-22, П-12, ПН-2,5 | 0,2—1,4       | —                        |
| Вентилятор кузова               | П-21М, П-11, ПН-2,5      | 0,2—1,4       | —                        |
| Вентилятор коллектора дизеля    | П-21М                    | 1,4           | 3100**                   |
| Вентилятор калорифера           | МВ-75                    | —             | —                        |
| Антиобледенитель                | МВ-75                    | —             | —                        |

\* На тепловозе ТЭП60 — двигатель типа П-31 мощностью 2,2 кВт.

\*\* На тепловозе ТЭ109

Для привода различных вспомогательных механизмов используются на всех тепловозах двигатели малой мощности общепромышленных серий П и ПН, рассчитанные на напряжение 64, 75 или 100 В, в зависимости от принятого напряжения вспомогательного генератора. Параметры этих двигателей приведены в табл. 10.

### 17. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

При работающем дизеле вспомогательные генераторы питают цепи управления, освещения, заряда аккумуляторной батареи и независимые обмотки возбуждения возбuditелей и других вспомогательных электрических машин. Система автоматического регулирования должна обеспечить постоянное напряжение на зажимах вспомогательного генератора с отклонением не более  $\pm 1$  В на всех позициях контроллера, т. е. при всех возможных частотах вращения, и во всем диапазоне нагрузок. Основным элементом системы является регулятор напряжения (см. гл. 5), который управляет током возбуждения вспомогательного генератора.

Наиболее тяжелым режимом является работа при минимальной частоте вращения дизеля и максимальной нагрузке, т. е. максимальном токе якоря. Это следует из уравнения, определяющего напряжение на зажимах генератора,  $U = C_E n \Phi - I_a r_a$ . Очевидно, что при этих условиях магнитный поток  $\Phi$  и ток возбуждения принимают наибольшие значения. Магнитная цепь во всем возможном диапазоне работы вспомогательного генератора не должна насыщаться, т. е. зависимость магнитного потока от тока возбуждения должна сохранять линейный характер. Номинальные данные вспомогательных генераторов приведены в табл. 11.

Таблица 11

| Типы вспомогательных генераторов | Серия тепловозов            | Мощность, кВт | Частота вращения, об/мин | Ток, А |
|----------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------|
| МВГ-25/11                        | ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ2              | 5,75          | 2000                     | 77     |
| ВГТ-275/150                      | ТЭ3, ТЭ7                    | 8             | 1800                     | 106    |
| ВГТ-275/120                      | 2ТЭ10Л, ТЭП60, ТЭП10Л, М62С | 12            | 1800                     | 160    |

В конструктивном исполнении вспомогательные генераторы представляют собой шестиполусные машины, обычно объединяемые в одном корпусе с возбуждателем. В генераторе ВГТ-275/120, кроме коллектора, установлены контактные кольца для получения переменного тока для питания цепей электромагнитного тормоза и приборов. При частоте вращения 1800 об/мин частота переменного тока равна 90 Гц, мощность 0,58 кВт·А, напряжение 58 В, ток 10 А. На всех серийных тепловозах с электрической передачей постоянного тока напряжение во вспомогательных цепях принято 75 В, на тепловозах переменного постоянного тока — 110 В.

## 18. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПУСКА ДИЗЕЛЯ

Пуск дизеля тепловоза с электрической передачей постоянного тока производится при помощи тягового генератора, который работает в режиме двигателя с последовательным возбуждением, питаемый от аккумуляторной батареи. На тепловозах с электрической передачей переменного постоянного тока устанавливаются специальные стартеры-генераторы постоянного тока. Эти машины при пуске дизеля работают в режиме двигателя с последовательным возбуждением с питанием от аккумуляторной батареи, а при работающем дизеле — в режиме генератора с независимым возбуждением, питая зарядное устройство, цепи управления и электродвигатель компрессора.

При пуске дизеля стартер работает в чрезвычайно тяжелом режиме при токе 1600—1800 А, что в 3,5—4 раза превышает номинальное значение. Это обстоятельство приводит к необходимости увеличения размеров и массы стартера по сравнению с обычными электрическими машинами с аналогичными параметрами установившегося режима. Тяжелые условия коммутации в пусковом режиме вызывают повреждения в узле коллектор—щетками и сокращают сроки межремонтных пробегов.

Технические условия, установленные для стартеров-генераторов постоянного тока, приведены в табл. 12.

В табл. 12 значения тока в стартерном режиме являются максимально допустимыми, а значения моментов в том же режиме минимальными. Мощность  $P_1$ , напряжение якоря  $U$  и возбуждения  $U_B$  в генераторном режиме соответствуют продолжительной работе машины.

Стартер-генератор СТГ-1 установлен на дизель-поезде ДР1П, где он, кроме пуска дизеля, используется для заряда аккумуляторов и питания цепей управления, а также электродвигателей компрессора и вентилятора выпрямительной установки. Стартер-генератор СТГ-7 (рис. 79), установленный на тепловозе ТЭ109, имеет смешанное возбуждение; на четырех главных полюсах размещены последовательная и независимая обмотки возбуждения. Первая используется в двигательном режиме при пуске дизеля, вторая — в генераторном режиме.

Таблица 12

| Тип машины      | Стартерный режим |          |              |           |          |          | Генераторный режим |         |              |           |
|-----------------|------------------|----------|--------------|-----------|----------|----------|--------------------|---------|--------------|-----------|
|                 | прокрутка        |          |              |           | грозание |          | $P_1$ , кВт        | $U$ , В | $n$ , об/мин | $U_B$ , В |
|                 | $I$ , А          | $M$ , Нм | $n$ , об/мин | $P$ , кВт | $I$ , А  | $M$ , Нм |                    |         |              |           |
| СТГ-1           | 800              | 820      | 330          | 48        | 1600     | 1490     | 41                 | 110     | 900/3300     | 90        |
| СТГ-4           | 1200             | 840      | 3300         | 52        | 2350     | 1490     | 48                 | 75      | 1150/3300    | 60        |
| СТГ-7,<br>ПСУ-2 | 800              | 840      | 330          | 50        | 1600     | 1490     | 50                 | 110     | 900/3300     | 90        |

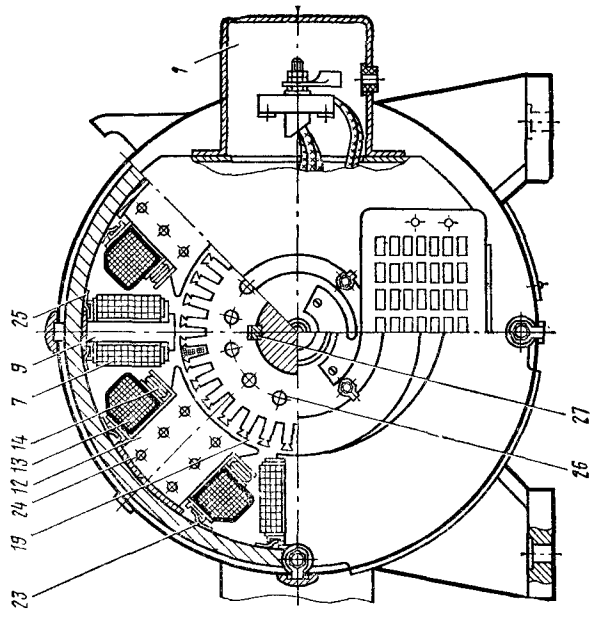
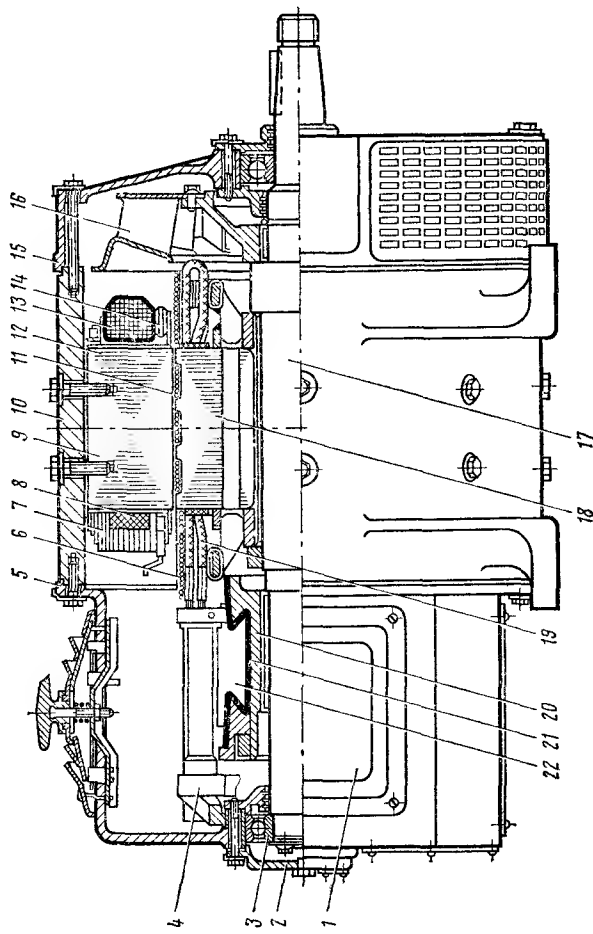


Рис. 79. Стартер-генератор СТГ-7:

1 — коробка выводов; 2 — лабиринтная крышка; 3 — шарикоподшипник; 4 — траверса; 5 — передний подшипниковый щит; 6 — бандаж лобовых соединений; 7 — катушка добавочного полюса; 8 — изоляционный клин; 9 — добавочный полюс; 10 — станна; 11 — бандаж якоря; 12 — главный полюс; 13 — катушка напряжения; 14 — токовая катушка; 15 — задний подшипниковый щит; 16 — вентилятор; 17 — вал якоря; 18 — сердечник якоря; 19 — обмотка якоря; 20 — корпус коллектора; 21, 22 — манжеты и пластина коллектора; 23 — пружины; 24, 26 — вентиляционные каналы; 27 — шпонка

Основной нагрузкой генератора при работающем дизеле является электродвигатель компрессора. На тепловозе 2ТЭ116 установлен стартер-генератор типа ПСГУ-2 с номинальными данными, аналогичными машине СТГ-7.

Для пуска дизеля может быть использован тяговый синхронный генератор при питании его от аккумуляторной батареи через полупроводниковый инвертор. При этом отпадает необходимость в стартере постоянного тока, а для питания вспомогательных устройств может быть применен более надежный в эксплуатации генератор переменного тока.

Синхронный генератор ГС-501А тепловоза 2ТЭ116 имеет на роторе демпферную короткозамкнутую обмотку, аналогичную обмотке ротора асинхронного двигателя. Следовательно, при питании обмотки статора трехфазным переменным током машина будет работать в режиме асинхронного двигателя. Раскручивание вала дизеля проводится до частоты вращения 200 об/мин. Это соответствует частоте питающего напряжения 12-полюсной машины по известной зависимости

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{6 \cdot 200}{60} = 20 \text{ Гц.}$$

Для получения возможно большего момента при минимальном токе частоту питания нужно постепенно увеличивать в диапазоне от 1 до 20 Гц. Обмотка возбуждения при асинхронном пуске отключается от источника питания и замыкается на разрядный резистор, сопротивление которого в 10—15 раз больше сопротивления обмотки. Этим предотвращается возникновение перенапряжений под действием э. д. с., индуцируемой в обмотке возбуждения. В асинхронном режиме ротор вращается медленнее поля статора, потому магнитный поток, замыкающийся через полюсы ротора, изменяется с частотой, пропорциональной разности угловых скоростей поля и ротора. Обмотка возбуждения имеет большое число витков, поэтому э. д. с., возникающая в ней, может достигнуть значений, опасных для прочности изоляции.

При пуске одновременно с регулированием частоты нужно регулировать и напряжение на обмотке статора. Оптимальный режим работы двигателя при постоянном моменте на валу достигается, если частота изменяется пропорционально э. д. с., наведенной в обмотке статора вращающимся магнитным полем. Эта э. д. с. меньше напряжения на значение падения напряжения в обмотке. Сопротивление обмотки имеет сравнительно небольшое значение, поэтому приближенно можно считать, что пропорционально частоте следует изменять питающее напряжение. При этом потери мощности в машине близки к минимальным значениям, сохраняется перегрузочная способность двигателя, т. е. создается достаточно большой пусковой момент. Такой закон регулирования обеспечивается при постоянном значении абсолютного скольжения ротора, т. е. разности угловых скоростей вращающегося магнитного поля и ротора. Частота э. д. с. и тока ротора при этом остается постоянной. На этом основана система автоматического регулирования, разработанная Отраслевой лабораторией кафедр «Электрические машины» ЛИИЖТа (рис. 80).

Синхронный генератор ГС-501А в режиме асинхронного двигателя питается от аккумуляторной батареи АБ через автономный инвертор АИ. На статоре ге-

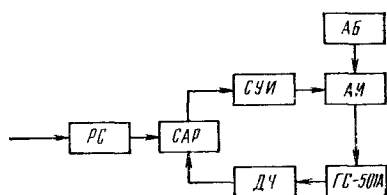


Рис. 80. Структурная схема управления бесстартерным пуском дизеля

нератора размещены две независимые трехфазные обмотки, сдвинутые по окружности статора на  $30^\circ$  эл. Поэтому *АИ* состоит из двух инверторов, фазные напряжения на выходе которых сдвинуты во времени на  $30^\circ$  эл. Датчик частоты вращения *ДЧ* непрерывно измеряет частоту вращения ротора и подает соответствующий сигнал на систему автоматического регулирования *САР*. Действительное значение скольжения в *САР* сопоставляется со значением, заданным регулятором скольжения *РС*. Соответствующий сигнал подается в систему управления инвертором *СУИ*, устанавливающую значение напряжения и частоты на зажимах двигателя. Этим определяются частота вращения ротора и развиваемый им момент.

При опытных пусках дизеля токи *АБ* и продолжительность пуска получились несколько большими, чем при пуске от стартера-генератора, но расчеты показывают, что эти показатели могут быть значительно улучшены, если несколько изменить параметры короткозамкнутой обмотки. Таким образом, можно считать доказанными возможность и целесообразность асинхронного пуска дизеля.

Дизель можно пустить также, используя тяговый генератор в режиме синхронного двигателя. При этом к обмоткам статора, как и при асинхронном пуске, подводится питание от полупроводникового инвертора с постепенным повышением напряжения и частоты, начиная с нулевых значений. В обмотке возбуждения поддерживается постоянное значение тока. Ротор первых оборотов вращения синхронно с полем статора. Управление тиристорами инвертора должно быть согласовано с мгновенным положением ротора, для чего в систему регулирования вводится специальный датчик, что, естественно, ее несколько усложняет. При опытных пусках дизеля тепловоза 2ТЭ116 пусковой ток аккумуляторной батареи был меньше, чем при пуске со стартером постоянного тока при меньшей продолжительности пуска.

## 19. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

Аккумуляторная батарея используется для пуска дизеля и питания цепей управления, вспомогательных и освещения при неработающем дизеле. Конструкция и номинальная емкость аккумуляторов определяются пусковым режимом — кратковременным разрядом, при котором токи достигают 2500 А. При этом напряжение батареи должно обеспечивать необходимую для пуска частоту вращения вала дизеля при прокрутке.

На тепловозах применяются как кислотные, так и щелочные аккумуляторные батареи. Кислотные аккумуляторные батареи 32ТН-450, 32ТН-550 или 48ТН-450 состоят в зависимости от напряжения вспомогательных цепей тепловоза из 32 ( $U_{вр} = 75$  В) или 48 ( $U_{вр} = 110$  В) элементов (аккумуляторов) с номинальной емкостью 450 или 550 А·ч. Номинальная емкость может быть получена при разряде аккумуляторов 10-часовым током, значение которого определяется делением номинальной (паспортной) емкости на 10.

Кислотный аккумулятор ТН-450 состоит из эбонитового сосуда, в который погружены 19 положительных и 20 отрицательных пластин. Каждая пластина представляет собой отлитую из свинцово-сурьмянистого сплава (95% свинца и 5% сурьмы) решетки, ячейки которой заполнены активной массой. После формовки и заряда аккумулятора активная масса положительной пластины состоит из окислов свинца ( $Pb_2O_3$ ), а отрицательная — из губчатого металлического свинца (Pb). Пластины изолированы друг от друга сепараторами из синтетических материалов или дерева (ольхи).

Сверху все положительные пластины соединены между собой, образуя блок, который посредством гаек, шайб и резиновых уплотнений укреплен на эбонитовой крышке аккумулятора. Аналогично выполнен блок отрицательных

пластин. Каждый блок имеет по два вывода — борна. В крышке предусмотрено отверстие для заливки электролита и воды, закрываемое пробкой, которая обеспечивает свободный выход газов из аккумулятора, но препятствует проникновению в него воздуха. Для удобства транспортировки, монтажа и защиты аккумуляторов от механических повреждений их монтируют в деревянных ящиках, по четыре элемента в каждом.

При разряде аккумулятора на пластинах обеих полярностей образуется сульфат свинца ( $PbSO_4$ ) и плотность электролита при этом снижается. Сульфатация происходит также при систематическом недозаряде батареи, слишком глубоким разряде, применении электролита с повышенной плотностью, работе батареи при высокой температуре электролита, загрязнении его и длительном хранении аккумуляторов без подзаряда.

После заряда часть сульфата остается, что может вызывать «болезни» аккумуляторов: «сульфатацию», приводящую к снижению полезной емкости и напряжению при разряде; внутренние замыкания пластин аккумуляторов крупными кристаллами сульфата и их ускоренный самозаряд. Устранение «болезней» аккумуляторов, вызванных сульфатацией, достигается «лечебными» заряд-разрядными циклами не реже одного раза в три месяца.

Электролитом для кислотных батарей служит раствор аккумуляторной серной кислоты в дистиллированной воде. Плотность его в заряженных аккумуляторах должна составлять 1,24—1,25 г/см<sup>3</sup>, в зимние месяцы ее повышают до 1,26 г/см<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение плотности электролита несколько повышает напряжение на элементе, но резко снижает его срок службы, плохо влияя на отрицательные пластины, особенно при высокой интенсивности разряда, который имеет место при пуске дизеля. С точки зрения уменьшения коррозии решеток положительных пластин целесообразно снижать концентрацию электролита, что приводит к увеличению срока их службы. В настоящее время доказана необходимость уменьшения плотности электролита до 1,22, причем мощность батареи несколько возрастает, а вероятность ее замерзания практически отсутствует. Если существует вероятность замерзания электролита, плотность снижать нельзя. При замерзании электролита пластины разрушаются и батарея становится непригодной для работы.

Требования к электролиту, кислоте и воде оговорены специальными инструкциями, нарушение которых приводит к резкому уменьшению срока службы аккумуляторов.

Щелочная аккумуляторная батарея 46ТПЖН-550 состоит из 46 элементов при  $U_{вг} = 75$  В, а 68ТПЖНК-250 — из 68 элементов при  $U_{вг} = 110$  В. Увеличение количества элементов связано с более низким напряжением на элемент (1,2 В против 2,2 В у кислотного). Номинальная емкость щелочного аккумулятора получается при токе 5-часового разряда. Железоникелевый аккумулятор имеет два самостоятельных блока пластин, помещенных в сварном стальном сосуде. В блок входят 18 положительных и 17 отрицательных пластин. Одноименные пластины собирают на одной общей шпильке и стягивают гайкой, образуя полублоки. Борны их выведены через отверстия в крышке и изолированы от нее винипластовыми кольцами и резиновыми сальниками.

Пластины состоят из стальных ламелей-коробочек, по поверхности которых нанесены отверстия для доступа электролита к активной массе. Площадь отверстий по отношению к площади пластины (процент открытия ламельной ленты) составляет 12—15%. В результате не вся масса пластин участвует в работе, а масса аккумулятора значительно увеличивается. Пластины разной полярности одинаковы по конструкции и отличаются составом активной массы. У положительных пластин активной массой служит смесь гидроокиси никеля с добавкой графита для улучшения электропроводности, у отрицательных — смесь окиси железа с добавкой железного порошка.

У щелочных аккумуляторов сосуд находится под напряжением и поэтому снаружи покрывается слоем бакелизированной резины — гуммируется.

Железониッケлевые аккумуляторы имеют ряд существенных преимуществ перед кислотными: вероятность большего срока службы (до 10—12 лет); использование для изготовления менее дефицитных материалов; способность выдерживать большие зарядные и разрядные токи без ущерба для аккумулятора и без значительного снижения полезной емкости; отсутствие сульфатации, губительно действующей на кислотные аккумуляторы; большая механическая прочность; нечувствительность к замерзанию электролита; простота обслуживания и ремонта.

Масса щелочных аккумуляторов со временем будет значительно уменьшена в результате перехода на безламелльную конструкцию электрода. Разрабатываются конструкции пластин и технология их изготовления, допускающие возможность отказа от запрессовки активной массы в металлические ламели — изготовление «безламелльных» аккумуляторов.

Уход за батареями в эксплуатации сводится к доливке дистиллированной воды и содержанию аккумуляторов в чистоте. Аккумуляторы не требуют ремонта, который заменяется их промывкой (при содержании в электролите углекислоты более 17,5 г/л). Разработаны методы восстановления щелочных аккумуляторов, имеющих практически нулевую емкость.

В заряженном аккумуляторе активными элементами являются гидрат окиси никеля  $\text{NiO}$  (положительный электрод) и железо  $\text{Fe}$  (отрицательный электрод). В качестве электролита используется водный раствор едкого кали  $\text{KOH}$  или натра  $\text{NaOH}$  плотностью 1,19—1,21 г/см<sup>3</sup> с добавкой 20 г/л гидроокиси лития  $\text{LiOH}$ , улучшающей условия работы активной массы. Натриевый электролит рекомендуется для работы в повышенной температурой электролита, калиевый — при пониженных температурах. Калиевый электролит является универсальным и может работать при любых температурах.

Электролит щелочных аккумуляторов в реакции не участвует, плотность его во время работы батареи не изменяется. Это несколько осложняет контроль за состоянием батареи в эксплуатации. Недостатком щелочных аккумуляторов можно считать большую массу и плохую работу при понижении температуры электролита до 0 °C.

Для аккумуляторов обоих типов характерно снижение полезной емкости с увеличением тока разряда (рис. 81). У кислотных аккумуляторов это явление особенно резко выражено и связано со снижением плотности электролита в пограничных с пластинами слоях, что вызывает увеличение внутреннего сопротивления и падение напряжения в аккумуляторе, у щелочных — в процессе поляризации электродов. Увеличивается это явление при разряде батареи на стартерный (пусковой) электродвигатель, когда весь процесс протекает 5—20 с, т. е. за время, недостаточное для равномерной диффузии электролита в элементах. Емкость батареи, затрачиваемая на один пуск дизеля, не превышает 4 А·ч, но общая полезная емкость после пуска практически уменьшается в несколько десятков раз. С течением времени плотность электролита выравнивается и полезная емкость восстанавливается, хотя и не полностью. Поэтому не следует производить пуски дизеля один за другим без перерыва.

С понижением температуры проводимость электролита уменьшается, что приводит к росту потерь внутри батареи и ограничивает полезную емкость (рис. 82). Кроме того, при пониженной температуре увеличивается плотность электролита, ухудшается его циркуляция в аккумуляторе и снижается полезная емкость, которую может отдать аккумулятор при разряде. Особенно неблагоприятно сказываются эти зависимости на работе кислотных аккумуляторов, плотность электролита которых находится в прямой зависимости от степени заряда, и, следовательно, внутреннее сопротивление батареи зависит от остаточ-

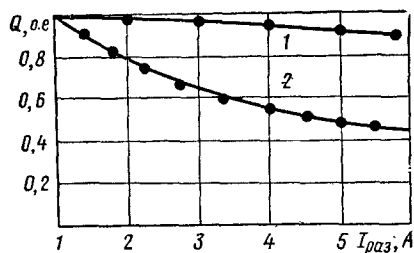


Рис. 81. Изменение полезной емкости аккумулятора при возрастании разрядного тока:

1 — щелочной аккумулятор; 2 — кислотный аккумулятор;  $I_{раз}$  — разрядный ток, численно равный емкости батареи

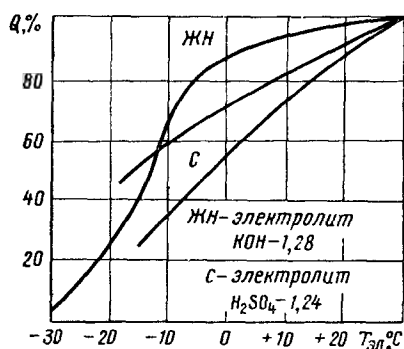


Рис. 82. Изменение полезной емкости аккумуляторов в зависимости от температуры электролита

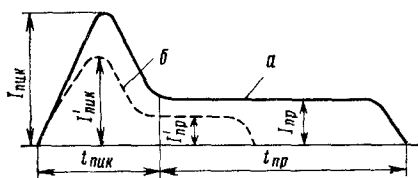


Рис. 83. Изменение тока аккумуляторной батареи при пуске дизеля:

а — пуск без ускорителя одной батареей; б — пуск с ускорителем двумя батареями, соединенными параллельно

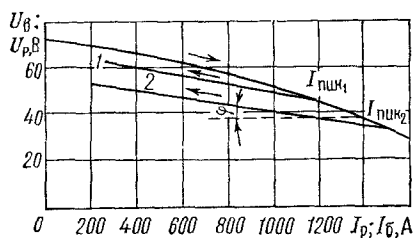


Рис. 84. Зависимость разрядных характеристик (1 и 2) аккумуляторов от пикового тока

ной емкости и плотности электролита одновременно. У щелочных аккумуляторов внутреннее сопротивление практически зависит только от остаточной емкости, поэтому работа щелочных элементов более устойчива.

Необходимость сохранения достаточного для пуска дизеля напряжения в любых условиях эксплуатации и при больших разрядных токах приводит к увеличению размеров и количества пластин в аккумуляторе. Одновременно с увеличением рабочей поверхности пластин возрастает номинальная емкость, так как увеличивается количество активных материалов. Рост номинальной емкости является в данном случае желательным, так как компенсируется снижение емкости под воздействием низкой температуры и разрядного тока. Однако это приводит к увеличению массы и стоимости аккумуляторов.

Существует несколько методов расчета емкости и внешних характеристик тепловозных аккумуляторов, равноценных по своей точности и практическому применению. Анализ всех существующих методов расчета показывает, что наиболее правильным является определение мощностных характеристик аккумуляторов. Для оценки пусковых свойств батареи необходимо определить, как изменяется ее пусковая мощность от ряда влияющих факторов. Расчет необходимой емкости (и как следствие мощности) аккумуляторов должен производиться с учетом электрических параметров энергетической цепи пуска и внешней характеристики аккумуляторов  $U_6 = f(I_6)$ . Пуск дизеля является сложным переходным процессом, и точный теоретический расчет его затруднителен. Более практичен расчет с использованием экспериментальных результатов. Для разрядного тока батареи характерен резкий бросок (пик тока) в первый момент разряда (рис. 83), который определяет рабочие характеристики батареи в последующий период пуска и последующий режим прокрутки вала дизеля до момента возникновения вспышек топлива в цилиндрах.

Как пиковый ток, так и ток прокрутки во много раз превышают нормальный разрядный ток аккумуляторов, что приводит к резкому уменьшению их полезной емкости.

Анализ процесса пуска дизеля показывает, что пиковый ток значительно превосходит необходимый для создания «момента отрыва» вала дизеля и может быть значительно уменьшен, что приведет к улучшению условий работы аккумуляторов без ухудшения пускового тока. Наибольшее распространение получило параллельное включение аккумуляторных батарей двух секций тепловоза. При такой схеме пуска пиковый ток аккумуляторов сокращается в 2 раза.

Могут быть использованы специальные схемы пуска с увеличенным индуктивным сопротивлением пусковой цепи (снижение пика тока до 35—40%) либо использование специальных схем включения пусковой обмотки, предварительного возбуждения генератора перед пуском, для создания магнитного потока независимо от пускового тока и т. д. Эти системы испытывались на тепловозах, начиная со Щ<sup>эп</sup> 1, но широкого распространения не получили.

Как показывает анализ, нет надобности и в режиме прокрутки вала. Режим прокрутки является следствием существующей конструкции регулятора частоты вращения (РЧВ) дизеля. Установка реек топливных насосов «на подачу» происходит только после того, как масляный насос РЧВ создаст необходимое давление под поршнем серводвигателя и переместит его на расстояние, обеспечивающее подачу топлива в цилиндры. Время, необходимое на эти процессы, и определяет время прокрутки, за которое происходит значительное уменьшение полезной емкости аккумуляторов. Значительный ток прокрутки (до 700—800 А) и необходимость получить при нем напряжение, обеспечивающее заданную частоту вращения вала дизеля, приводят к значительному увеличению массы аккумуляторов. В то же время условия в цилиндрах дизеля, необходимые для получения вспышки топлива, возникают уже после первого оборота коленчатого вала. Режим прокрутки при пуске может не быть, если к началу прокрутки вала установить рейки топливных насосов «на подачу». Для этой цели служат устройства, носящие название «ускорителей пуска». Конструкция их весьма разнообразна, зависит от типа двигателя и условий эксплуатации машины. На эксплуатируемых тепловозах применяется пусковой серводвигатель, облегчающий работу РЧВ при пуске дизеля, но обладающий существенным недостатком — потребностью в сжатом воздухе, что не всегда может быть обеспечено при пуске. Наиболее удачными являются системы, работающие от прокачки масла или топлива. На рис. 83 приведены кривые изменения тока аккумуляторов при пуске «обычным порядком» и с использованием параллельного включения батарей и ускорителем пуска. Видно, что условия разряда аккумуляторов значительно облегчились:  $I'_{\text{пик}} = 0,5 I_{\text{пик}}$ , то же для тока прокрутки. Время прокрутки с 10—20 с сократилось до 3—5 с.

Анализ процесса изменения тока и напряжения батарей при пуске дает возможность построить пусковые разрядные характеристики  $U_p = f(I_p)$  (рис. 84) проектируемого или подбираемого для тепловоза аккумулятора. Для расчета необходима внешняя характеристика аккумуляторной батареи, вид которой учитывает как конструкцию аккумуляторов, так и условия их работы при пуске (плотность электролита, степень заряженности и т. д.). Характеристика  $U_p = f(I_p)$  приближается к прямой, положение которой относительно внешней характеристики может быть определено уравнением

$$\text{tg}\varphi_p = k_t k_{\text{tg}} \text{tg}\varphi_0,$$

где  $k_t = \frac{Q(t)}{Q_0}$  — коэффициент, учитывающий уменьшение полезной емкости при понижении температуры электролита (может быть определен из рис. 81);

$k_I = \frac{Q(I)}{Q_0}$  — коэффициент, учитывающий уменьшение полезной емкости в зависимости от максимального тока, возникшего при разряде (определяется из рис. 82);

$\text{tg}\varphi_0 = r_1 = \frac{U_{\text{пик}}}{I_{\text{пик}}}$  — внутреннее сопротивление батареи при пиковом значении тока, определяется по внешней характеристике для батареи, находящейся в полностью заряженном состоянии и номинальных температурных условиях.

Пусковая разрядная характеристика дает возможность определить мощность батареи при пуске и уточнить напряжение, необходимое для получения скорости прокрутки. Ожидаемое значение пика тока находят обычным порядком с учетом индуктивности пусковой цепи, э. д. с. пускового электродвигателя, момента инерции вращающихся частей дизеля и связанных с его валом вспомогательных машин и момента сопротивления вала троганию с места.

При выборе аккумуляторов необходимо учитывать действие, оказываемое на них пиком тока, принимая все возможные меры для его уменьшения. На работоспособность аккумуляторов вредное действие оказывает их перезаряд. Признаками перезаряда является «кипение» электролита — выделение газа, образовавшегося в результате его разложения, и нагрев электролита, который не должен превышать  $+ 45^\circ\text{C}$ .

Работами ВНИИЖТа МПС установлено, что режим постоянного подзаряда, при котором эксплуатируется батарея на тепловозе, вредно отражается на ее сроке службы. Затраты энергии на пуск восстанавливаются вспомогательным генератором за 15—20 мин, после чего ток подзаряда проходит через полностью заряженную батарею. Избыточная энергия расходуется на разложение воды на кислород и водород. Кислород окисляет решетку пластин, вызывая электрохимическую коррозию материала решеток положительных пластин. Одновременно значительно увеличивается и их саморазряд.

Выделяющиеся в порах активной массы пузырьки газа имеют большое давление, воздействие которого на материал пластин вызывает их разрушение.

Для снижения перезаряда аккумуляторов ТН-450 устанавливается пониженное на 2—3 В напряжение вспомогательного генератора. Аналогично поступают и в отношении аккумуляторов ТПЖНҚ-250 и ТПЖН-550, перезаряд которых сопровождается выкипанием электролита, повышением температуры, вымыванием активной массы.

Пути повышения надежности тепловозных аккумуляторов и срока их службы зависят как от режимов их работы на тепловозах, так и от системы обслуживания и ремонта. Далеко не во всех локомотивных депо обслуживание аккумуляторов производится с учетом предъявляемых требований. Достижения в области использования, обслуживания и ремонта аккумуляторов дают возможность получить значительное увеличение их срока службы.

## 20. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Топливный элемент — это гальванический элемент, в котором химическая энергия топлива преобразуется электрохимическим путем в электрическую энергию. Топливо и окислитель при этом непрерывно и раздельно подводятся к двум пористым трубкам, которые одновременно служат электродами. Топливный элемент относится к первичным элементам, дающим ток, пока к ним подводятся активные вещества.

К топливу, которое можно использовать для подобных элементов, наряду с углем и углеводородами относятся также и вещества, получаемые из них простым путем (спирты, альдегиды, окись углерода и водород). Диапазон топлива, используемого в топливных элементах, непрерывно расширяется, имеется ряд

работ, доказывающих возможность использования в них дизельного топлива различных марок.

Эти новые источники энергии обладают рядом преимуществ. К ним относятся относительно малые удельные объем и масса, отсутствие движущихся частей, бесшумность и хорошая способность к перегрузке. Коэффициент полезного действия 30—70% растет с уменьшением нагрузки в противоположность двигателям внутреннего сгорания. Уже сейчас топливные элементы применяются на автомобилях, тракторах, судах. Имеются опытные, правда, маломощные тепловозы на топливных элементах. Мощности промышленных образцов достигают нескольких десятков киловатт.

В топливных элементах содержащаяся в топливе энергия за счет реакции окисления преобразуется в электрическую. Топливо и окислитель подводятся к соответствующим электродам. Благодаря электрохимической активности реагентов на них устанавливается определенный потенциал: топливный электрод становится отрицательным, кислородный электрод — положительным полюсом элемента. Электродвижущая сила  $E_0$ , возникающая на полюсах элемента, зависит от активных материалов (табл. 13).

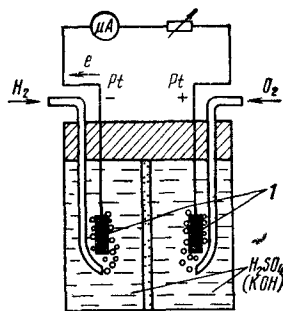


Рис. 85. Топливный элемент

Таблица 13

| Топливо        | Реакция                                                    | Электролит | $E_0$ В |
|----------------|------------------------------------------------------------|------------|---------|
| Водород        | $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$                              | HCl        | 1,37    |
| Пропан         | $C_3H_8 + SO_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$                  | $H_2SO_4$  | 1,085   |
| Окись углерода | $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$                    | KOH        | 1,33    |
| Метанол        | $CH_3OH + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$        | KOH        | 1,21    |
| Натрий         | $Na + \frac{1}{2} H_2O + \frac{1}{4} O_2 \rightarrow NaOH$ | KOH        | 1,12    |
| Уголь          | $C + O_2 \rightarrow CO_2$                                 | $N_2CO_3$  | 1,02    |

Из таблицы видно, что  $E_0$  топливных элементов находится на уровне э.д.с. щелочных аккумуляторов. Окислителем может быть как кислород, перекись водорода, так и простой воздух.

Принцип работы топливного элемента можно пояснить на примере водородно-кислородного элемента. В электролит с ионной проводимостью (серная кислота или калийная щелочь) погружены два платиновых электрода 1 (рис. 85). Один электрод омывается водородом (+), другой — кислородом (—). При соединении обоих полюсов через нагрузочный резистор на каждую прореагировавшую молекулу водорода от отрицательного полюса элемента текут два электрона к положительному полюсу, на котором они вступают в реакцию с адсорбированным кислородом. В отличие от обычного сгорания водорода и кислорода электрохимическое взаимодействие («холодное горение») происходит на двух отдельных друг от друга местах реакции.

Широкое внедрение топливных элементов сдерживается их довольно высокой стоимостью, которая, однако, имеет тенденцию к быстрому снижению. Можно предположить, что в будущем топливные элементы найдут применение на автономных локомотивах в качестве первичных источников электроэнергии.

## ГЛАВА 5

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

---

#### 21. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические аппараты тепловозов должны удовлетворять комплексу требований, предъявляемых к современным промышленным изделиям и специфическим условиям работы на тепловозе, которые могут быть объединены в следующие группы:

1. Функционально-технические требования: нагревостойкость частей аппарата при нормальном и аварийном режимах; электрическая прочность всех изоляционных частей и промежутков при продолжительном максимальном рабочем напряжении и наихудших условиях окружающей среды (влажность, пыль и пр.), а также при коммутационных перенапряжениях; механическая прочность и износостойкость всех частей аппарата в пределах необходимого срока службы при нормальном и аварийном режимах; коммутационная способность при нормальном и аварийном режимах; возможная простота конструкции, малые габариты и масса, компактность.

2. Эксплуатационные требования: учет влияния окружающих условий (требование, особо важное для тепловозной аппаратуры, которая должна устойчиво работать в условиях тряски, ударов, значительных ускорений и температуры от  $-50$  до  $+60$  °C, а также при возможных отклонениях напряжения питания (снижение до 80% номинального значения); надежность; долговечность, большой срок службы; простота и удобство наблюдения за работой, осмотром и заменой частей.

3. Социальные требования: облегчение условий труда обслуживающего персонала (эргономические, т. е. психофизиологические требования); безопасность в производстве, монтаже и эксплуатации; эстетичность конструкции.

4. Экономические требования: низкая стоимость аппарата; небольшие капиталовложения при установке, монтаже и вводе в эксплуатацию; низкие эксплуатационные расходы; учет возможности дальнейшего развития.

Среди тепловозной аппаратуры все больше появляется аппаратов, действие которых основано на использовании магнитных усилителей и полупроводниковых приборов. Отсутствие в этих аппаратах подвижных частей и контактов повышает их работоспособность, надежность, упрощает обслуживание и ремонт. Значительная часть электрооборудования унифицируется с промышленными типами, что весьма благоприятно сказывается на его стоимости. Переход на стандартное напряжение (110 В) цепей управления тепловозов дает возможность применять промышленное электрооборудование еще шире. Появляется возможность унифицировать большинство электрических аппаратов с электроподвижным составом. В связи с развитием новых видов электрических передач на тепловозах в электрических системах появляются аппараты переменного тока, что является новым для подвижного состава. Появляются комплексные устройства автоматики (КУА), собранные на бесконтактных элементах и заменяющие целые блоки контактной аппаратуры, свойственной современным тепловозам.

Существующая тепловозная электроаппаратура может быть условно разделена на группы, объединяющие аппараты по назначению.

*Коммутационные аппараты* — контакторы, реверсоры, контроллеры, разъединители и др.

*Реле* — аппараты, служащие для автоматического либо дистанционного замыкания электрических цепей при заданном определенном изменении расчетных параметров либо внешних воздействий. Большая группа реле выполняет защитные функции.

*Регуляторы* — аппараты, назначение которых срабатывать при изменениях контролируемой величины и воздействовать на другие аппараты и машины так, чтобы эта величина изменялась по заданному закону либо поддерживалась постоянной. Наибольшее распространение на тепловозах получили регуляторы напряжения и мощности.

*Группа вспомогательных элементов* — резисторы всех типов, зажимы, автоматы защиты низковольтных цепей, плавкие предохранители и т. д.

## 22. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Точный расчет электромеханических аппаратов связан с трудоемкими вычислительными работами. Известно, что зависимость индукции от напряженности поля для цепей со сталью нелинейна, а значение индукции в рабочих зазорах магнитопровода распределяется неравномерно. Необходимо учитывать сложность распределения магнитного поля в воздушных зазорах магнитопровода, а также пути рассеивания потока. От расположения катушки на сердечнике зависит распределение магнитных потоков в системе. Наконец, необходимо учитывать разницу в температуре отдельных частей аппарата. Применяемые в расчетах данные о материалах и размерах в условиях производства осуществляются с большими отклонениями. В инженерных методах расчета приемлем ряд допущений, упрощающих расчет и обеспечивающих достаточную точность: поле в рабочих зазорах принимается однородным, расчет производят по среднему значению индукции; проводимость воздушных зазоров и путей рассеивания вычисляется упрощенно; не учитывается расположение катушки в магнитопроводе по отношению к рабочему зазору.

**Катушки электрических аппаратов и реле.** Катушка должна обеспечить необходимую магнитодвижущую силу срабатывания электромагнита, температура ее нагрева при продолжительном режиме работы должна быть не выше предельно допустимой для принятого класса изоляции, иметь заданную диэлектрическую прочность, быть компактной и удобной для производства. В зависимости от конструкционного выполнения различают катушки каркасные, намотка которых осуществляется на каркасе; бескаркасные бандажированные — намоткой на съемный шаблон (после намотки катушки бандажируют); бескаркасные с намоткой на сердечнике магнитной системы; бескаркасные небандажированные.

Материалы, применяемые для изготовления катушек, можно разделить на следующие группы:

1. *Обмоточные провода* (ГОСТ 7019—71). Катушки изготовляют из медной круглой проволоки диаметром 0,1—3 мм; при площади сечения, превышающей 10 мм<sup>2</sup>, используют квадратную проволоку, а в некоторых случаях полосу медь. Для намоточной проволоки применяется изоляция следующих видов: хлопчатобумажная — выпускается с одним слоем изоляции (типа ПБО) и с двумя слоями (ПБД); шелковая — с одним слоем (ПШО) и двумя (ПШД); эмалевая (ПЭ); лавсановая — с одним слоем (ПЛО) и двумя (ПЛД); асбестовая (ПА); стекловолокно — с одним слоем (ПСО) и двумя (ПСД); винифлексовая (ПЭВ). Возможно применение комбинированной изоляции: ПЭБО — слой эмали и слой хлопчатобумажной изоляции; ПТЭ — теплостойкая (Т) эмале-

Таблица 14

| Материал изоляции                     | Классы изоляции и типы проводов |              |              |
|---------------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|
|                                       | А до 105 °С                     | В до 130 °С  | Ф до 155 °С  |
| Эмалированные                         | ПЭЛ; ПЭВ;<br>ПЭВА               | ПЭТВ         | ПЭТ-2; ПЭТВА |
| Эмалированные с волокнистой изоляцией | ПЭЛБО, ПЭЛО;<br>ПЭЛШКО          | ПЭТЛО; ПЭТСО | ПЭТКСО       |
| С волокнистой изоляцией               | ПБД, ПЛБД;<br>ПШКД              | —            | —            |

вая; ПЭШО — слой эмали и слой шелковой изоляции. Распределение изоляции проводов по классам нагревостойкости приведено в табл. 14.

Диаметр проволоки (табл. 15) для катушки аппарата выбирается в зависимости от условных коэффициентов  $w_0$  и  $C_0$ . При заданном числе витков катушки

$$w_0 = \frac{w}{l_n h_n}.$$

При заданном сопротивлении катушки

$$C_0 = \frac{r}{l_n h_n (D_n + h_n)}.$$

После вычисления  $w_0$  или  $C_0$  диаметр проволоки определяется по табл. 15 с округлением до ближайшего значения. Во всех случаях предварительно необходимо выбрать габаритные размеры проектируемой катушки  $l_n$ ,  $h_n$ ,  $D_n$ , которые в дальнейшем могут быть откорректированы.

2. *Рулонные, листовые и ленточные электроизоляционные материалы.* Это материалы, изолирующие обмоточные токоведущие провода снаружи катушек и отдельные элементы обмотки внутри них. Основными из этих материалов являются ткани, лакоткани, изоляционные ленты, изоляционные бумаги (табл. 16).

3. *Лаки, компаунды и эмали.* Употребляются для операций отделки для увеличения водо- и маслостойкости, а также механической прочности кату-

Таблица 15

| Диаметр проволоки, мм |             | $w_0$ | $C_0 \cdot 10^{-3}$ | Диаметр проволоки, мм |             | $w_0$ | $C_0 \cdot 10^{-3}$ |
|-----------------------|-------------|-------|---------------------|-----------------------|-------------|-------|---------------------|
| голой меди            | с изоляцией |       |                     | голой меди            | с изоляцией |       |                     |
| 0,08                  | 0,095       | 99,0  | 800                 | 0,35                  | 0,390       | 6,74  | 3,86                |
| 0,10                  | 0,120       | 69,1  | 484                 | 0,38                  | 0,420       | 5,73  | 2,78                |
| 0,12                  | 0,140       | 51,0  | 248                 | 0,44                  | 0,485       | 4,25  | 1,54                |
| 0,14                  | 0,160       | 39,1  | 140                 | 0,47                  | 0,515       | 3,47  | 1,20                |
| 0,16                  | 0,180       | 30,7  | 83,9                | 0,51                  | 0,560       | 3,23  | 0,871               |
| 0,20                  | 0,225       | 20,0  | 35                  | 0,55                  | 0,600       | 2,79  | 0,647               |
| 0,23                  | 0,255       | 15,25 | 20,2                | 0,64                  | 0,690       | 2,08  | 0,356               |
| 0,27                  | 0,305       | 10,76 | 10,33               | 0,69                  | 0,740       | 1,80  | 0,235               |
| 0,29                  | 0,325       | 9,46  | 7,87                | 0,74                  | 0,800       | 1,57  | 0,201               |
| 0,31                  | 0,350       | 8,53  | 6,23                | 0,80                  | 0,860       | 1,35  | 0,148               |

Примечание. Диаметр проволоки с изоляцией показан для типа ПЭЛ. Для ПЭВ-1 для диаметров голой меди до 0,23 мм максимальный диаметр следует увеличить на 0,01 мм.

| Изоляционный материал катушки | Марка | Толщина, мм | Нагревостойкость, °C | Рабочее напряжение, В |
|-------------------------------|-------|-------------|----------------------|-----------------------|
| Конденсаторная бумага         | КОН-1 | 0,005       | 90                   | 25                    |
| То же                         | КОН-2 | 0,03        | 90                   | 56                    |
| Телефонная бумага             | КТН   | 0,05        | 90                   | 50                    |
| Кабельная »                   | К-08  | 0,08        | 90                   | 60                    |
| То же                         | К-17  | 0,17        | 90                   | 120                   |
| Лакированная бумага           | —     | 0,10        | 105                  | 300                   |
| Лакоткань хлопчатобумажная    | ЛХ1   | 0,15        | 105                  | 210                   |
| » шелковая                    | ЛШС   | 0,05        | 105                  | 100                   |
| То же                         | ЛШ1   | 0,10        | 105                  | 300                   |
| »                             | ЛШ2   | 0,10        | 105                  | 200                   |
| Стеклоткань                   | ЭСТБ  | 0,04        | 180                  | 40                    |
| Стеклолента бесщелочная       | —     | 0,10        | 300                  | 70                    |
| Стеклолакоткань               | ЛСК-7 | 0,15        | 180                  | 300                   |
| Фторопласт-3                  | —     | 0,04        | 280                  | 200                   |
| Триацетатная пленка           | —     | 0,05        | 100                  | 400                   |
| Полистирол                    | —     | 0,05        | 80                   | 250                   |
| Полиэтилен                    | —     | 0,05        | 100                  | 220                   |
| Полихлорвинил                 | —     | 0,05        | 65                   | 250                   |
| Капрон, нейлон                | —     | 0,05        | 100                  | 150                   |

шек. Условно можно различать основную и дополнительную отделки. К основной относится пропитка лаками и компаундами. Пропитка лаками пористой изоляции повышает пробивное напряжение и теплопроводность, уменьшает гигроскопичность. Для этой цели используются лаки с большим количеством летучих растворителей (50—60%), вследствие чего при просушке образуются поры.

Компаундировка катушек производится пропиточными компаундами при 150—160 °C и избыточном давлении до 700 кПа. Компаунд, заполняя все поры, образует монолитную массу. Создается надежное, механически прочное сцепление между отдельными витками, что особенно важно для катушек, работающих с большой частотой включения, так как в этом случае происходит истирание изоляции витков, вызываемое взаимным перемещением проволоки при включении и выключении катушек. Пропиточные компаунды обладают малой усадкой и содержат незначительное количество растворителей.

Катушки аппаратов, не имеющих кожуха, после пропитки подвергают дополнительной отделке, заключающейся в покрытии наружной поверхности тонким слоем лакоткани с небольшим нахлестом для склейки концов полотна, или покрывают покровными лаками типа СВД воздушной сушки. Образующаяся на поверхности прочная пленка повышает водо- и маслостойкость изоляции, уменьшает приставание к катушке пыли и грязи, улучшает ее внешний вид.

При расчете катушек требуется определить геометрические размеры, толщину намотки, температуру нагрева. Для этого пользуются рядом коэффициентов.

*Коэффициентом заполнения катушки* называется отношение площади сечения меди  $q_m$  ко всей площади сечения катушки  $q_k$  (рис. 86):

$$f_k = \frac{q_m}{q_k} = \frac{\pi d^2 w}{2l_k (D_k - D_b)}$$

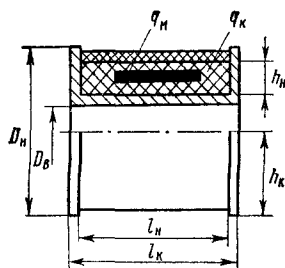


Рис. 86. Схема катушки электрического аппарата

При конструировании катушки желательно получить максимальный коэффициент заполнения, значение которого зависит от материала изоляции катушки, формы сечения и изоляции проволоки, размеров ее и вида намотки. Различают намотки катушек: шахматную, рядовую и намотку без точной укладки (беспорядочную) (рис. 87). Число витков катушки при шахматной намотке

$$\omega_{\text{ш}} = \frac{h_{\text{н}} l_{\text{н}}}{0,86 d^2},$$

при рядовой

$$\omega_{\text{р}} = \frac{h_{\text{н}} l_{\text{н}}}{d^2}.$$

В процессе изготовления катушки возникают неплотности между витками, учитываемые при расчете коэффициентом укладки  $k_{\text{у}}$ , значение которого находится в пределах 0,8—0,9 для беспорядочной намотки и 0,90—0,95 — для рядовой и шахматной.

Коэффициент заполнения намотки  $f_{\text{н}}$  учитывает пространство, занимаемое непосредственно обмоткой, — площадку  $h_{\text{н}} l_{\text{н}}$  (см. рис. 86), а также коэффициент укладки  $k_{\text{у}}$ . Значение  $f_{\text{н}}$  находят в зависимости от исполнения намотки (рис. 88).

Для намотки без прокладок (рис. 88, а)

$$f_{\text{н}} = k_{\text{у}} \frac{\pi d^2}{4 d_1^2};$$

для намотки с прокладками толщиной  $\delta$  через слой (рис. 88, б)

$$f_{\text{н}} = k_{\text{у}} \frac{\pi d^2}{4 d_1 (d_1 + \delta)}$$

С учетом  $f_{\text{н}}$  и  $k_{\text{у}}$  коэффициент заполнения катушки

$$f_{\text{к}} = f_{\text{н}} \frac{l_{\text{н}} h_{\text{н}}}{l_{\text{к}} h_{\text{к}}}$$

и, следовательно, возможное число витков катушки  $\omega'$  при выбранных ее размерах

$$\omega' = \frac{4 h_{\text{к}} l_{\text{к}}}{\pi d^2} f_{\text{к}}.$$

Для катушек электрических аппаратов локомотивов  $f_{\text{к}} = 0,35 \div 0,57$ , причем меньшие его значения соответствуют небольшим диаметрам проволоки. Получив  $\omega'$ , нужно сравнить его с необходимым для работы аппарата числом витков  $\omega$ . При  $\omega < \omega'$  возможно изготовить катушку в первоначально выбранных габаритах.

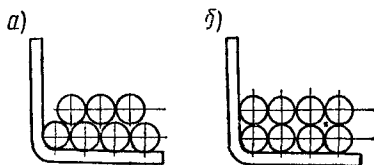


Рис. 87. Виды намотки катушек:  
а — шахматная; б — рядовая

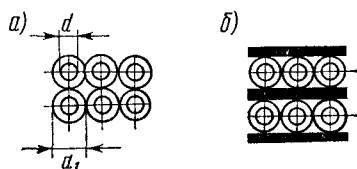


Рис. 88. Укладка проволоки в катушке:

а — без изоляционных прокладок; б — с изоляционными прокладками

Таблица 17

| Расположение катушки      | и °С при $\theta$ , °С |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 40                     | 45    | 50    | 55    | 60    | 65    | 70    | 75    | 80    | 85    |
| На стальном сердечнике    | 11,0                   | 11,12 | 11,41 | 11,62 | 11,8  | 12,04 | 12,25 | 12,46 | 12,68 | 12,89 |
| На изоляционном материале | 9,84                   | 10,01 | 10,19 | 10,37 | 10,54 | 10,72 | 10,99 | 11,17 | 11,35 | 11,52 |

Нагрев катушки определяется падением напряжения в ней при протекании тока. Предельно допустимые температуры нагрева лимитируются классом изоляционных материалов. Превышение температуры выше допустимой на 10—12 °С приводит к интенсивному старению изоляции и сокращению срока службы катушки вдвое (средний срок службы изоляции 10 лет). Основное уравнение для расчета катушек на нагрев имеет вид

$$I^2 r = \mu_{\theta} S \theta,$$

где  $S$  — поверхность охлаждения катушки (наружная и внутренняя), м<sup>2</sup>;

$\theta$  — превышение температуры катушки — разность между средней ее температурой и температурой окружающей среды, °С;

$\mu_{\theta}$  — удельный коэффициент теплоотдачи Вт/(м<sup>2</sup>/°С). Значение  $\mu_{\theta}$  определяют в зависимости от температуры перегрева с учетом условий охлаждения катушки по табл. 17, составленной на основании экспериментов.

Если учесть конструкцию катушки и место ее расположения в аппарате, то определить температуру перегрева можно по уравнению

$$I^2 r = \mu_{\theta} (S_{\text{в}} + \alpha S_{\text{н}}) \theta,$$

где  $S_{\text{в}}$ ,  $S_{\text{н}}$  — внутренняя и наружная поверхности катушки, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  — коэффициент, учитывающий расположение катушки; для катушки, намотанной на картон, и бескаркасной  $\alpha = 0,9$ ; для катушки намотанной на стальной сердечник,  $\alpha = 2,4$ ; для катушки, намотанной на стальной трубчатый сердечник,  $\alpha = 1,7$ .

Омическое сопротивление катушек

$$r = \rho \frac{l_{\text{ср}}}{q} 10^{-3},$$

где  $q$  — площадь сечения голой проволоки, мм<sup>2</sup>;

$\rho$  — удельное сопротивление меди, имеет следующие значения:

|                                                                           |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Рабочая температура катушки, °С                                           | 20    | 35    | 40    | 90    | 105   | 120   |
| Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·м/(мм <sup>2</sup> ·10 <sup>-3</sup> ) | 17,54 | 18,57 | 19,91 | 22,36 | 23,39 | 24,43 |

$$\text{Средняя длина витка } l_{\text{ср}} = \frac{\pi (D_{\text{в}} + D_{\text{н}})}{2}.$$

При небольших изменениях диаметра проволоки, например при перемотке сторевшей катушки, коэффициент заполнения меняется незначительно, поэтому в первом приближении можно принять обмоточное пространство неизменным. Число витков при прежнем сопротивлении катушки можно определить по формуле

$$r = \frac{\pi \rho \cdot 10^{-3}}{l_{\text{в}} h_{\text{в}} l_{\text{н}}} (D_{\text{в}} + h_{\text{н}}) w^2.$$

Новые размеры обмоточного пространства могут быть уточнены.

Индуктивность катушки, питаемой постоянным током при ненасыщенной магнитной системе, равна  $L = \omega^2 G_{\Sigma\delta} (G_{\Sigma\delta} — \text{проводимость воздушных зазоров магнитной системы аппарата}).$

**Контактные соединения.** *Контактом* называют место соединения проводников. Конструкционный узел, в котором осуществляется соединение двух или более проводников, называется *контактным соединением*. Контактные соединения разделяются на подвижные и неподвижные. Неподвижные контактные соединения не разъединяются в процессе работы. К ним относятся соединения болтами, пайкой, промежуточные зажимы, соединения вывода катушки (флажка) с проводом и т. д. Контактное нажатие в этих соединениях определяется силой затяжки болтов.

Подвижные контактные соединения могут разъединяться во время работы аппарата. По конструктивному исполнению они разделяются (рис. 89) на мостиковые, клиновые, скользящие линейные и точечные. Характерным для всех контактных соединений является наличие в месте контакта переходного сопротивления  $R_{\pi}$ , которое зависит от материала контактов, силы нажатия, температуры и состояния контактных поверхностей.

Приблизленно переходное сопротивление линейного контакта может быть вычислено по формулам

$$R_{\pi} = \frac{\rho}{2a}; \quad a = \sqrt{\frac{F_{\kappa}}{\pi HB}},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала контакта;

$F_{\kappa}$  — сила нажатия контактов;

$HB$  — твердость материала контактов по Бринеллю.

При нагревании контакта переходное сопротивление увеличивается:

$R_{\pi\theta} = R_{\pi} [1 + \frac{2}{3} \alpha (\theta - 20)]$ , где  $\alpha$  — температурный коэффициент материала контактов; для меди  $\alpha = 5$ ; для серебра  $\alpha = 4,1$  мкОм·см.

Сила нажатия в контакте и ширина контакта могут быть определены из экспериментальных зависимостей, на основании которых принимают: для электропневматических контакторов  $I/F_{\kappa} = 0,9 \div 0,7$  А/Н;  $I/b = 16\,000 \div 30\,000$  А/м; для электромагнитных контакторов  $I/F_{\kappa} \leq 6$  А/Н;  $I/b \leq 15\,000$  А/м. Для блокировок реле сила нажатия составляет 1,0—2,5 Н. Предельный ток в цепи аппарата определяется допустимой температурой нагрева, которую находят, полагая, что максимально допустимое падение напряжения на контакте  $\Delta U_{\kappa} = 0,09 \div 0,13$  В. Номинальное значение тока через контакт устанавливают на 20—30% ниже полученного максимального значения.

**Магнитная система.** Магнитная цепь состоит из магнитопровода с насаженной на нем катушкой. При проектировании реле или контактора задачей расчета магнитной системы является определение магнитодвижущей силы (м.д. с.) катушки, требуемой для создания в системе магнитного потока и тягового усилия на якорь механизма заданной величины.

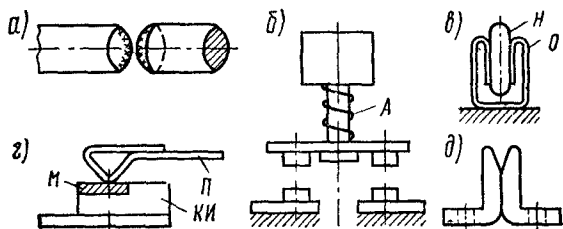


Рис. 89. Контактные соединения:

а — точечное; б — мостиковое; в — клиновое; г — скользящее; д — линейное. М — медная пластина; КИ — изоляционная колодка; А — пружина; О — оправка; Н, П — подвижные контакты

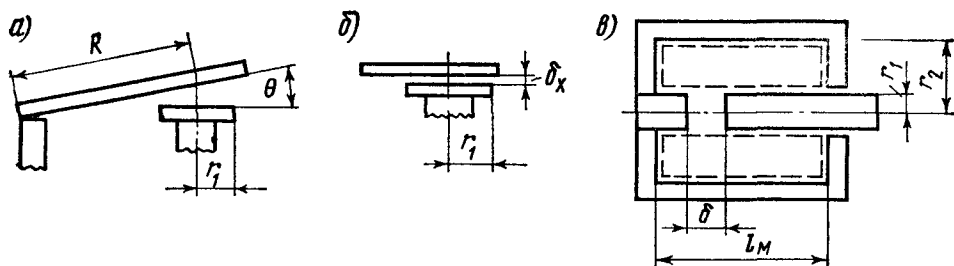


Рис. 90. Рабочие воздушные зазоры электрических аппаратов:  
а — с поворотом якоря; б и в — прямоходовые системы

Расчет магнитной цепи заключается в определении падения магнитного потенциала в элементах магнитопровода и воздушных зазорах отдельно для каждого участка цепи по формулам:

для стали

$$F_c = Hl = \frac{\Phi}{\mu_c q_c} l;$$

для воздуха

$$F_b = H\delta = \frac{\Phi}{\mu_o q_b} \delta,$$

где  $\mu_o$ ,  $\mu_c$  — магнитные проницаемости стали и воздуха соответственно;

$\delta$  — величина воздушного зазора;

$l$  — длина участка магнитной цепи.

Зависимость между магнитным потоком  $\Phi$ , магнитодвижущей силой  $F$  и проводимостями участков магнитной цепи  $G_\Sigma$  выражается уравнением

$$\Phi = \frac{F}{\frac{l_1}{\mu_1 q_1} + \frac{l_2}{\mu_2 q_2} + \dots + \frac{\delta_1}{\mu_o q'_1} + \frac{\delta_2}{\mu_o q'_2}} = FG_\Sigma.$$

В простейшем случае при наличии равномерного магнитного поля между двумя параллельными плоскостями большой протяженности проводимость воздушного зазора определяется отношением площади  $q$  (сечения потока) к длине  $\delta$  (пути линии поля в воздухе):

$$G_b = \mu_o \frac{q}{\delta},$$

где  $q$ ,  $\delta$ , м;  $\mu_o = 1,25 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.

При расчете электромагнитных приводов определение проводимости воздушных зазоров затруднено в основном из-за различных конфигураций применяемых элементов.

Для наиболее распространенных в тепловозных аппаратах видов зазоров (рис. 90) даны соответствующие им расчетные формулы проводимостей:

$$G = \mu_o \frac{\pi r_1^2}{\theta R}; \quad G = \mu_o \frac{\pi r_1^2}{\delta_x}; \quad G = \mu_o \frac{\pi r_1^2}{\delta} + \mu_o \frac{4r_1}{\delta/m + 1} + 1,63\mu_o r_1.$$

Значение  $m$  можно найти из выражения  $\pi(m + \frac{\delta}{2}) = 2(r_2 - r_1)$ . Зная проводимость воздушного зазора, можно в зависимости от поставленной задачи найти  $\Phi$  либо  $F$ .

Падение магнитного потенциала в стали магнитопровода определяют обычным порядком. Сначала вычисляют индукцию

$$B_c = \frac{\Phi}{k_c q},$$

где  $k_c$  — коэффициент, учитывающий, что магнитопровод набран из отдельных пластин электротехнической стали;  $k_c = 0,95$  для листов, покрытых лаком,  $k_c = 0,9$  для листов, оклеенных бумагой.

Магнитопровод изготовляют из отдельных листов для аппаратов, работающих на переменном токе, либо универсальных. Затем по кривой  $B = f(H)$  находят  $H$  в зависимости от выбранного материала магнитопровода. Для изготовления магнитопроводов электромагнитов постоянного и переменного тока применяют магнитомягкие низкоуглеродистые материалы: низкоуглеродистые тонколистовые отожженные стали Э, ЭА, ЭАА; кремнистые стали Э11, Э21, Э31 и т. д. У электромагнитов средних размеров при отсутствии жестких требований к снижению коэрцитивной силы и высокой магнитной проницаемости детали магнитопровода изготовляют из конструкционной низкоуглеродистой стали 05, 08, 10. Для магнитопроводов регуляторов применяют материалы с малой коэрцитивной силой — кремнистые электротехнические стали (Э330, Э320, Э44, Э340 и др.). Падение м. д. с. на участке магнитопровода  $F_{сн} = H_{п} l$ . При предварительных расчетах, когда  $\Phi$  неизвестно, значением индукции можно задаться, приняв ее 4—10 Тл.

Как правило, расчету электромагнитной системы предшествует построение кинематической схемы аппарата (рис. 91), на основании которой строятся или задаются характеристики противодействующих  $M_3 = I_3 F_3$  и рабочих  $M_c = I_c Q$  моментов (рис. 92). Участок  $c-d$  соответствует моменту касания рабочих контактов аппарата и резкому увеличению в связи с этим момента сопротивления  $M_c$ . Для успешной работы аппарата при любых возможных в эксплуатации условиях необходимо иметь  $M_c > M_3$ .

Сила притяжения поверхностей двух тел из магнитного материала, между которыми протекает поток  $\Phi$ , выражается формулой Максвелла

$$Q = \frac{\Phi^2}{8\pi q} 10^{-5}.$$

Формула справедлива для случая однородного поля. В первом приближении существующее поле аппарата может быть принято однородным. При проведении точных расчетов формула применима для вычисления сил в конечном положении якоря, когда зазор  $\delta$  невелик.

Для системы постоянного тока уравнение может быть приведено к виду  $Q = 4,06 \cdot 10^3 B_p^2 q$ , где  $B_p$ , Вб/см<sup>2</sup>. Для системы переменного тока

$$Q = 2,03 \cdot 10^3 \frac{\Phi^2}{\sigma^2 q},$$

где  $\delta$  — поток рассеивания, 15—20% от  $\Phi$ .

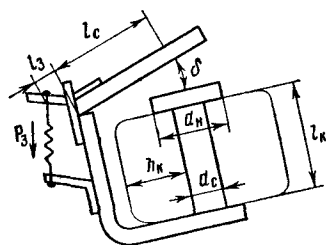


Рис. 91. Кинематическая схема реле

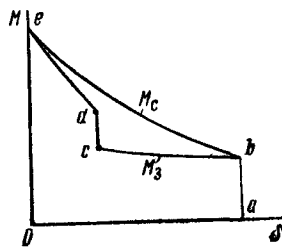


Рис. 92. График моментов, действующих на якорь реле контактора:  
 $M_c$  — момент сопротивления;  $M_3$  — включающий момент

**Дугогасящие устройства.** Аппараты, предназначенные для разрыва цепей, по которым проходит большой ток, снабжаются дугогасительными камерами с магнитным дутьем. Принцип гашения дуги основан на взаимодействии магнитного поля дугогасительной катушки и электрической дуги, при котором возникает сила, выталкивающая дугу из магнитного поля. Магнитное поле создается дугогасительной катушкой  $K$  (рис. 93), включенной последовательно с рабочими контактами. Область горения дуги с двух сторон охвачена полюсами  $\Pi$ , которые замкнуты сердечником с катушкой  $K$ . Полюсы защищены от действия дуги изоляцией (как правило, асбоцемент).

В результате взаимодействия магнитных полей дуги и катушки  $K$  возникает сила, перемещающая дугу внутрь дугогасительной камеры. Дуга перебрасывается на рога  $P_1$  и  $P_2$ , удлиняется и быстро гаснет. Иногда в камере устанавливаются продольные или поперечные перегородки. Дуга в этом случае разделяется перегородками на ряд последовательных участков, которые быстро гаснут из-за увеличения катодного падения напряжения в дуге. Магнитодвижущая сила дугогасительной катушки выбирается в пределах  $F_{\text{дк}} = (3,6 \div 4,0) B_{\text{в}} l_{\text{в}}$ , где  $B_{\text{в}}$  — индукция в зоне контакта, принимается  $\approx 0,01$  Тл;  $l_{\text{в}}$  — длина воздушного зазора (ширина дугогасительной камеры), м.

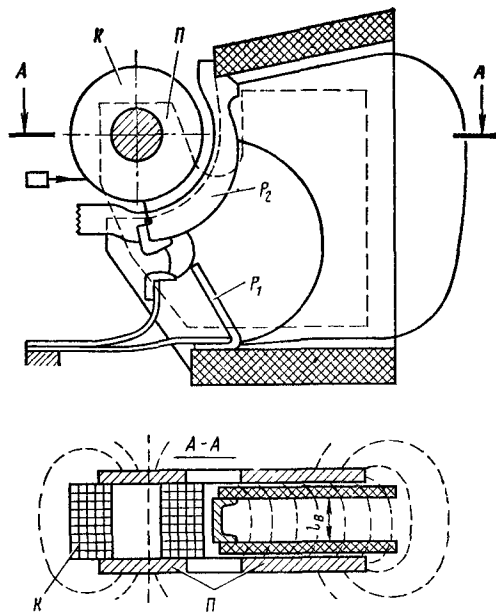


Рис. 93. Схема электромагнитного гашения электрической дуги

### 23. КОММУТАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ

**Контакты.** Электрические аппараты с приводом дистанционного управления, предназначенные для повторных замыканий и размыканий отдельных участков электрических цепей, называются контакторами. Разновидностью контакторов являются реле управления, которые устанавливаются, как правило, в низковольтных цепях управления с небольшими токами.

На тепловозах применяются следующие типы контакторов.

**Электропневматические контакторы** устанавливают в цепях с большими токами, так как они дают возможность получать большие контактные нажатия при относительно небольших габаритах и массе. Нажатие контактов контактора при избыточном давлении воздуха в цилиндре привода 0,5 МПа находится в пределах 550—650 Н. Контакторы типа ПК (пневматический контактор) используют на тепловозах для отсоединения неисправного тягового двигателя и разрыва цепи тяговых двигателей при пуске дизеля. Особо велико значение их в цепях тепловозов, имеющих переключение тяговых двигателей.

Электропневматический контактор ПК-753-Б (рис. 94) применен на отечественных тепловозах всех серий. Число блокировочных контактов 2 обозначается последней цифрой марки контактора. Например, ПК-753-Б6 имеет шесть блокировочных пальцев.

Блокировочное устройство 3 состоит из стальных пальцев и контактной подвижной колодки, связанной с рычагом 4. В контакторах ПК-753-Б послед-

них выпусков незначительно изменена конструкция (применяются другие материалы для манжет 6 цилиндра 5 — резина вместо кожи, ситалловые вставки в асбоцементных стенках дугогасительной камеры 1 и т. д.) для увеличения надежности аппарата.

*Групповые электропневматические* контакторы применяют на тепловозах ТЭ10, 2ТЭ10Л, ТЭП60, ТЭ116 для включения цепей шунтировки поля тяговых двигателей. Контактторы ПКГ (групповые) малогабаритны, имеют прямоходную подвижную систему 1 и мостиковые контакты 2. Подобная конструкция ПКГ-560 (рис. 95) позволила устранить рычажную передачу от привода к подвижным частям и гибкие токоведущие соединения, подвижные мостиковые контакты укреплены на изоляционных планках 3, связанных с подвижной частью (штоком) привода 4. Основные контакты выполняются дугостойкими с металлокерамическими напайками из материала СОК-15 (15% серебра, 85% окиси кадмия). Небольшое напряжение на контактах и применение дугостойких материалов для их изготовления дали возможность отказаться от дугогасительных камер, что привело к снижению массы аппарата.

*Электромагнитные контакторы* применяют в цепях пуска дизеля, ослабления возбуждения, включения электрических машин вспомогательных агрегатов. Характерным для контактора является наличие электромагнита 1, который создает тяговое усилие. Электромагнитные контакторы весьма разнообразны по конструкции, однако принципиальных отличий между ними нет. Наиболее распространены контакторы КРВ-604 (рис. 96) в цепях пуска дизеля и ТКПМ-111 или ТКПМ-121 (рис. 97), который отличается от ТКПМ-111 наличием двух силовых контактов 6.

Контактор собран на панели 5 из трех отдельных узлов: дугогасительного устройства 4, магнитной системы с якорем 3 и колодки блок-контактов 2. Рабочий ток контактора до 80 А при напряжении 75 В. Нажатие в контакте до 10 Н. Для цепей пуска и шунтировки применяют контакторы, рассчитанные на рабочие токи до 300—400 А (кратковременные режимы до 2000 А) при нажатии в контакте до 70—80 Н. Начинают применять контакторы промышленного исполнения для цепей трехфазного переменного тока (на тепловозах ТЭ116, ТЭП70 и др.).

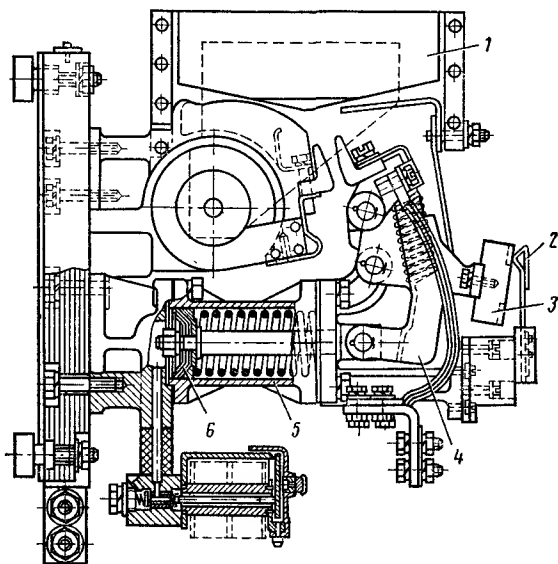


Рис. 94. Контактор ПК-753Б

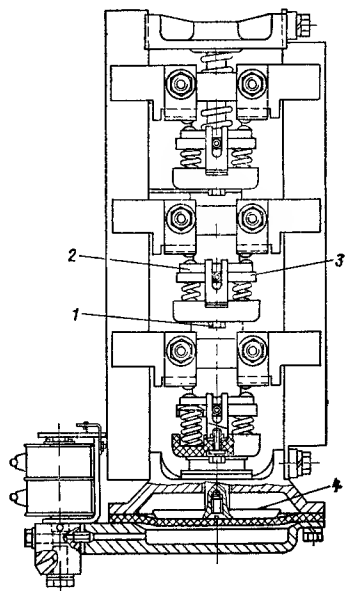


Рис. 95. Групповой контактор ПКГ-560

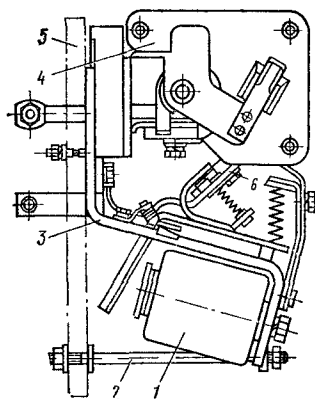


Рис. 96. Контактор КPB-604

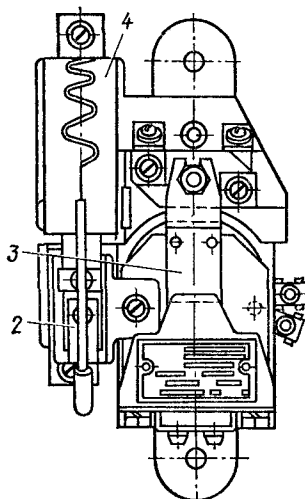
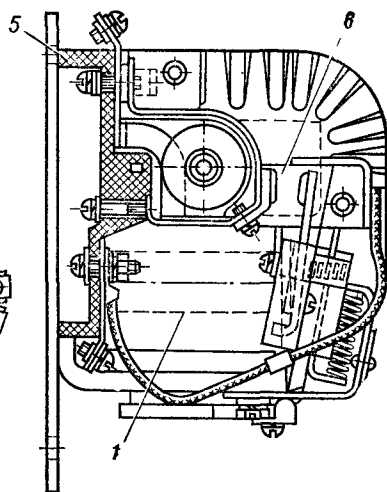


Рис. 97. Контактор ТКPM-111



В цепях управления широкое распространение получило реле управления Р-45, собираемое из узлов контактора вспомогательных цепей КРМ-220. Реле Р-45 является основой для некоторых специальных реле систем защиты и управления тепловоза. Конструкция реле Р-45, его масса и габариты не удовлетворяют современным требованиям. На тепловозах все шире начинают применяться малогабаритные промышленные реле, которые в несколько раз меньше и легче реле Р-45. Все контакторы являются типичными электромеханическими аппаратами.

**Реверсоры.** *Реверсоры* — аппараты силовой цепи, предназначенные для изменения направления тока в обмотках тяговых двигателей и, следовательно, направления движения тепловозов. Напряжение между контактами реверсора равно напряжению на участке цепи между контактами. Поэтому в большинстве случаев его включают в цепь обмоток возбуждения тяговых двигателей, так как на них имеется только падение напряжения, не превышающее 20—30 В. Реверсоры выполняют без дугогашения и поэтому переключение цепи может производиться только при отсутствии в ней тока, т. е. при остановленном тепловозе. Перевод реверсора на ходу тепловоза приводит к значительному обгоранию его контактов. На тепловозах применяются реверсоры барабанные ПР и кулачковые ППК.

*Барабанные реверсоры* ПР-758А-1 (ПР-1М) установлены на тепловозах ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ1, ТЭЗ. Они состоят из сегментного барабана, укрепленного на изолированном шестигранном валу, и контактных пальцев. При работе барабан занимает одно из крайних фиксированных положений в зависимости от выбранного направления движения. В первом положении, например «Вперед», (рис. 98, а), цилиндрические сегменты С1 соединяют контактные пальцы П1 и П2, во втором сегменты С1 размыкаются, а сегменты С2 замыкают контактные пальцы П2, изменяя направление тока в обмотках возбуждения тяговых электродвигателей, что соответствует движению тепловоза «Назад».

*Кулачковые реверсоры* типа ППК-8601 устанавливаются на тепловозах ТЭ10, 2ТЭ10Л, ТЭП60, ТЭМ2. Аналогичным является реверсор ППК-8064, установленный на тепловозах ТЭ116. Реверсоры состоят из кулачковых сегментов и контактных групп по числу тяговых двигателей. В каждую контактную группу входят четыре подвижных и четыре неподвижных контакта. Подвижные контакты смонтированы на двух рычагах, каждый из которых управляется

пластмассовой шайбой. Шайбы имеют форму, обеспечивающую одновременное замыкание только двух пар контактов каждой группы. Переключение реверсора происходит путем поворота центрального вертикального вала и связанных с ним подвижных контактов. Принципиальная схема функционирования реверсора приведена на рис. 98, б. При повороте вала реверсора кулачковая шайба нажимает на ролик, выполненный в виде игольчатого подшипника, и поворачивает рычаг вокруг оси до замыкания контакторов. Профиль шайбы выбран так, что контакты остаются замкнутыми даже при отсутствии воздуха в цилиндрах привода.

Поворот валов реверсоров обоих типов осуществляется *пневматическими двухпозиционными приводами диафрагменного типа*. Диаметры цилиндров на тепловозах различных серий различны. Положение реверсора определяется поступлением воздуха из резервуара управления в ту или иную полость привода. Воздух в цилиндры привода поступает через электромагнитные клапаны, получающие питание с пальцев барабана ручки управления реверсором, расположенной на пульте управления тепловозом. В нейтральное положение реверсоры устанавливают только вручную. Это положение используется при перемещении тепловоза в «холодном» состоянии. Главный вал реверсора любого типа соединяют с блок-контактами, которые включают «блокировку конечного положения», замыкающуюся лишь в крайнем (рабочем) положении реверсора, и блокирование цепей управления песочницами переднего и заднего хода.

Через блокировку «конечного положения» получают питание катушки поездных электропневматических контакторов, а также катушки контакторов возбуждения тягового генератора и возбuditеля. В период переключения реверсора или при неполном его включении включение этих аппаратов и появление тока в силовой цепи невозможно.

**Контроллер машиниста.** Контроллер машиниста служит для управления энергетической установкой тепловоза. На контроллере имеются две рукоятки: съемная реверсивная и главная (рукоятка управления). Реверсивная рукоятка служит для управления электропневматическими вентилями реверсора. Она является ключом без которого нельзя переместить главную рукоятку и привести тепловоз в движение. Главной рукояткой контроллера машинист воздействует на вентили привода регулятора частоты вращения вала дизеля, производя попутно необходимые переключения в цепях управления энергетической установки. Устанавливаемые на тепловозах кулачковые контроллеры разных серий принципиально не отличаются от контроллера типа КВ-16А-12 (тепловоз ТЭЗ), на базе которого они созданы. Большинство деталей и узлов контроллеров унифицировано.

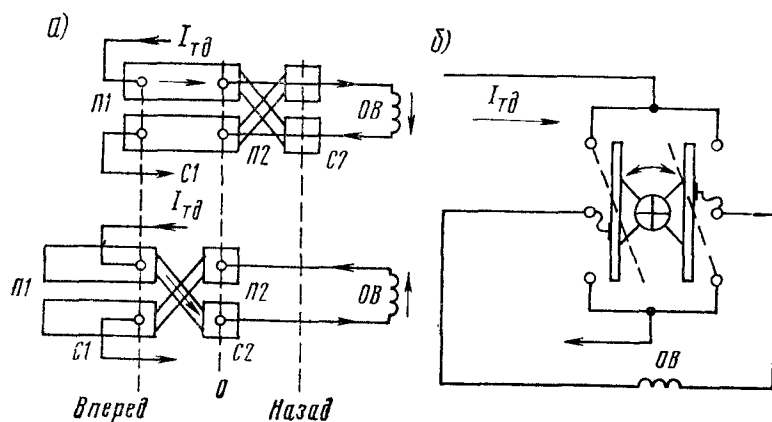
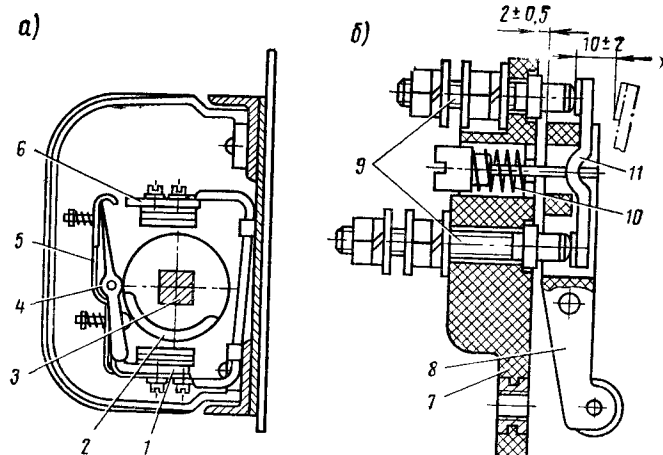


Рис. 98. Схема действия реверсоров:  
а — барабанного;  
б — кулачкового

Рис. 99. Кулачковый элемент контроллера машиниста:

а — типа КВ-16А-12; б — типа КВ-1552



Основой контроллера является вертикальный вал 3 (рис. 99 а), связанный с рукояткой управления. На нижней квадратной части вала насажены пластмассовые шайбы, имеющие вырезы по окружности. На изоляционной стойке укреплены неподвижные контакты 6. Подвижные контакты 5 размещены на рычагах. При повороте рукоятки контроллера и связанного с ней вала шайбы 2 вращаются. Пока ролик рычага 4 подвижного контакта катится по окружности шайбы, контакты разомкнуты. Когда ролик попадает в вырез шайбы, подвижной контакт под действием пружины замыкается с неподвижным. Положение вырезов на шайбах определяется включением аппарата, находящегося в этой цепи, в зависимости от позиции контроллера. К стойке 1 подвижных контактов подведены провода.

Аналогично устроены шайбы механизма управления реверсором. Положение шайб определяется реверсивной рукояткой. Для фиксации главного и реверсивного валов в определенном рабочем положении предусмотрены храповики. Для блокирования рукояток контроллера имеются механические фиксаторы, обеспечивающие необходимую последовательность в пользовании рукоятками. При «нулевом» положении реверсивной рукоятки перемещение главной невозможно и, наоборот, при нахождении главной рукоятки на ходовой позиции переключение реверсивной рукоятки исключается. Приливы на крышке контроллера не дают возможности вынуть реверсивную рукоятку, находящуюся в одном из рабочих положений.

Контроллер КВ-1552 (тепловозы ТЭ116, ТЭП70) имеет конструктивные отличия: контактная система мостикового типа, управление главным барабаном осуществляется штурвалом, отсутствует зубчатая передача. Контактный элемент мостикового типа (рис. 99, б) с двойным разрывом контактов состоит из пластмассового изолятора 7 и рычага 8, контактных болтов 9, мостика 10, держателя пружин 11, обеспечивающих начальное и конечное контактное нажатие. В рычаге имеется ролик, который, перемещаясь по поверхности кулачковой шайбы, включает или выключает контактный элемент.

## 24. РЕЛЕ

**Реле перехода.** Реле перехода РП служит для автоматического управления режимом работы тяговых электродвигателей (переключение электродвигателей, включение и выключение контактов шунтировки). На большинстве серийных тепловозов применяется электромагнитное реле перехода Р-42Б (рис. 100), которое состоит из двух катушек: токовой  $T$  и напряжения  $H$ , и качающегося якоря

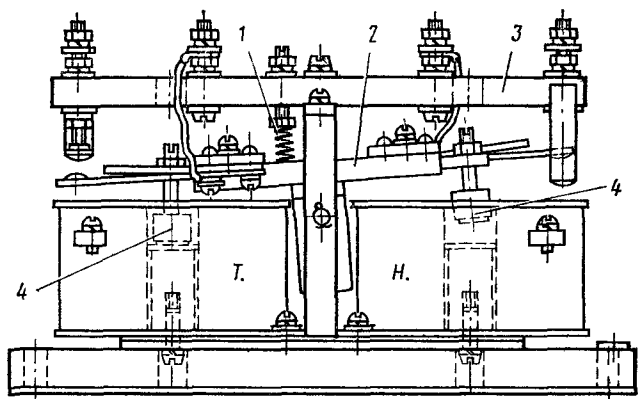


Рис. 100. Реле перехода Р-42Б

ря 2. Катушки через резисторы включены в высоковольтную цепь и их рабочие токи пропорциональны соответственно току и напряжению тягового генератора. Якорь реле с двумя плунжерами может поворачиваться относительно оси в сторону одной из катушек. Ход якоря ограничен упором плунжеров в сердечники катушек.

При отсутствии тока в катушках якорь пружиной прижат к токовой катушке. В этом положении контакты 3 реле разомкнуты. Усилие катушки *H* стремится включить контакты реле, повернув якорь в сторону катушки *H*, а усилие катушки *T* и усилие пружины 1 препятствует этому, удерживая якорь в выключенном положении. Изменить усилие катушки можно перемещением плунжера 4 либо изменением тока катушки за счет изменения сопротивления резисторов, включенных в ее цепь. Принцип действия дифференциального реле РД-3010 (рис. 101) аналогичен рассмотренному. Катушки реле охватывают общий прямоходовый якорь, который втягивается катушкой, имеющей в данный момент большее усилие.

При увеличении скорости движения тепловоза, когда напряжение тягового генератора увеличивается, а ток падает, усилие катушки *H* возрастает, а катушки *T* снижается. При выбранной скорости, а точнее при определенном соотношении токов в катушках *H* и *T* реле включается, производя своими блокировками изменения в цепях управления режимом работы тяговых электродвигателей. Точка включения реле выбирается по внешней характеристике тягового генератора на переходе от гиперболической части к ограничению по напряжению, точка отпадения — при переходе от гиперболической части к ограничению по току.

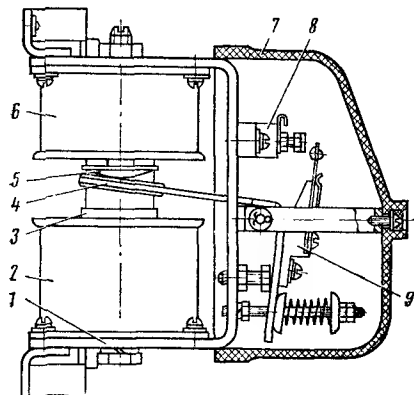


Рис. 101. Дифференциальное реле РД-3010:

1 — ярмо; 2 — катушка напряжения; 3, 5 — сердечники; 4 — якорь; 6 — токовая катушка; 7 — кожух; 8 — узел неподвижного контакта; 9 — узел подвижного контакта

Зависимость  $i_n = f(i_T)$  тока срабатывания  $i_n$  в катушке *H* от тока  $i_T$  в катушке *T* называется *характеристикой срабатывания*. Она изменяется при изменении воздушного зазора между сердечником катушек и плунжерами, толщины немагнитной прокладки на торце якоря и усилия пружины.

Зависимость  $i_n = f(i_T)$  при отключении реле называется *характеристикой отпадения*.

Отношение тока отпадания к току срабатывания называется *коэффициентом возврата* реле  $k_v = \frac{i_{н\ отп}}{i_{н\ ср}}$ . Так как токи катушек пропорциональны току и напряжению тягового генератора, то характеристики реле могут быть перенесены на планшет внешних характеристик тягового генератора, соответствующих различным позициям контроллера машиниста (см. рис. 24). Каждой частоте вращения вала дизеля соответствует своя зависимость  $U_r = f(I_r)$ , имеющая участок постоянной мощности. Желательно иметь реле, характеристики срабатывания и отпадания которого располагались бы в пограничных точках гиперболеских участков внешних характеристик всех позиций. В любом случае реле срабатывает при параметрах тягового генератора, соответствующих точкам пересечения характеристик реле с кривыми внешних характеристик. Отсюда следует, что скорость перехода на тепловозе зависит от позиции контроллера, на которой работает в данный момент дизель-генератор, обеспечивая переключение и рост скорости движения независимо от массы поезда. Поскольку характеристики срабатывания и отпадания реле при низких позициях контроллера сближаются, кроме того, в эксплуатации изменяются параметры катушек в результате нагрева и наблюдаются значительные колебания напряжения тягового генератора, появляется вероятность возникновения неустойчивого режима при работе реле — режима звонковой работы. Для устранения этого необходимо коэффициент возврата  $k_v$  иметь возможно меньший (0,14—0,18). Выбор добавочных сопротивлений в цепи катушек определяется режимами тягового генератора, при которых должно происходить срабатывание реле. Исходными уравнениями для расчета реле являются зависимости между токами катушек и током и напряжением тягового генератора:

$$U_r = i_n(R_n + R_{дн}); \quad I_r = i_r \frac{R_r + R_{дт}}{R_c},$$

где  $R_n, R_r$  — сопротивление катушек  $H$  и  $T$ ;

$R_{дн}, R_{дт}$  — добавочные сопротивления в цепях катушек;

$R_c$  — суммарное сопротивление высоковольтной цепи, параллельной катушке  $T$ .

Ток, при котором совершается переход с ослабленного на полное возбуждение (отпадение реле), не должен превосходить значения, допускаемого для машин из условий работы и нагрева. От силы этого тока зависят также нагрев катушки  $T$  и, следовательно, характеристики реле. Задаваясь током  $I_{т\max}$  и выбрав максимальный  $i_t$ , по уравнению определяют  $R_t$ . По характеристике отпадания реле принятому току  $I_t$  соответствует  $i_n$ . По внешней характеристике тягового генератора находят соответствующее напряжение, по уравнению — значение  $R_{дн}$ . Подобным же образом определяют части сопротивления, закорачиваемые блок-контактами реле управления (при переходе на 9-ю позицию). Например, напряжение тягового генератора при переходе с ПП на ОПИ выбирают так, чтобы после перехода ток генератора был меньше тока отпадания, в противном случае возникнет режим «звонка». Звонковая работа реле, помимо износа аппарата, приводит к продольным колебаниям тепловоза, что совершенно недопустимо.

Наличие в реле подвижных частей, контактов и переменных сопротивлений, а также зависимость режимов его работы от настройки внешней характеристики тягового генератора приводят в эксплуатации к частым нарушениям регулировок и возникновению звонковых режимов работы. До 30% внеплановых реостатных испытаний проводятся по повторным регулировкам РП и его цепей. Устойчивость работы реле может быть достигнута уменьшением колебаний напряжения тяговых генераторов и модернизацией цепей реле, что практически проще.

**Реле заземления.** Реле заземления (РЗ) защищает электрические машины и другие элементы силовой высоковольтной цепи при круговом огне на коллекторах тяговых машин и коротком замыкании в тяговых машинах, так как обычно эти явления сопровождаются замыканием на корпус, что вызывает срабатывание РЗ. Одновременно РЗ обеспечивает безопасную работу обслуживающего персонала, так как нахождение корпуса тепловоза под напряжением в результате нарушения изоляции высоковольтной цепи создает угрозу поражения людей током.

На тепловозах нашли применение реле двух типов Р-45Г-2 и БЗ-100А. Катушка реле типа Р-45Г-2 включается в цепь, один конец которой соединен с корпусом тепловоза, другой — с одним из элементов высоковольтной цепи — обычно с шунтом амперметра (рис. 102). Ток срабатывания в катушке реле возникает в результате разности потенциалов между точками: *а* — подключения цепи катушки реле к корпусу тепловоза и *б* — контакта силовой цепи с корпусом тепловоза (местом пробоя). Потенциал между этими точками зависит от падения напряжения на участке цепи *а — б*. Если нарушение изоляции произошло в непосредственной близости от точки *а*, падение напряжения может быть меньше напряжения срабатывания  $\Delta U_{аб} < U_{ср}$  и реле не реагирует на появившуюся неисправность. Это является существенным недостатком реле данного типа. Реле типа БЗ-100А свободно от этого недостатка. Блок состоит из реле переменного тока РЗ и трансформатора *Тр* (рис. 103). Вторичная обмотка трансформатора включена последовательно с катушкой реле; первичная обмотка получает питание от источника переменного напряжения. При отсутствии замыкания в высоковольтной цепи тока во вторичной обмотке нет, так как цепь ее разомкнута. Появление пробоя в любом месте вызывает короткое замыкание вторичной обмотки, появление в ней тока и срабатывание реле. При отсутствии переменного напряжения реле работает, как реле Р-45Г-2.

Конструктивно РЗ типа Р-45Г-2 выполнено подобно реле управления Р-45, но имеет дополнительную механическую защелку, фиксирующую якорь после срабатывания во включенном положении. После срабатывания реле можно восстановить только вручную. Контакты реле всегда располагаются в цепях катушек КВ и ВВ. Срабатывание реле приводит к сбросу нагрузки и сопровождается загоранием сигнальной лампы на пульте.

В цепь катушки РЗ обычно включен дополнительный резистор *СРЗ* (см. рис. 102), повышающий необходимый для срабатывания реле потенциал  $\Delta U_{аб}$  и, следовательно, понижающий чувствительность реле. Включение *СРЗ* вызывается необходимостью отводить токи, являющиеся результатом возникновения зарядов статического электричества в изолированном от земли контуре высоковольтной цепи. Эти токи достигают 10 А, что и определяет нижний предел тока срабатывания РЗ.

Цепь катушки РЗ имеет разъединитель *ВРЗ*, которым реле может быть отключено, когда имеется необходимость дальнейшего следования поезда, а место пробоя не обнаружено или устранено в пути, следов кругового огня на коллекторах машин нет и действие всех агрегатов нормальное. При эксплуа-

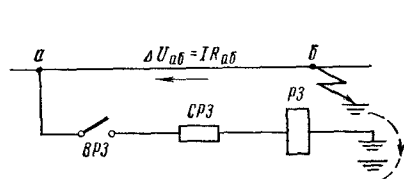


Рис. 102. Схема включения реле заземления Р-45Г-2

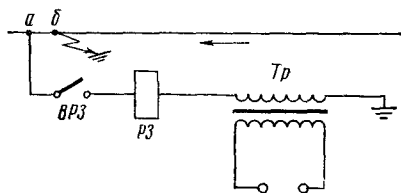


Рис. 103. Схема включения реле заземления БЗ-100А

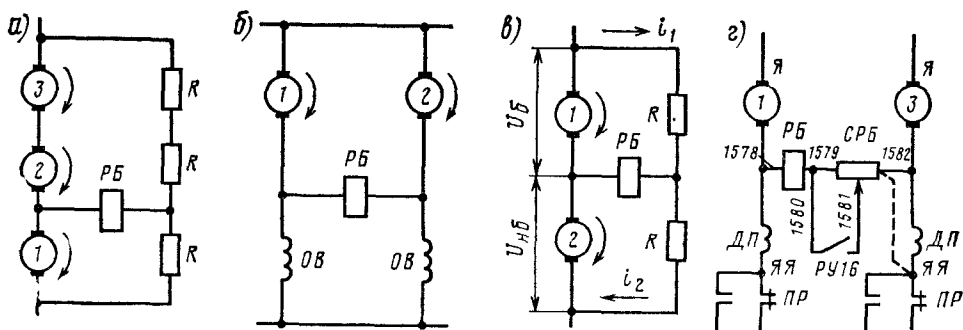


Рис. 104. Принципиальные схемы включения катушек реле боксования:  
а — обычные реле; б — на тепловозах с комплексным противобоксовочным узлом

тации тепловозов наблюдаются случаи периодического «срабатывания РЗ, иногда на определенных участках профиля неоднократно на одном и том же тепловозе. Это явление «блуждающей земли» объясняется тем, что оголенный участок высоковольтной цепи касается корпуса при определенном положении тепловоза в кривой или на подъеме. При изменении положения контакт нарушается и «земля» пропадает.

**Реле боксования.** Для автоматического снижения мощности энергетической установки в случае начавшегося боксования колесных пар включается реле боксования. При боксовании колесной пары увеличивается частота ее вращения, ток в цепи тягового двигателя падает, а напряжение увеличивается и делается больше, чем на других двигателях. Перераспределение напряжения между якорями двигателей служит причиной появления тока срабатывания в катушке РБ. Катушки реле включаются в диагональ моста, образованного якорями тяговых электрических двигателей и дополнительными резисторами (рис. 104, а, б).

Наибольшее распространение получило реле Р-46Б-1, конструктивно аналогичное реле управления, но выполненное в более легком якоре для увеличения чувствительности и большим числом витков катушки. На современных тепловозах устанавливается блок реле боксования ББ-303, состоящий из трех реле типа РК-III, отличающихся от Р-46Б-1 только сопротивлением катушки. Небольшой ток в катушке РБ протекает всегда, так как полной идентичности характеристик тяговых двигателей достигнуть не удастся, и Правилами ремонта допускается расхождение характеристик на одном локомотиве до  $\pm 4\%$ . У последовательно включенных тяговых двигателей токи одинаковые. При работе тепловоза без боксования, если пренебречь разностью диаметров бандажей и прокатом, частоты вращения якорей двигателей равны. Следовательно, расхождение характеристик, заключающееся в неравенстве магнитных потоков, может проявиться только в различии приложенных к двигателям напряжений. При наиболее неблагоприятном расхождении характеристик двигателей, на которые включено реле боксования, и максимальном напряжении генератора 850 В, пренебрегая внутренним падением напряжения,

$$U_1 - U_2 = 1,04 \frac{U_r}{2} - 0,96 \frac{U_r}{2} = 34 \text{ В.}$$

Отсюда следует, что для предотвращения ложного действия реле боксования необходимо, чтобы ток отпадания реле был больше тока вызываемого в катушке РБ разностью напряжения  $U_1 - U_2$ , т. е. необходимо соблюдать условие

$$i_{\text{отп}} > \frac{U_1 - U_2}{R + r}.$$

При этом ток срабатывания реле, обуславливающий его чувствительность,

$$i_{\text{ср}} \geq \frac{U_1 - U_2}{k_B (R + r)},$$

где  $R$  — сопротивление блока  $СРБ$ ;

$r$  — сопротивление катушки  $РБ$ ;

$k_B$  — коэффициент возврата, для  $РБ$  равный 0,85—0,86.

Для реле Р-46Б-1 в током срабатывания 0,05 А минимальную разность напряжений на боксующей  $U_6$  и небоксующей  $U_{\text{нб}}$  колесных парах можно определить, используя второй закон Кирхгофа. Исходя из уравнений

$$U_6 = i_1 R + (i_1 - i_2) r; \quad U_{\text{нб}} = i_2 R + (i_2 - i_1) r$$

получаем  $U_6 - U_{\text{нб}} = (i_1 - i_2) (R + 2r)$ , что при  $R = 500$  Ом и  $r = 526$  Ом составит 77 В. При этом относительное проскальзывание боксующей колесной пары составит

$$v_{\text{ск}} = \frac{v_6 - v_{\text{нб}}}{v_{\text{нб}}} 100 \approx \frac{U_6 - U_{\text{нб}}}{\frac{1}{2} U_r - \frac{1}{3} (U_6 - U_{\text{нб}})} 100 \approx 20\%.$$

Если же начинает боксовать колесная пара, двигатель которой в результате расхождения характеристик имеет большее напряжение, относительное скольжение будет еще больше. Практически скорость боксующей колесной пары достигает 18 км/ч. Для увеличения чувствительности  $РБ$  должны разрабатываться предложения, направленные на облегчение отпадания якоря и на увеличение его коэффициента возврата (практически не более 0,85).

Реле боксования имеет перекидной контакт. Во время работы реле контакт разрывает цепь питания катушки контактора  $ВВ$  и снимает независимое возбуждение возбудителя либо вводит сопротивление в цепь обмотки управления амплистата, одновременно подается звуковой сигнал. При срабатывании реле боксования характерна звонковая работа его и связанного с ним контактора  $ВВ$  (контактор возбуждения возбудителя). Недостатком системы защиты в  $РБ$  является то, что она действует при уже начавшемся и развившемся боксовании, а не предупреждает его возникновение.

Предложено несколько принципиально новых систем защиты от боксования. Хорошие результаты дают системы с «жесткими динамическими характеристиками». В электрической схеме тепловозов 2ТЭ10Л, ТЭ10В и ТЭ116 предусмотрено комплексное противобоксовочное устройство с использованием жестких динамических характеристик тягового генератора. Комплексное противобоксовочное устройство обеспечивает неизменность напряжения тягового генератора при начавшемся боксовании (жесткая динамическая характеристика), увеличивает чувствительность  $РБ$  за счет схемы его включения, прекращает боксование частичным уменьшением напряжения тягового генератора при дальнейшем ступенчатом его восстановлении.

Чтобы при начавшемся боксовании напряжение генератора не повышалось, применена схема регулирования напряжения с использованием в селективном узле сигнала, пропорционального току тяговых двигателей небоксующих колесных пар. Таким образом, в качестве сигнала используется наибольший из токов тягового двигателя. Формируют такой сигнал трансформаторы постоянного тока и узел выделения максимума. Узел выделения максимума состоит из четырех последовательно соединенных выпрямительных мостов, на которые включены рабочие обмотки трансформаторов  $ТПТ1 - ТПТ4$  (рис. 105, условно показаны только два  $ТПТ$ ).

Выпрямительные мосты включены на балластный резистор  $СБТТ$ , который вместе с диодом  $В5$  выполняет функцию селективного узла. Со стороны

сигнала от *ТПН* селективный узел отличается от серийного только наличием замыкающих контактов *РУ15* в цепи балластного резистора *СБТН*. Уменьшение тока в обмотке управления амплитата происходит только при одновременном изменении тока всех *ТПТ*, что при боксовании, как правило, не наблюдается. В случае боксования уменьшается ток одного (двух) *ТПТ*, ток управления не изменяется, генератор работает по жесткой динамической характеристике. Отсутствие повышения напряжения благоприятно сказывается на работе противобоксовочной системы и облегчает устранение боксования.

Реле боксования включены между обмотками главных и добавочных полюсов (см. рис. 104). На полном поле в цепи катушек включены добавочные резисторы *СРБ1—СРБ3*. Реле управления *РУ16* шунтирует своими замыкающими контактами резисторы *СРБ1—СРБ3* при переходе на ослабленное возбуждение. Такое включение реле боксования повышает его чувствительность в режиме ослабленного возбуждения и понижает при полном возбуждении. Это свойство *РБ* обеспечивает возможность обнаружения боксования при ослабленном возбуждении, а при полном возбуждении дает возможность более полно использовать динамическую жесткую характеристику генератора, причем значительная часть пробоксовок прекращается.

Прекращение боксования после срабатывания *РБ* осуществляется путем частичного уменьшения напряжения генератора со ступенчатым его восстановлением. Одновременно происходит воздействие на объединенный регулятор дизель-генератора, чтобы избежать повышения тока в регулирующей обмотке амплитата при периодической работе *РБ*. Реле *РУ15* обеспечивает увеличение силы тяги на низших позициях контроллера и способствует изменению наклона внешних характеристик тягового генератора на низших позициях контроллера (с 1-й по 7-ю), что уменьшает вредное влияние напряжения генератора на развитие боксования, так как его прирост при одном и том же уменьшении тока нагрузки у наклонных характеристик меньше, чем у существующих.

Для формирования жестких динамических характеристик на тепловозах 2ТЭ116 применены четыре трансформатора постоянного тока *ТПТ1—ТПТ4* типа *ТПТ-10*. Однако на тепловозе 2ТЭ116 (с № 118) они включены иначе, а именно: два из них разделены на кабели 1-го и 6-го тяговых двигателей (*ТПТ1* и *ТПТ4*), а каждый из двух других — на пару кабелей соответственно 2-го — 3-го и 4-го — 5-го тяговых двигателей. Такое включение трансформаторов обусловлено особенностью экипажной части тепловозов 2ТЭ116, имеющих бесчелюстные тележки и одностороннюю ориентацию тяговых двигателей в тележках.

Это обстоятельство уменьшает вероятность возникновения боксования колесных пар при прочих равных условиях (учитывая к тому же, что тепловозы 2ТЭ116 имеют большую осевую нагрузку, чем 2ТЭ10Л). Однако в случае ухудшения состояния поверхности рельсов на тепловозе 2ТЭ116 в отличие от 2ТЭ10Л могут боксовать сразу несколько колесных пар. Поэтому использование схемы включения четырех трансформаторов (как на тепловозе 2ТЭ10Л)

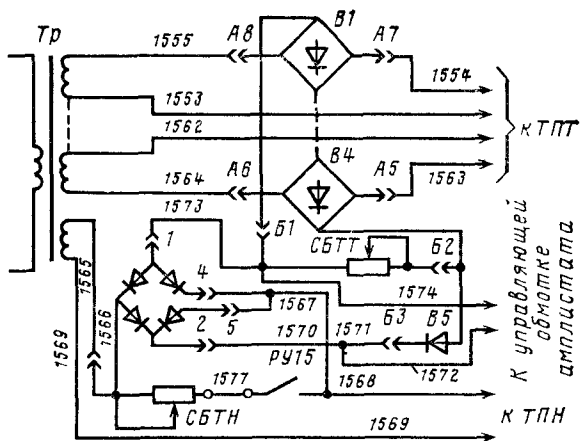


Рис. 105. Схема узлов выделения максимального сигнала и селективного

или тем более трех трансформаторов, включенных на пары тяговых двигателей (как это было на первых тепловозах 2ТЭ116), не обеспечивает надежного поддержания жесткой характеристики генератора при одновременном проскальзывании нескольких колесных пар. Комплексное противобоксовочное устройство хорошо зарекомендовало себя в эксплуатационных условиях.

**Реле обратного тока.** Аккумуляторная батарея при работающем дизеле включена параллельно со вспомогательным генератором. Превышение напряжения вспомогательного генератора (ВГ) над напряжением аккумуляторной батареи (АБ) дает возможность осуществлять заряд аккумуляторов. Напряжение ВГ не всегда выше напряжения АБ; в период пуска, переходных процессов, в случае отказа в системе возбуждения ВГ, а также при остановленном дизеле напряжение  $U_{AB} > U_{BG}$ . Для своевременного включения аккумуляторной батареи на заряд при  $U_{BG} > U_{AB}$  и отключения ее от ВГ при  $U_{AB} > U_{BG}$  служит реле обратного тока РОТ. Реле обратного тока управляет включением и выключением контактора заряда батареи Б, силовые контакты которого находятся в цепи ВГ — АБ.

Для устранения больших зарядных токов, вредно действующих на аккумуляторы, включение РОТ происходит не при номинальном напряжении ВГ, а с учетом напряжения аккумуляторной батареи. Нормальное включение РОТ должно происходить при превышении напряжения ВГ над напряжением АБ на 2—3 В. При прохождении тока от ВГ к АБ реле остается включенным. Если напряжение ВГ ниже напряжения АБ, начинает протекать «обратный» ток — аккумуляторы разряжаются на вспомогательный генератор. В этом случае РОТ отключает контактор Б (при «обратном» токе около 8 А).

На большинстве эксплуатируемых тепловозов установлено реле Р-44А-1 (реле Р-44А-2 отличается увеличенным сечением провода последовательной катушки), которое изображено на рис. 106. Магнитная система реле состоит из плиты 1, на которой укреплены три круглых стальных сердечника 3, 7, 18. Со средним сердечником шарнирно соединен держатель 14 якоря. Якорь 8 может поворачиваться вокруг держателя и имеет в верхней части регулировочный винт контргайкой 9, в нижней части подвижной контакт 16. Положение его может регулироваться: на планку 10, укрепленную на якоре, передается усилие регулировочной пружины 13. Вторым концом пружина опирается на

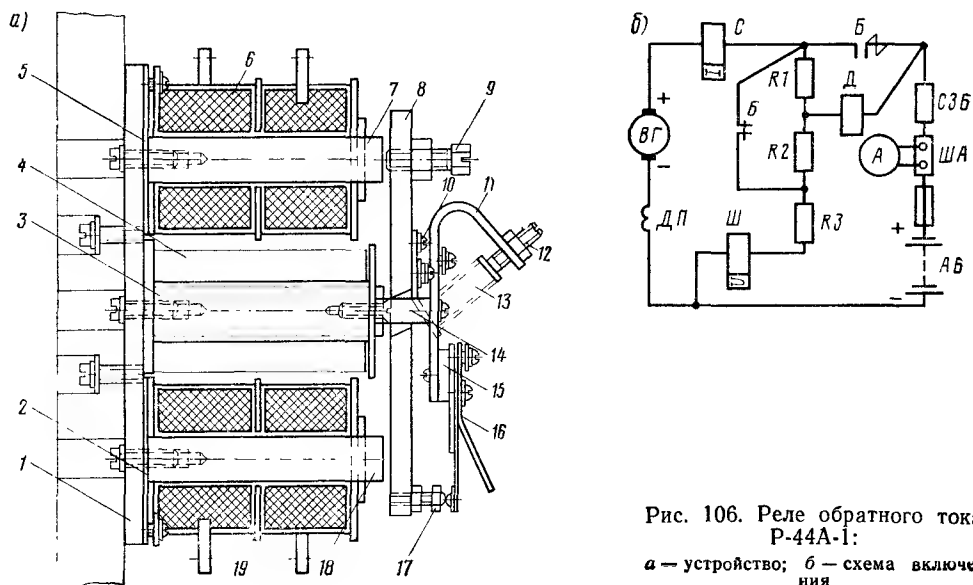


Рис. 106. Реле обратного тока Р-44А-1:

а — устройство; б — схема включения

изогнутую скобу, в которую ввернут винт 12, регулирующий затяжку пружины. Скоба 11 присоединена к держателю, на ней укреплен неподвижный контакт 17, изготовленный из пластинчатой пружины с серебряной напайкой. Неподвижные контакты изолированы от скобы изоляционной планкой 15. На сердечнике реле размещены три катушки: параллельная 6, последовательная 4 и дифференциальная 19. Между сердечниками катушек и плитой установлены шайбы 5, 2, служащие для настройки магнитной системы реле.

Рассмотрим действие узла вспомогательного генератора при различных режимах.

1. Дизель остановлен, рубильник аккумуляторной батареи включен. Создается цепь для протекания тока через дифференциальную катушку (Д) *POT*: от плюса батареи через предохранитель, шунт амперметра, резистор заряда батареи *СЗБ*, дифференциальную катушку *POT*, резистор *R1*, последовательную катушку, якорь и добавочные полюсы *ВГ* к минусу батареи. Дифференциальная катушка вместе с пружиной надежно удерживает якорь *POT* в выключенном положении, гарантируя реле от случайных включений.

2. При пуске дизеля, когда  $U_{ВГ}$  увеличивается и разность  $U_{АБ} - U_{ВГ}$  уменьшается, ток в дифференциальной катушке снижается. При  $U_{АБ} = U_{ВГ}$  он равен нулю. При  $U_{ВГ} > U_{АБ}$  в катушке идет ток обратного направления. Теперь она совместно с параллельной катушкой *H*, усилие которой увеличилось вместе с  $U_{ВГ}$ , включит *POT*.

3. После включения контактора *Б* весь ток *ВГ* проходит через последовательную катушку *T*, поток которой совместно с параллельной и дифференциальной катушками удерживает реле во включенном положении. Блокировка *Б* вводит в цепь параллельной катушки  $R1 + R2$ , что создает условие для его облегченного отключения в случае появления «обратного тока». Снижение  $U_{ВГ}$  вызывает уменьшение усилия параллельной катушки и изменение направления тока в дифференциальной и последовательной катушках. Реле отключается совместным действием этих катушек.

Узел, состоящий из *POT* и контактора *Б*, заменяется одним полупроводниковым диодом. Диод включается на место силовых контактов *Б*. Для тепловозов разработана панель диода типа ПВК6011. Опыт применения модернизированного узла управления зарядом батареи на тепловозах ТЭП60, 2ТЭ10Л и др. дает положительные результаты.

**Реле времени.** В цепях управления пуском дизеля для обеспечения необходимого времени прокачки масла, а также в цепях управления — цепи реле переходов, катушек поездных контакторов и др. — установлены реле времени. Наиболее широко применяются электропневматические реле РВП 2 и электромагнитные типов РЭ-500 и РЭВ-800. Реле РВП 2 (рис. 107) состоит из неподвижной электромагнитной и подвижной контактной систем, пневматической камеры и колодок с микропереключателями. В пневматической камере размещены диафрагма 3, клапан 4 и регулировочная игла 5. Микропереключатели МП-1 имеют по одной паре размыкающих и замыкающих контактов. При обесточенной катушке *PВ* подвижная часть (якорь) под действием пружины 2 занимает верхнее положение. Воздух из полости *A* вытесняется в полость *Б* пневматической камеры 6. Все контакты реле разомкнуты. При появлении тока в катушке 1 якорь 9 с контактами мгновенного действия притягивается к катушке. Освобождается от нажатия пластмассовая колодка 10, связанная с диафрагмой камеры и под действием пружины 7 начинает перемещаться вниз, увлекая за собой диафрагму. Движению системы препятствует возникающее в полости *A* разрежение, вызванное перемещением диафрагмы. Воздух в полость *A* поступает только через отверстие, проходное сечение которого зависит от положения регулировочной иглы. Выдержка времени до замыкания второй пары контактов 8 зависит от скорости поступления воздуха в камеру.

Торец регулировочной иглы имеет барашек (или шлиц под отвертку), расположенный на наружной части реле.

Реле типов РЭ-500 и РЭВ-800 (рис. 108) применяют в цепях, требующих небольших выдержек времени (до 5—6 с). Реле имеют аналогичную конструкцию, differing размерами, блокировками, данными катушек. Реле состоит из магнитопровода 1, на котором размещены катушка 9 и массивная медная гильза 2, немагнитной прокладки 7, якоря 5, контактного устройства 8 и нажимной скобы 6. При включениях и выключениях тока в катушке в медной гильзе наводится э. д. с. самоиндукции, что приводит к появлению вихревых токов, которые задерживают спадание магнитного потока в системе и увеличивают время отпадания реле. Время отпадания регулируется изменением натяжения возвратной пружины 3 при помощи гайки 4 и подбором толщины немагнитной прокладки. Погрешность срабатывания при 20°C составляет около 10%.

**Реле максимального тока.** Реле (реле перегрузки) защищают тяговый генератор от перегрузки током. У некоторых тепловозов (ТЭ2, ТЭМ2) реле типа Р-47А-2 ограничивает максимальный ток генератора, воздействуя на возбуждение возбuditеля. Реле аналогично по конструкции реле боксования 8 и катушке проходит ток параллельной ветви тяговых двигателей, поэтому она имеет три витка и площадь сечения провода  $12,5 \times 20$  мм. Реле типа РЭВ-571 устанавливается на тепловозах ТЭП60. Оно имеет магнитную систему клапанного типа. К якору крепится подвижной контакт мостикового типа, реле имеет одну пару размыкающих контактов. Реле выключает контактор аварийного возбуждения генератора при токе 6000—7000 А; выпускается промышленностью серийно; время срабатывания 0,05 с. Реле обоих типов регулируют натяжением отключающей пружины. Роль реле ограничения тока на тепловозе ТЭ3 играет узел тахогенератора Т2.

**Система автоматического регулирования пускового тока.** Узел автоматического регулирования пускового тока (АРТ), состоящий из тахогенератора Т2, обмотки ограничения тока возбудителя М-ММ и селенового вентиля ВС2 (рис. 109), служит для улучшения пусковых характеристик тепловоза ТЭ3 и ограничения тока генератора. Принцип действия его заключается в следующем. Цепь, состоящая из вентиля ВС2, тахогенератора Т2 и обмотки М — ММ, присоединена одним концом к минусовому зажиму ЯЯГ генератора, а другим — к минусовому зажиму Я6 обмотки якоря электродвигателя 6.

Когда в силовой цепи протекает ток, то вследствие падения напряжения в обмотках возбуждения двигателей 1 и 6 и обмотке ДП добавочных полюсов генератора между точками а и б создается разность потенциалов, которую обозначим  $\Delta U_{аб}$ . Эта разность потенциалов стремится вызвать ток в цепи узла АРТ от точки а к точке б. Напряжение  $U_{т2}$  тахогенератора Т2 направлено против напряжения  $\Delta U_{аб}$  и стремится вызвать ток обратного направления. Одна-

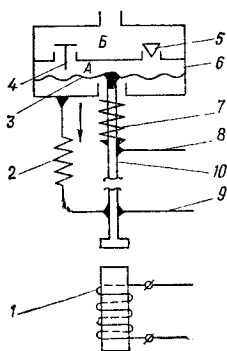


Рис. 107. Схема реле времени РВП-2

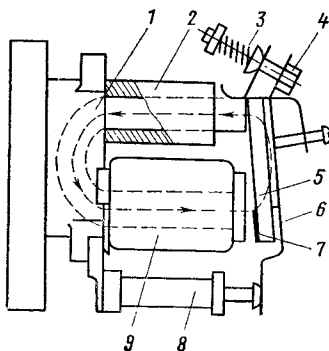
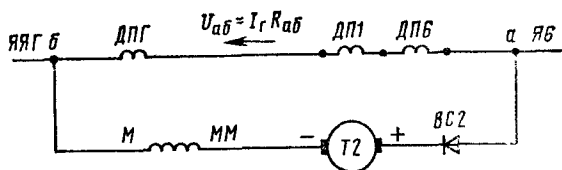


Рис. 108. Схема реле времени типов РЭ-500 и РЭВ-800

Рис. 109. Схема ограничения тока тягового генератора тепловоза ТЭЗ



ко клапан  $BC2$  препятствует протеканию тока в обратном направлении. Поэтому, когда напряжение  $U_{T2}$  больше  $\Delta U_{a6}$ , по цепи узла АРТ ток не проходит. Если же ток генератора увеличивается настолько, что напряжение  $\Delta U_{a6}$  становится больше  $U_{T2}$ , по обмотке  $М — ММ$  начинает протекать ток. Обмотка  $М — ММ$  действует навстречу обмотке независимого возбуждения, поэтому при появлении тока в обмотке  $М — ММ$  напряжение возбуждения понижается и, следовательно, уменьшаются ток возбуждения и напряжение генератора; рост тока нагрузки прекращается.

Если по какой-либо причине, например вследствие снижения скорости движения тепловоза, ток генератора опять увеличится, еще больше возрастет ток в обмотке  $М — ММ$  и уменьшится напряжение генератора, при этом рост тока генератора опять прекратится. Так создается ограничение тока нагрузки. Чем выше напряжение  $U_{T2}$  тахогенератора, тем больший ток генератора требуется для того, чтобы напряжение  $\Delta U_{a6}$  превысило  $U_{T2}$ . Напряжение  $U_{T2}$  пропорционально частоте вращения вала дизеля, следовательно, при переводе рукоятки контроллера с I-го положения на последующие ток генератора, при котором начинает действовать узел АРТ (ток «отсечки»), возрастает.

**Реле давления.** Используются реле в двух системах: масляной дизеля и воздушной тормозной. Реле давления воздуха АК-11Б используется на тепловозах 2ТЭ10Л, ТЭП60, ТЭ116 для снятия возбуждения тягового генератора при экстренном торможении. Кроме того, реле исключает возможность трогания тепловоза при отсутствии достаточного давления в тормозной системе. Закрытие контактов реле происходит при избыточном давлении в тормозной магистрали выше 500 кПа.

Реле давления масла (РДМ) типов РМ-1А и более поздние КР-4 защищают дизель и его отдельные агрегаты от работы при низком давлении масла. Основой реле является металлический сильфон, на который действуют давление масла и сила отключающей пружины. На тепловозе может быть до трех реле, отрегулированных на избыточное давление от 40 до 160 кПа.

Температурные реле срабатывают при достижении в контролируемой среде предельных температур. Температурные реле типов ТРК и ТР стандартные.

**Реле управления ТРПУ-1** (рис. 110). Ставят их на тепловозы взамен реле Р45 и РМ4, которые по основным своим параметрам, как показывает практика их эксплуатации,

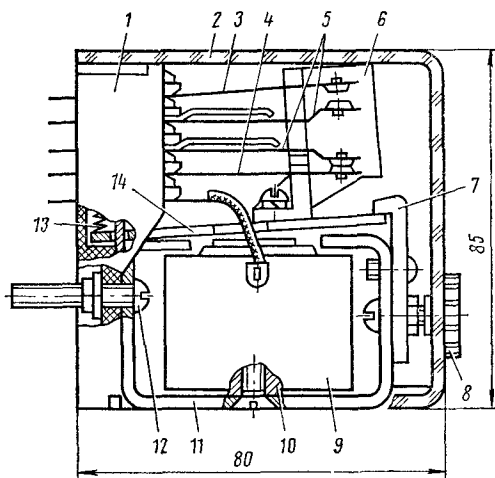


Рис. 110. Промежуточное реле ТРПУ-1:

1 — пластмассовый корпус; 2 — кожух; 3 — подвижная пластина замыкающего контакта; 4 — подвижная пластина размыкающего контакта; 5 — неподвижные пластины контактов; 6 — траверса; 7 — угольник; 8 — фигурная гайка; 9 — катушка; 10 — сердечник; 11 — скоба; 12 — винт; 13 — пружина; 14 — якорь

не рассчитаны на работу на подвижном составе. Новое реле полностью удовлетворяет техническим требованиям. По своим основным характеристикам оно имеет ряд особенностей по сравнению с реле, применявшимися ранее. Так, питание его может осуществляться от источника постоянного тока напряжением 24, 75 и 110 В при продолжительном токе через его рабочие контакты 6А. Прибор устойчиво работает в условиях резких колебаний температуры. Ускорение вибрационных воздействий на реле частотой до 100 Гц составляет 1 g, а при одиночных ударах — до 3g. Реле работает на электромагнитном принципе. Для исключения попадания в реле посторонних предметов и защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током реле закрыто прозрачным кожухом.

## 25. РЕГУЛЯТОРЫ

**Регуляторы мощности.** Гиперболическая внешняя характеристика генератора, получаемая при помощи специальных возбудителей или магнитных усилителей, не обеспечивает достаточно полного использования мощности дизеля по следующим причинам:

1) явление гистерезиса возбудителя (у тепловоза ТЭЗ колебания мощности генератора из-за гистерезиса достигают 100—150 кВт);

2) различие характеристик возбудителей из-за технологических отклонений;

3) влияние температуры обмотки возбуждения генератора. Изменение температуры и, следовательно, сопротивления обмотки возбуждения генератора вызывает смещение его внешней характеристики (для генератора МПТ-99/47 изменение температуры на 1°С приводит к изменению мощности примерно на 2 кВт, для генератора МПТ-84/39 — примерно на 1 кВт).

В схемах с магнитными усилителями температурные и гистерезисные влияния практически отсутствуют, однако в этих схемах взамен гиперболической получается прямолинейная характеристика. В любой схеме включение и выключение нагрузок собственных нужд (компрессора, вентилятора холодильника), а также параметры окружающего воздуха изменяют свободную мощность дизеля, которую он может отдавать в электропередачу; в то же время внешняя характеристика настраивается на одно заранее установленное значение мощности. Поэтому в процессе работы тепловоза требуется корректировка внешней характеристики генератора с тем, чтобы в любом случае свободная мощность дизеля полностью использовалась для целей тяги. Эту задачу выполняют узлы дополнительного автоматического регулирования мощности дизель-генератора.

Все разработанные и испытанные варианты регуляторов мощности (РМ) являются дополнительными органами в основной схеме тепловозов, имеющих специальные машинные возбудители или МУ. Включение регулятора мощности в основную систему регулирования добавляет к имеющейся обратной связи возбуждения возбудителя по нагрузочному току обратную связь по частоте вращения вала двигателя. Разомкнутая система регулирования энергетической установки становится замкнутой, в результате обеспечивается соответствие между режимами дизеля и генератора при всех условиях работы энергетической установки.

В качестве координаты, на изменение которой должен реагировать измерительный орган регулятора мощности, обычно выбирают положение исполнительного органа регулятора частоты вращения дизеля — штока серводвигателя или других связанных с ним звеньев топливотрегулирующей системы.

Регулятор мощности поддерживает рейки топливных насосов в заданном положении, воздействуя на возбуждение тягового генератора. Для умень-

шения токов управления исполнительный орган РМ включается в цепь обмотки возбуждения возбудителя. Из большого числа типов разработанных регуляторов на отечественных тепловозах нашли применение четыре принципиально различных по конструктивному исполнению: вибрационные регуляторы мощности с вибрацией контактов, бесконтактный регулятор мощности на полупроводниковых элементах, объединенный регулятор нагрузки и частоты вращения с электрогидравлической системой управления и тахометрические регуляторы.

*Вибрационный регулятор мощности со свободной вибрацией контактов* (тепловозы ТЭМ1 и ТЭМ2) состоит из вибрационного замыкателя и искрогасительного конденсатора. Контакты РМ включаются в цепь параллельной катушки реле ограничения тока параллельно резистору СВВ цепи независимого возбуждения возбудителя (рис. 111). При замкнутых контактах РМ параллельно резистору СВВ включается дополнительный резистор, в результате чего достигается максимальное значение независимого возбуждения возбудителя.

Сопротивления выбраны таким образом, чтобы разность магнитодвижущих сил обмоток возбуждения возбудителя при замкнутых и разомкнутых контактах обеспечивала пределы регулирования напряжения генератора для компенсации влияния вспомогательной нагрузки и нагрева обмоток на реализацию полной мощности энергетической установки, а также возможность работы при одном отключенном цилиндре дизеля Д50. При включении дополнительного резистора контактами РМ ток возбуждения возбудителя соответствует режиму работы дизель-генератора при полностью нагретой обмотке возбуждения генератора и минимально возможной вспомогательной нагрузке. Работе установки с холодной обмоткой возбуждения генератора и максимальной нагрузкой вспомогательными механизмами соответствуют разомкнутые контакты регулятора и полностью выключенный дополнительный резистор.

Рычаг регулятора с регулировочным винтом укреплен на конце вала управления рейками топливного насоса и обеспечивает размыкание контактов регулятора только при подходе реек к упору. Подвижной контакт укреплен на маятнике, который приходит в движение при нажатии на него рычага замыкателя. Замыкатель насажен на вал рычагов привода реек топливных насосов, и, следовательно, положение его связано с положением насосов штока серводвигателя регулятора. Регулирующий винт с нажимной головкой устанавливают так, чтобы рычаг приходил с ним в соприкосновение, а контакты начинали размыкаться в момент, когда мощность дизеля становится близкой к номинальной. Этому моменту соответствует и близкая к номинальной подача топлива.

Объединенный регулятор мощности и частоты вращения поддерживает постоянной заданную частоту вращения вала дизеля и сохраняет при этом не-

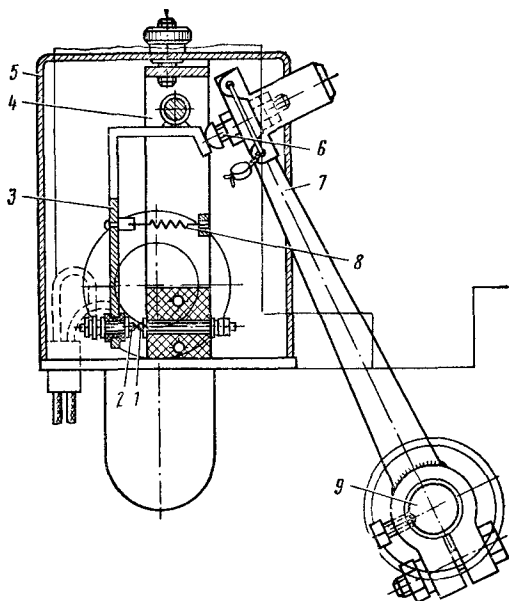


Рис. 111. Замыкатель регулятора мощности вибрационного типа

1 — неподвижный контакт; 2 — подвижной контакт; 3 — маятник; 4 — кронштейн замыкателя; 5 — кожух; 6 — регулирующий винт; 7 — рычаг замыкателя; 8 — пружина; 9 — вал привода топливных насосов

изменным положение реек топливных насосов, соответствующее этой частоте вращения вала. Объединенный регулятор совместно с электрической системой тепловоза участвует в создании гиперболической внешней характеристики генератора.

Система регулирования построена таким образом, что при изменении мощности тягового генератора происходит ее корректировка воздействием на систему возбуждения, чем и обеспечивается постоянная мощность независимо от режима работы тепловоза и вспомогательного оборудования. Для нормальной работы регулятора необходимо, чтобы быстродействие регулятора мощности было меньшим, чем быстродействие регулятора частоты вращения, так как вначале дизель должен воспринять изменение нагрузки, а затем скорректировать нагрузку, воздействуя на систему возбуждения.

На тепловозе ТЭЗ таким устройством является узел автоматического регулирования мощности дизеля (АРМ), состоящий из тахогенератора  $T1$ , регулирующей обмотки  $P-PP$  возбудителя и селенового вентиля  $BC1$  (рис. 112, а). Тахогенератор приводится от вала дизеля и, следовательно, его напряжение пропорционально частоте вращения вала дизеля. Обмотка  $P-PP$  включена на разность напряжений тахогенератора и вспомогательного генератора. Напряжение вспомогательного генератора поддерживается постоянным при помощи регулятора напряжения. Если напряжение тахогенератора ниже напряжения вспомогательного генератора, цепь «запирается» селеновым вентилем  $BC1$  и ток в обмотке  $P-PP$  отсутствует (не считая незначительного обратного тока, пропускаемого вентилем). Когда же напряжение тахогенератора становится выше напряжения вспомогательного генератора, то в обмотке  $P-PP$  появляется ток, при этом м.д.с. данной обмотки складывается с м.д.с. обмотки независимого возбуждения  $HВ$ . Обмотка возбуждения тахогенератора питается током от вспомогательного генератора. Во время настройки узла АРМ сопротивления в цепях этой обмотки и обмотки  $HВ$  подбирают так, чтобы на 16-м положении рукоятки контроллера при всех условиях работы установки по обмотке  $P-PP$  проходил ток, и, следовательно, напряжение тахогенератора всегда превышало напряжение вспомогательного генератора на значение падения напряжения в вентиле  $BC1$  и обмотке. Вследствие малого сопротивления обмотки эта разница составляет несколько вольт.

Относительное равенство напряжений  $U_{вр}$  и  $U_{т1}$  (рис. 112, б) может быть обеспечено только при одном значении частоты вращения вала дизеля. Таким образом, узел АРМ действует только на 16-м положении, при этом ток в обмотке  $HВ$  уменьшен вследствие включения в ее цепь резистора, который накоротко замыкается контактами реле  $PY1$  на всех других положениях рукоятки контроллера.

Посмотрим, как действует узел АРМ, когда рейки топливных насосов дизеля находятся в положении максимальной подачи топлива, определяемой ограничительным упором в системе регулирования. Предположим, что генератор полностью потребляет всю «свободную» мощность дизеля. Если в данном случае нагрузка на дизель увеличится, например вследствие включения компрессора или понижения температуры обмоток возбуждения генератора, то в ре-

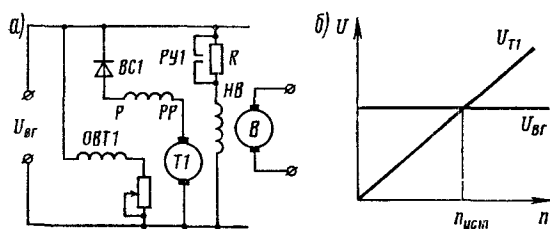


Рис. 112. Тахометрический регулятор мощности тепловоза ТЭЗ:  
а — схема соединений; б — характеристика узла регулятора

зультате перегрузки частота вращения вала дизеля начнет падать. При этом будут уменьшаться напряжение тахогенератора и, следовательно, ток в обмотке  $P-PP$ , что в свою очередь вызовет снижение напряжения возбудителя, тока возбуждения и напряжения генератора, а значит, и его мощности. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие, т. е. пока мощность генератора вновь не станет равной «свободной» мощности дизеля и перегрузка устранилась.

Если, наоборот, нагрузка на дизель уменьшится, например вследствие перевода вентилятора холодильника на зимний режим работы или другой причины, то частота вращения вала дизеля начнет возрастать, увеличится ток в обмотке, следовательно, повысится мощность, потребляемая генератором, дизель снова догрузится.

**Регуляторы напряжения вспомогательного генератора.** Регуляторы напряжения (РН), применяемые на тепловозах, поддерживают постоянным напряжение вспомогательного генератора во всем диапазоне изменения частоты вращения вала дизеля и тока нагрузки вспомогательного генератора (ВГ). На тепловозах получили распространение РН четырех типов: вибрационные СРН и ТРН, бесступенчатые с угольным резистором (на тепловозах ВНР), бесконтактные полупроводниковые и бесконтактные на магнитных усилителях.

Вибрационные регуляторы напряжения состоят из магнитной системы, подвижной и неподвижной катушек, контактной системы, установочных пружин и сопротивлений, включаемых в цепь обмотки возбуждения ВГ. Действие регуляторов основано на взаимодействии усилия пружин и усилия взаимного притяжения подвижной и неподвижной катушек при протекании по ним тока. Подвижная и неподвижная катушки включаются параллельно якору ВГ, и ток, в них а следовательно, и усилие взаимодействия зависят от напряжения ВГ. Подвижная катушка связана с контактной системой, на которую действует также усилие пружин. Перемещение контактной системы, вызванное отклонением тока в катушках (напряжение ВГ), приводит к изменению величины сопротивления в цепи возбуждения ВГ, направленного на компенсацию возникшего отклонения. Для контактных вибрационных регуляторов характерны три режима работы:

1) напряжение ВГ меньше 75 (110) В. Усилие пружин больше усилия катушек. Контактная система замыкает накоротко все резисторы, обеспечивая максимальное возбуждение ВГ;

2) напряжение ВГ равно нормальному. Усилие пружин равно усилию катушек. Контактная система находится в одном из рабочих положений, ток соответствует номинальному возбуждению при данном режиме работы;

3) напряжение ВГ больше 75 (110) В. Усилие катушек больше усилия пружин. Контактная система, перемещаясь, увеличивает сопротивление в цепи обмотки возбуждения ВГ.

При работе контакты непрерывно вибрируют, выбирая режим, соответствующий скорости вращения и нагрузке ВГ. Увеличение возможных при работе положений контактной системы повышает точность регулятора. Регуляторы напряжения типа СРН устанавливают на тепловозах ТЭМ1, ТЭ2 и ТГМ3. Регулятор расположен на панели совместно с промежуточным реле Р-45, конденсаторами и трубками резисторов ПЭ-150. Действие регулятора можно проследить по схеме его внутренних соединений (рис. 113). Катушки  $PK$  и  $HK$  через резисторы включены на зажимы  $BГ$ . Усилие, возникающее между катушками, уравнивается регулировочной пружиной. При прикосновении контактов  $CP$  и  $PP$  шунтируются резисторы  $R1$  и  $R3$ , ток, идущий через обмотку возбуждения ВГ, увеличивается и  $U_{BГ}$  растет. Замыкание контактов  $CP$  и  $L$  приводит к шунтированию обмотки возбуждения резистором

$R_2$ , ток возбуждения уменьшается. При среднем положении контакта  $CP$  в цепь включены два резистора с сопротивлением  $R_1$  и  $R_2$ , соединенные параллельно. Регулировка регулятора осуществляется изменением натяжения пружины, что приводит к увеличению или уменьшению напряжения во всем диапазоне частоты вращения. Колебания напряжения устраняются регулировкой зазора между контактами (0,5—1,0 мм). Точность поддержания напряжения  $75 \pm 2\text{В}$ .

Регуляторы напряжения ТРН применяются на тепловозах ТЭЗ, ТЭ10, ТЭП60, ТЭМ2, ТЭ10Л. Схема внутренних соединений регулятора и подключение его к ВГ показаны на рис. 114. При протекании тока по подвижной и неподвижной катушкам создается электромагнитное усилие, стремящееся втянуть подвижную катушку, а с ней и контактную планку вниз. Перемещению контактной планки противодействуют пружины. Принципиально действие регулятора ТРН не отличается от действия регулятора СРН. Характеристики регулятора подбирают таким образом, что равновесное состояние контактной планки возможно только при выбранном  $U_{ВГ}$ . Вибрируя, контактная планка выбирает сопротивление  $R_1$  цепи обмотки возбуждения, при котором  $U_{ВГ} = \text{const}$ .

Работа регулятора была бы неустойчивой без стабилизирующего устройства, которое выполнено в виде обратной связи  $R_3 - R_4$ . Действие ее заключается в следующем: изменение напряжения ВГ не может происходить одновременно с изменением сопротивления резистора  $R_1$ , а будет отставать, так как генератор имеет магнитную инерцию. Без обратной связи сопротивление резистора  $R_1$  изменяется больше, чем это требуется, и планка, начиная двигаться в обратном направлении, также пройдет нужное положение и вновь переменит направление движения. Движения планки будут повторяться в виде незатухающих колебаний, что недопустимо.

Для устранения колебаний планки введена электрическая связь между катушками регулятора и обмоткой возбуждения генератора: ток резисторов  $R_5$  и  $R_6$  протекает к обмотке возбуждения ВГ и параллельной обмотке под-

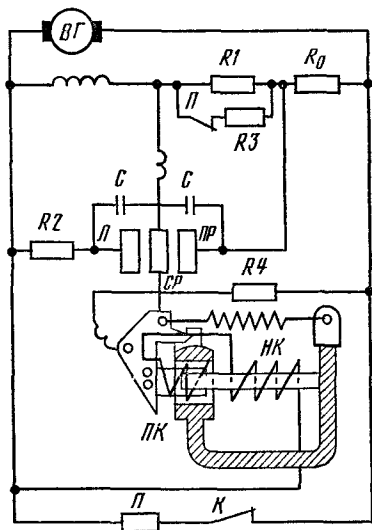


Рис. 113. Схема внутренних соединений регулятора напряжения СРН-7:

ПР — правый неподвижный контакт; СР — средний контакт; Л — левый неподвижный контакт; П — промежуточное реле; ПК и НК — подвижная и неподвижная катушки регулятора; К — контакт контроллера

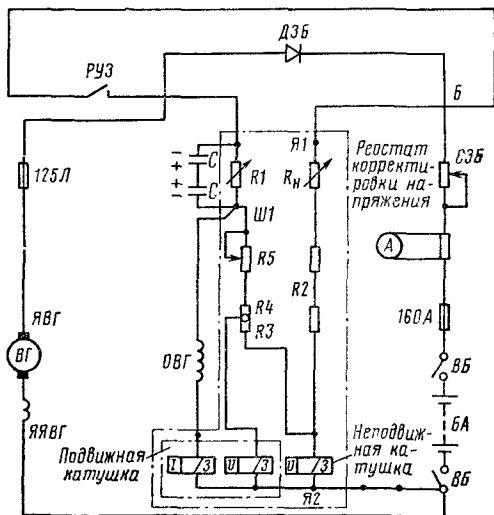


Рис. 114. Принципиальная схема регулятора напряжения ТРН-1:

ВГ — вспомогательный генератор; Б — диод заряда батареи; РУЗ — реле управления;  $R_1 - R_5$ ,  $R_6$  — резисторы; С — конденсаторы; БА — аккумуляторная батарея

вижной катушки одновременно. Если напряжение  $U_{ВГ}$  уменьшилось, то планка начинает подниматься, замыкая часть резистора  $R_I$ . В результате в нем и параллельной обмотке подвижной катушки ток возрастет; увеличится усилие, действующее на подвижную часть, и контактная планка опустится, размыкая часть только что замкнутых пальцев. Движение планки к необходимому для данного режима положению происходит постепенно — перерегулирование не имеет места.

Напряжение регулятора регулируют изменением натяжения пружин, а при появлении неустойчивых колебаний — сопротивлением обратной связи. Регулятор ТРН является более совершенным аппаратом и может поддерживать напряжение генератора с точностью  $75 \pm 1$  В.

Регуляторы напряжения с переменным угольным резистором устанавливаются на тепловозах ВМЭ и дизель-поездах производства Венгерской Народной Республики. Регулятор состоит из магнитной П-образной системы с наконечниками, между которыми расположен вращающийся якорь, соединенный с угольным столбиком (рис. 115, а). Угольный столбик (переменный резистор в цепи обмотки возбуждения) собран из шайб, и сопротивление его определяется сжимающим усилием, которое развивает якорь, поворачиваясь в зависимости от намагничивания сердечника катушкой. Магнитному моменту противодействуют усилия сжатых столбиков и пружины. Для устранения колебаний предусмотрен гаситель-демпфер, состоящий из цилиндра, наполненного маслом (иногда воздухом), и поршня с отверстием, перемещающегося в нем. Регулятор изменяет сопротивление в цепи возбуждения бесступенчато (рис. 115, б). Добавляется иногда вторая катушка на сердечнике магнитной системы, которая питается током заряда аккумуляторной батареи. В случае значительного увеличения тока заряда якорь, поворачиваясь, уменьшает напряжение ВГ и, следовательно, ограничивает зарядный ток. В эксплуатации суммарное сопротивление угольного столбика значительно меняется с течением времени за счет адсорбции газов и паров из окружающего воздуха, что приводит к нарушению точности регулирования. Это является существенным недостатком регуляторов данного типа.

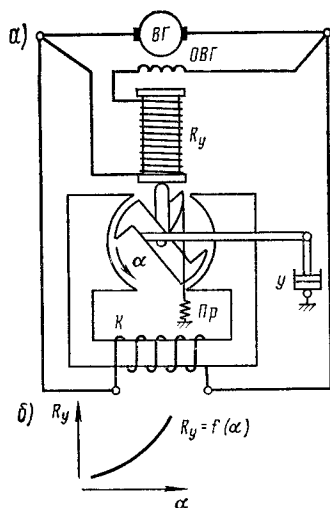


Рис. 115. Схема регулятора напряжения с угольным столбиком.

а — схема; б — зависимость сопротивления  $R$  от угла  $\alpha$ ,  $R_y$  — переменное угольное сопротивление;  $Y$  — демпфер-успокоитель;  $Pr$  — пружина;  $K$  — рабочая катушка

## 26. ПРОЧЕЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

**Резисторы.** На тепловозах применяются резисторы трех видов.

*Ленточные фехралевые* (Fe, Cr) резисторы типа КФ, рассчитанные на токи более 20 А, устанавливаются для шунтировки обмоток возбуждения тяговых двигателей в цепи дифференциальной обмотки и заряда батарей.

*Регулируемые проволочные* резисторы типа СР на ток до 20 А используют в цепях возбуждения возбудителя, вспомогательного генератора и в цепи реле заземления. Резисторы изготовляют из нихромовой проволоки, намотанной на керамическое основание.

При незначительных токах (в цепях управления) устанавливают *проволочные* резисторы ПЭ, изготовленные из константановой или нихромовой проволоки, которую после намотки на основание заливают жаростойкой эмалью, пре-

дохраняющей проволоку от повреждений. Резисторы ПЭ используются как нерегулируемые добавочные резисторы. Бывают и регулируемые резисторы такого типа. В них имеется непокрытая эмалью дорожка, по которой перемещается контактный хомут.

**Тяговый электромагнит.** Тяговый электромагнит ЭТ-52 (рис. 116) прямоходового типа, закрытого исполнения, применяется в регуляторе частоты вращения вала дизеля для механизма затяжки всережимной пружины. Магнит не имеет противодействующей пружины. Для регулировки хода якоря установлен винт. Тяговое усилие при зазоре 2,5 мм не менее 15Н. Конструкция неразборная. Тяговый электромагнит типа ЭТ-54 аналогичен по конструкции магниту ЭТ-52. Применяется для пуска и остановки дизеля, ранее назывался блок-магнитом (БМ). Тяговое усилие больше, чем у БМ типа БМ-1А-2, и составляет не менее 29,4Н при зазоре 3 мм. Конструкция неразборная и рассчитана на длительный срок службы без ремонта.

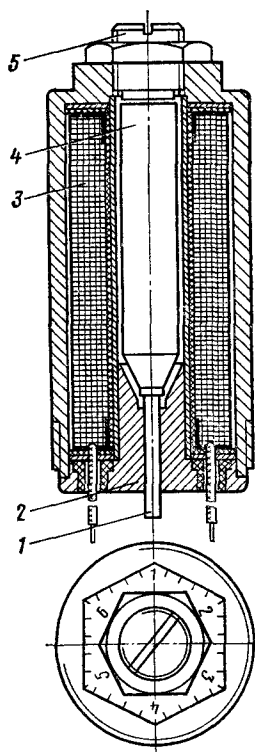


Рис. 116. Тяговый электромагнит:

1 — шток; 2 — сердечник; 3 — катушка; 4 — якорь; 5 — регулировочный винт

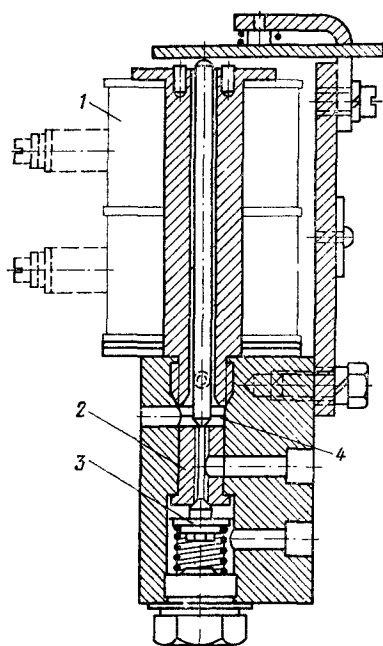


Рис. 117. Электропневматический вентиль типа ВВ

**Электропневматические вентили.** Для дистанционного управления пневматическими приводами аппаратов применяют электропневматические вентили (ЭПК), состоящие из электромагнита 1 и системы клапанов 2 (рис. 117). Каждый вентиль имеет два клапана: впускной 3 и выпускной 4, и три отверстия для воздуха: первое — для подвода сжатого воздуха, второе — к цилиндру привода, третье — выпуск воздуха в атмосферу. Вентили делятся на включающие и выключающие. Во включающих вентилях клапаны соединяют сжатый воздух с приводом аппарата при возбужденной катушке. Вентили обозначаются ВВ1, ВВ2, ВВ3; с увеличением цифры возрастает расход воздуха через клапанную систему.

## ГЛАВА 6

### СТАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

---

#### 27. ВЫПРЯМИТЕЛИ

Выпрямитель — наиболее распространенный в силовых системах и системах управления и регулирования вид статического (вентильного) преобразователя. Выпрямители нашли широкое применение на тепловозах с передачами постоянного тока в системах регулирования и защиты, с машинами переменного тока их применение еще шире и захватывает основные узлы энергетической цепи. Выпрямители классифицируют по схеме преобразования (числу фаз, числу плечей преобразователя). Наиболее часто применяются однофазные и трехфазные системы выпрямления.

Выпрямители однофазного тока осуществляются в следующих вариантах:

1) одно плечо (однополупериодный), штриховой линией показан нулевой вентиль НВ (рис. 118, а);

2) два плеча (двухполупериодный) с нулевым выводом (рис. 118, б);

3) четыре плеча (двухполупериодный) мостовой (рис. 118, в).

Выпрямители трехфазного тока возможны следующих систем:  $n$ -плечный с нулевым выводом. Обычно осуществляется только трехплечный (рис. 118, г) и шестиплечный; шестиплечный мостовой (рис. 118, д); параллельное включение трехфазных мостовых схем (рис. 118, е).

В случае необходимости уменьшить пульсацию выпрямленного тока или наличия высших гармоник в сети переменного тока могут быть осуществлены выпрямители с любым количеством фаз. В этом случае применяется выпрямитель, представляющий собой параллельное или последовательное соединение двух или больше мостовых выпрямителей, работа которых сдвинута по фазе на угол  $\pi/m$ . В силовой полупроводниковой технике в подавляющем большинстве случаев применяются мостовые схемы выпрямления, у которых типовая мощность источников переменного тока минимальна.

**Выпрямители однофазного тока.** Мощные выпрямители однофазного тока применяются относительно редко. Однако они нашли широкое применение в системах электровозов и начинают применяться в системах возбуждения тяговых генераторов тепловозов. Мостовая схема (см. рис. 118, в) является наиболее распространенной для тепловозных установок.

Графики напряжений и токов в обмотках статора генератора (вторичной обмотке трансформатора, рис. 119, а), в нагрузке (рис. 119, б) и плече выпрямителя (рис. 119, в) приведены на рис. 119. Действующее значение выпрямленного напряжения можно определить по выражению

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi k_T} U_1,$$

где  $k_T$  — коэффициент трансформации (при питании от трансформатора).

Число фаз принято равным 2.

При чисто активной нагрузке ( $L_d = 0$ ) действующее значение тока

$$I_d = \frac{2}{\pi} I_{\max}.$$

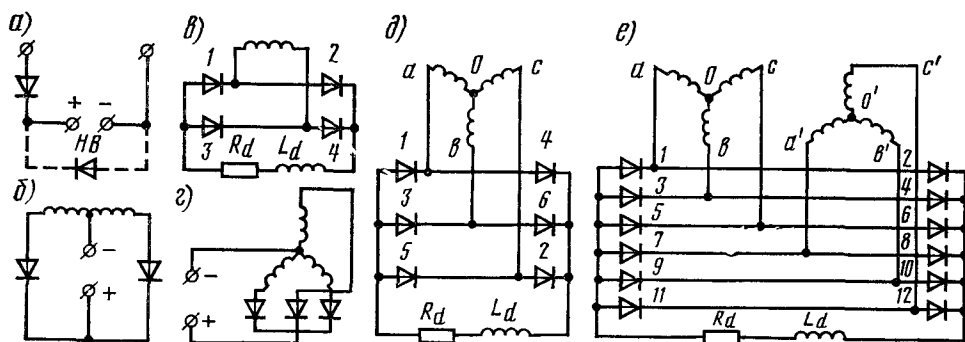


Рис. 118. Схемы выпрямителей

Среднее значение тока, протекающего через вентиль,  $I_a = I_d/2$ . Значение токов обмотки источника питания при  $L_d = 0$

$$I_2 = k_T I_1 = \frac{I_{a \max}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d$$

и при наличии значительной индуктивности нагрузки  $I_2 = k_T I_1 = I_d$ .

Установленная мощность источника переменного тока определяется мощностью нагрузки и схемой преобразования и характеризуется расчетной (типовой) мощностью. При наличии  $L_d$

$$P_T = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi k_T}{2\sqrt{2}} U_{d0} \frac{1}{k_T} I_d + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{d0} I_d \right) = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} P_d \approx 1,11 P_d.$$

При чисто активной нагрузке

$$P_T = \frac{\pi^2}{8} P_d \approx 1,23 P_d.$$

Следовательно, типовая мощность зависит также и от характера нагрузки. Максимальное значение обратного напряжения на вентиле  $U_{обр. \max} = \sqrt{2} U_2 = \frac{\pi}{2} U_d$ . Основные соотношения параметров для одно- и трехфазных выпрямителей приведены в табл. 18.

Таблица 18

| Характеристика выпрямителя                    |            | $\frac{U_{d0}}{U}$ | $\frac{U_{обр. \max}}{U_{d0}}$ | $\frac{I_{аср}}{I_d}$ | $\frac{I_a}{I_d}$ | $\frac{I_2}{I_d}$ | $k_{\Phi} = \frac{W}{I_{Вср}}$ |
|-----------------------------------------------|------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| Схема выпрямления                             | Число плеч |                    |                                |                       |                   |                   |                                |
| С нулевым выводом                             | 2          | 0,90               | 3,14                           | 0,50                  | 0,71              | 0,71              | 1,57                           |
|                                               |            |                    |                                |                       | 0,785             | 0,785             | 1,41                           |
| Мостовая                                      | 4          | 0,90               | 1,57                           | 0,50                  | 0,71              | 1,0               | 1,57                           |
|                                               |            |                    |                                |                       | 0,785             | 1,11              | 1,41                           |
| С нулевым выводом                             | 3          | 1,17               | 2,09                           | 0,33                  | 0,577             | 0,557             | 1,77                           |
|                                               |            |                    |                                |                       | 0,585             | 0,585             | 1,73                           |
| Мостовая                                      | 6          | 2,34               | 1,045                          | 0,33                  | 0,577             | 0,817             | 1,73                           |
|                                               |            |                    |                                |                       |                   |                   | 1,73                           |
| С нулевым выводом и с уравнительным реактором | 6          | 1,17               | 2,09                           | 0,167                 | 0,29              | 0,29              | 2,46                           |
|                                               |            |                    |                                |                       |                   |                   | 2,46                           |

Примечание. Принято  $x_a = 0$ ; в числителе — для смешанной активно-индуктивной нагрузки, в знаменателе — для активной нагрузки.

**Выпрямители трехфазного тока.** Большинство выпрямителей трехфазного тока выполняется по мостовой схеме (см. рис. 118, *д*). Ток через каждый вентиль проходит в течение  $1/3$  периода переменного тока. В катодной группе вентилях ток пропускает тот вентиль, у которого потенциал анода наиболее высокий, а в анодной группе — тот вентиль, у которого потенциал катода наиболее низкий. Каждый вентиль одной группы работает поочередно с двумя вентилями другой группы, соединенными с другими фазами источника переменного тока. Коммутация вентилях происходит через каждую шестую часть периода, и выпрямленное напряжение, определяемое линейным напряжением обмотки статора, имеет шестикратную пульсацию. Графики изменения параметров тока и напряжения показаны на рис. 120.

Среднее значение выпрямленного напряжения может быть определено, если принять  $m = 6$ , и вместо фазного напряжения  $U_2$  подставить линейное  $\sqrt{3}U_2$ :

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{6}U_2 \sin \frac{\pi}{6}}{\pi/6} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2,34 U_2.$$

При чисто активной нагрузке

$$I_d = \frac{3}{\pi} I_{a \max}.$$

Среднее значение тока, протекающее через вентиль  $I_a = \frac{1}{3} I_d$ . Токи фазы источника переменного тока при наличии индуктивности в нагрузке

$$I_2 = \sqrt{\frac{2\pi}{3\pi} I_d^2} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}.$$

При чисто активной нагрузке

$$I_2 = \frac{\pi}{3} I_d \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right)} \approx 0,818 I_d.$$

Типовая мощность источника переменного тока при индуктивной нагрузке

$$P_T = 3 \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_{d0} \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = \frac{\pi}{3} P_d \approx 1,045 P_d.$$

При чисто активной нагрузке

$$P_T = 3 \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_{d0} \cdot 0,818 I_d \approx 1,045 P_d.$$

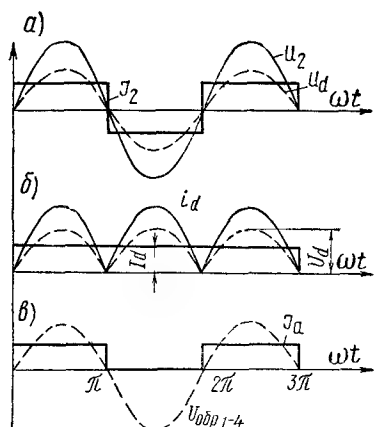


Рис. 119. Графики напряжений и токов для мостового выпрямителя однофазного тока (сплошные линии — активная, штриховые линии — индуктивная нагрузка)

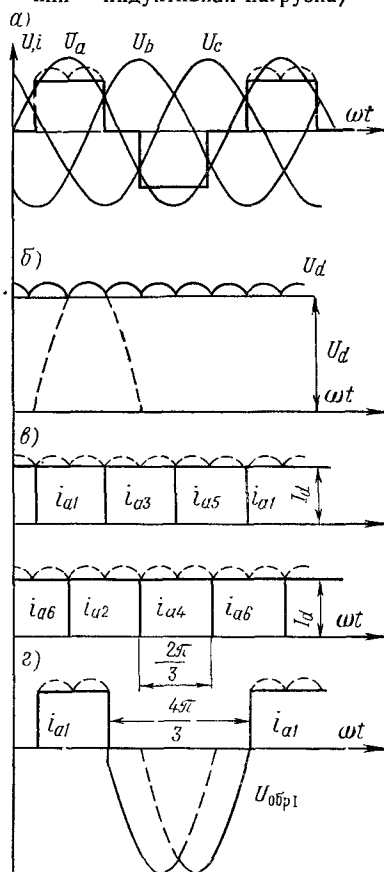


Рис. 120. Графики напряжений и токов для мостового выпрямителя трехфазного тока:

*a* — фаза источника переменного тока; *б, в* — напряжение и ток нагрузки; *г* — ток и напряжение вентиля (плеча)

Следовательно, мощности источника переменного тока и тока от характера нагрузки практически не зависят. Максимальное значение обратного напряжения

$$U_{\text{обр max}} = \sqrt{3}\sqrt{2} \cdot U_2 = \sqrt{6} \cdot U_2 = \frac{\pi}{3} U_{d0}.$$

Выпрямитель тепловозов ТЭ116, ТЭП70 и др. (см. рис. 116, е) состоит из двух трехфазных мостовых схем, получающих питание от синхронного генератора с шестифазной обмоткой, соединенной в две «звезды» со сдвигом на  $30^\circ$  эл. На стороне постоянного тока мосты соединены параллельно. В результате имеется 12-тактная схема выпрямления, при которой в цепях тяговых двигателей практически отсутствует пульсация.

## 28. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

В некоторых системах напряжение на выходе выпрямителей должно регулироваться по заданному закону либо быть стабилизированным, несмотря на колебания напряжения питающей сети и нагрузки. Для выполнения поставленной задачи могут применяться различные способы: переключение выводов, применение трансформаторов с подвижными сердечниками, применение реакторов насыщения и управляемые выпрямители.

Принцип действия управляемого выпрямителя рассмотрим на примере выпрямителя однофазного тока с нулевым выводом. Вентили в простой схеме выпрямления (рис. 121) проводят ток поочередно: каждый во время той части периода, когда напряжение на его аноде более положительно. Среднее значение выпрямленного напряжения зависит от его амплитудного значения.

Заменяв в схеме вентили на тиристоры (рис. 122), получаем управляемый выпрямитель. Когда вступает в работу фазовое управление, включение каждого вентилля запаздывает, чем задерживается передача тока от предыдущего тиристора к следующему. Это заставляет ток течь в вентиле, который имеет меньшее положительное среднее напряжение за время интервала его проводимости. Задержка может быть достаточной, чтобы среднее за время интервала проводимости тиристора значение напряжения стало отрицательным. Задержка передачи тока от тиристора к тиристорам может принимать любое значение в пределах от  $0$  до  $180^\circ$ . Пока задержка увеличивается от  $0$  до  $90^\circ$ , среднее значение выпрямленного напряжения уменьшается до  $0$  (рис. 122, в), при задержке  $90^\circ$ — $180^\circ$  среднее значение напряжения делается отрицательным (рис. 122, г). Режим работы системы в этом случае называется *инверторным*, и для создания тока в схеме необходимо иметь в ней источник постоянного тока.

Задержка открытия тиристора —  $\alpha$  применяется для измерения угла фазового управления — задержки по отношению к углу включения тиристорам, при котором получается максимальное выпрямленное напряжение. Среднее значение выпрямленного напряжения зависит от  $\alpha$  и характера нагрузки. При чисто активной нагрузке кривая выпрямленного тока повторяет кривую выпрямленного напряжения. Задержка момента естественной коммутации на

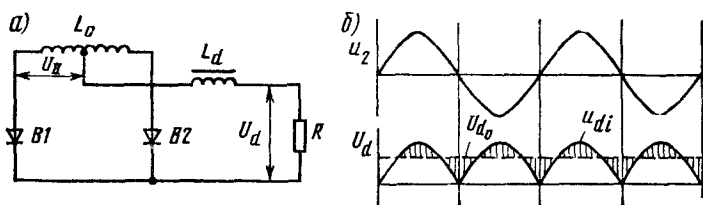


Рис. 121. Двухполупериодный неуправляемый выпрямитель.  
а — схема; б — графики напряжения в фазе источника и на нагрузке

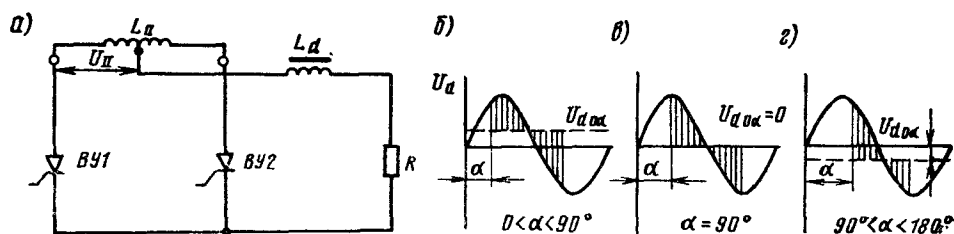


Рис. 122. Двухполупериодный управляемый выпрямитель с фазовым управлением:  
а — схема; б, в, г — графики напряжений

угол  $\alpha$  вызывает перерывы в выпрямленном токе длительностью  $\frac{\alpha}{\omega}$ , что определяет соответствующие перерывы в выпрямленном напряжении.

Имеет место прерывистый режим, при этом, считая, что напряжение источника питания неизменно,

$$U_{d0\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{1}{2} U_{d0} (1 + \cos \alpha),$$

где  $U_{d0}$  — среднее значение выпрямленного напряжения при  $\alpha = 0$ ;

$U_2$  — действующее значение выпрямленного напряжения;

$U_{d0\alpha}$  — среднее значение выпрямленного напряжения при  $0 < \alpha < 90^\circ$ .

При  $L_d = \infty$  перерывов в выпрямленном токе нет при любом значении  $\alpha$ , режим непрерывен и

$$U_{d0\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} \cdot U_2 \sin \omega t d\omega t = U_{d0} \cos \alpha.$$

При  $L_d$ , имеющей конечные значения, т. е. при работе выпрямителя на смешанную нагрузку, для вычисления  $U_{d\alpha}$  используется предыдущее уравнение, справедливое для любой схемы выпрямления. Основные соотношения между параметрами в различных схемах управляемых выпрямителей приведены в табл. 17. Управляемый выпрямитель имеет внешнюю характеристику  $U_d = f(I_d)$ , которая зависит от параметров источника питания. Если нагрузка выпрямителя активно-индуктивная, то

$$i_d = I_d = I_{a \max} = \frac{U_{d0}}{R_d}.$$

В действительности процесс коммутации протекает не мгновенно, а в течение некоторого времени. Причиной этого является индуктивное сопротивление рассеяния обмотки источника питания (вторичной обмотки трансформатора или фазы статора генератора)

$$x_a = \omega L_a = \frac{U_{к\%}}{100} \frac{U_{2н}}{I_{2н}},$$

где  $L_a$  — индуктивность рассеяния, приведенная к обмотке источника питания;

$U_{к\%}$  — напряжение короткого замыкания источника питания, %;

$U_{2н}, I_{2н}$  — номинальные значения напряжения и тока источника питания.

Индуктивность  $L_d$ , включенную в цепь выпрямленного тока, обычно называют *катодной*, а индуктивность  $L_a$  — *анодной*. Анодная индуктивность не дает возможности току в тиристоре, выходящем из работы, мгновенно пре-

кратиться, а в тиристоре, вступающем в работу, мгновенно возрасти, следовательно, в течение периода коммутации ток пропускают оба тиристора.

Рассмотрим процесс коммутации с учетом  $L_a$ . В контуре коммутации составленном из тиристорov и фаз источника питания, действует линейное напряжение  $e_b - e_a$ , уравновешиваемое э. д. с. самоиндукции

$$2\sqrt{2} \cdot U_2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right) = 2L_a \frac{di_k}{dt},$$

где  $i_k = I_d - i_1 = i_2$  — ток контура коммутации;

$i_1$  и  $i_2$  — токи тиристорov;

$m$  — число плеч выпрямителя.

Интегрируя выражение, получаем

$$\begin{aligned} i_k &= \frac{\sqrt{2} \cdot U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{x_a} \int_{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}}^{\omega t} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right) d\omega t = \\ &= \frac{\sqrt{2} \cdot U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{x_a} \left[ 1 - \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right) \right]. \end{aligned}$$

Коммутационный интервал ограничен некоторой координатой  $\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \gamma$ , где выполняется условие  $i_k = I_d$ , откуда можно определить

$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{x_a I_d}{\sqrt{2} \cdot U_2 \sin \frac{\pi}{m}} \right).$$

Угол  $\gamma$  называется *углом коммутации*. Среднее значение выпрямленного напряжения уменьшается из-за влияния  $L_a$  на

$$\Delta U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{m}} \int_{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \gamma} 0,5 (e_b - e_a) d\omega t \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{2\pi}{m}} (1 - \cos \gamma).$$

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = U_{d_0} - \Delta U_d = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{2\pi}{m}} (1 + \cos \gamma)$$

или после замены  $\gamma$

$$U_d = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\pi/m} - \frac{x_a I_d}{\frac{2\pi}{m}}.$$

Полученное выражение является уравнением внешней характеристики выпрямителя (как управляемого, так и неуправляемого). Задаваясь значением токов  $I_d$ , можно построить графическую зависимость  $U_d = f(I_d)$ , которая необходима, в частности, для расчета системы возбуждения тягового генератора тепловоза (по типу ТЭ116).

К. п. д. полупроводниковых выпрямителей, в том числе и управляемых, зависит от оценки мощности выпрямленного тока. Различают две мощности выпрямленного тока: полную и мощность постоянной составляющей. Полную мощность могут использовать цепи, состоящие из одних активных сопротивлений, среднее значение полной мощности за период

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_d i_d dt.$$

Большинство потребителей (обмотки возбуждения электромашин, аккумуляторы и т. д.), которым принципиально необходим выпрямленный ток, используют лишь постоянную составляющую выпрямленного тока. Переменная составляющая вызывает в таких нагрузках только увеличение потерь.

Среднее значение мощности постоянной составляющей

$$P_d = U_d I_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_d dt \frac{1}{T} \int_0^T I_d dt.$$

Соответственно различают два понятия: к. п. д. выпрямителя

$$\eta'' = \frac{P_d'}{P_d' + \Delta P'},$$

где  $\Delta P'$  — среднее значение потерь во всех элементах выпрямителя, и к. п. д. выпрямления

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + \Delta P}.$$

Если  $\eta'$  отражает сущность энергетического процесса, то  $\eta$  дает оценку эффективности работы выпрямителя. К.п. д. выпрямления можно представить как  $\eta = k_d \eta'$ . Коэффициент использования выпрямленного тока  $k_d = P_d / P_d' \leq 0$ . Для повышения  $k_d$  необходимо увеличивать количество плеч выпрямителя и применять сглаживающие фильтры.

Выпрямители являются потребителями реактивной энергии. Коэффициент мощности выпрямителя

$$\mu = \frac{P_1}{U_1 I_1} = \mu \cos \varphi_1.$$

Коэффициент искажений, характеризующий гармонический состав первичного тока,

$$\mu = \frac{I_1(1)}{I_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \frac{I_1^2(i)}{I_1^2(1)}}},$$

где  $I_1(1)$  — действующее значение первой гармоники первичного тока;  
 $I_1^2(i)$  — действующее значение  $i$ -й высшей гармоники первичного тока.

Для выпрямителя однофазного тока и нагрузки со значительной индуктивностью

$$\mu = \frac{P_d}{U_1 I_1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,9.$$

Коэффициент сдвига  $\cos \varphi_1$  характеризует сдвиг по фазе между первой гармоникой первичного тока и напряжением питающего источника. При  $L_d = \infty$  и  $L_d \neq 0$  первая гармоника первичного тока сдвинута относительно напряжения на угол регулирования  $\alpha$ , следовательно  $\cos \varphi_1 = \cos \alpha$ .

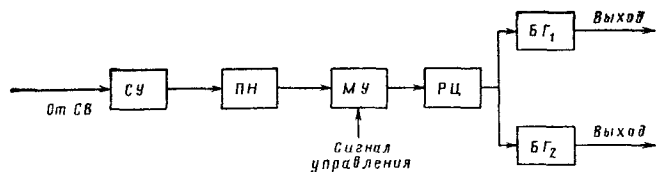


Рис. 123. Функциональная схема канала генератора импульсов с вертикальным управлением

При соизмеримой мощности источника питания и выпрямителя высшие гармоники тока вызывают заметные падения напряжения в сопротивлениях системы и тем самым искажают синусоидальную форму напряжения источника питания, что ухудшает режим работы других потребителей. Уменьшение мощности искажений и тем самым степени искажения напряжения достигается увеличением количества плеч выпрямителя и включением на входе резонансных индуктивно-емкостных фильтров, практически эти же мероприятия положительно влияют на  $k_d$ . Коэффициент мощности может быть улучшен тремя путями: применением схем с нулевыми вентилями и с регулированием напряжения источника питания; изменением режима выпрямления, приводящим к генерации реактивной мощности вместо ее потребления; применением специальных режимов управления тиристорами.

**Принципы построения систем управления и автоматического регулирования.** Для работы выпрямителя на тиристорах необходимо их включение в определенные моменты времени. При этом должно соблюдаться с достаточной точностью равенство углов запаздывания (регулирования) плеч выпрямителя, иначе называемое *симметрией углов  $\alpha$* . Асимметрия углов регулирования приводит к неравномерной нагрузке вентиля и фаз обмоток генератора, увеличению пульсаций и появлению их в выпрямленном токе обмоток генератора, увеличению пульсаций и появлению в выпрямленном токе трудно сглаживаемой **низкочастотной** составляющей, уменьшению к.п.д. выпрямителя, увеличению **искажения** первичного тока и сужению диапазона регулирования. Асимметрия **углов** регулирования особенно вредна в выпрямителе трехфазного тока с уравнительным реактором, где она вызывает его подмагничивание. Включение тиристоров постоянным током не обеспечивает необходимой симметрии углов  $\alpha$ , приводит к излишнему рассеиванию мощности и нагреву вентиля вблизи управляющего электрода, поэтому его применение не рекомендуется. Также нецелесообразно с точки зрения симметрии углов регулирования включение синусоидальным током. Единственно приемлемым методом включения тиристоров является подача на управляющий электрод импульсов с достаточно крутым передним фронтом. Для выработки таких импульсов служат специальные системы, получившие название *систем зажигания*. Они же называются системами управления, системами включения тиристоров или просто *генераторами импульсов*.

Общая функциональная схема автоматического регулирования управляемого выпрямителя в системе возбуждения тягового генератора тепловозов серии 2ТЭ116 приведена на рис. 123. Система является совокупностью отдельных элементов и устройств, направленно воздействующих друг на друга и выполняющих каждое в отдельности определенную задачу.

Синхронизатор *СУ* обеспечивает переключение триодов преобразователя напряжения *ПН* синхронно с частотой питающего напряжения. *ПН* питает магнитный усилитель *МУ* прямоугольными импульсами, длительность которых определяется сигналом рассогласования, подаваемым на обмотку управления *МУ*. Импульсы с *МУ* осуществляют пуск блокинг-генераторов *БГ*. Распределительные цепочки *РЦ* предотвращают пуск *БГ* от напряжения на *МУ* при его холостом ходе. Блокинг-генераторы пускают поочередно от импульсов разной полярности, формируя импульсы тока и напряжения заданной длитель-

ности с интервалами в  $360^\circ$  эл. Импульсы *БГ* подаются на управляющие электроды тиристорov выпрямителя. Ток выпрямителя (ток возбуждения тягового генератора) зависит от значения рассогласования сигнала управления *МУ*. Задачей системы является формирование пилообразного напряжения, сравнение его с напряжением управления и последующее формирование прямоугольных импульсов, положение переднего фронта которых во времени определяется результатом сравнения. Используемый принцип управления известен под названием *принципа вертикального управления*.

К системам управления предъявляется ряд весьма жестких требований: высокая параметрическая надежность (работоспособность и минимальное изменение параметров в условиях эксплуатационных воздействий), мгновенная готовность к действию, простота согласования узлов между собой, малые габариты.

## 29. ИНВЕРТОРЫ

Преобразование постоянного тока в переменный (инвертирование) может осуществляться при помощи электрических вентилях, проводимостью которых можно управлять. Для этой цели используются тиристоры. Как было показано, выпрямитель с фазовым управлением и ведомый сетью инвертор (инвертор, частота тока в котором соответствует частоте сети и  $P_c \gg P_{ин}$ ) работают одинаково и любой из этих режимов может быть осуществлен в одной и той же схеме. При работе как выпрямитель устройство передает энергию в нагрузку постоянного тока. Когда оно работает как инвертор, источник постоянного напряжения нужен, чтобы создать ток в устройстве и передать мощность на сторону переменного тока, инверторный режим наступает при  $\alpha = 90 \div 180^\circ$  эл. (рис. 124). Ведомый сетью (неавтономный) инвертор используется при реостатных испытаниях тепловозов с рекуперацией энергии. Подобные установки с каждым годом находят все большее распространение.

Важнейшим типом преобразователя энергии является автономный (независимый) инвертор, служащий для преобразования постоянного тока в переменный с заданным числом фаз, с регулируемой частотой и напряжением. Автономный инвертор — основное звено электропривода переменного тока, а следовательно, и тепловозной электрической передачи с машинами переменного тока.

**Классификация автономных инверторов.** Автономные инверторы классифицируют по двум признакам: схеме преобразования (числу плеч преобразователя, фазности инвертируемого тока); принципу принудительного выключения тиристоров (принципу коммутации). Имеются следующие схемы преобразования:

- 1) однофазного тока — одно плечо (рис. 125, а);
- 2) однофазного тока с нулевым выводом нагрузки — два плеча (рис. 125, б);
- 3) однофазного тока с нулевым выводом источника постоянного тока — два плеча (рис. 125, в);
- 4) мостовая однофазного тока — четыре плеча (рис. 125, г);
- 5) трехфазного тока с нулевым выводом нагрузки — три плеча (рис. 125, д);
- 6) мостовая трехфазного тока — шесть плеч (рис. 125, е);
- 7) трехфазного тока с уравнительным реактором — шесть плеч (рис. 125, ж).

Остальные возможные схемы практически не осуществляютсх.

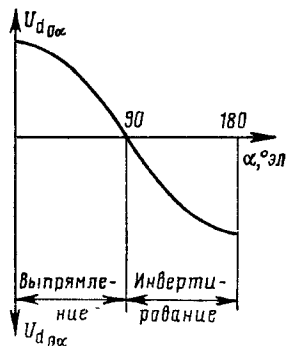


Рис. 124. Зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от угла управления  $\alpha$

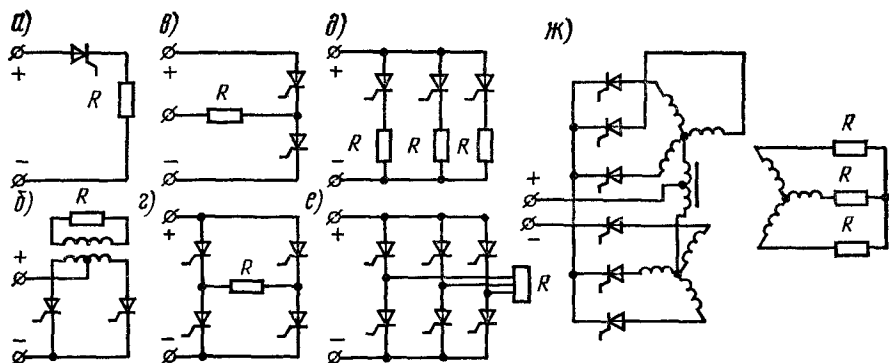


Рис. 125. Схемы инверторов

Основными способами принудительного выключения (коммутации) тиристоров и соответственно классами автономных инверторов считают следующие:

1. Коммутация при помощи параллельно включенного конденсатора, разряжаемого посредством другого рабочего тиристора. Этот способ легко проследить на примере простейшего мультивибратора. Рассмотрим его подробнее. При протекании тока через тиристор  $T1$  (рис. 126, а) конденсатор  $C$  заряжается с указанной полярностью. После включения тиристора  $T2$  разряд конденсатора выключает тиристор  $T1$ . Затем конденсатор  $C$  перезаряжается до напряжения противоположной полярности, подготавливаясь к выключению тиристора  $T2$ . На рассматриваемом принципе построены параллельные инверторы.

Параллельные стабилизированные инверторы применяют для питания разветвленной нагрузки. Особенно они целесообразны при частотах выше промышленной. Однако существует мнение, что для регулируемого электропривода они практически неприемлемы. Значительная емкость конденсатора, включенного параллельно двигателю, обеспечивает хорошую фильтрацию внешних гармоник и обеспечивает хорошую синусоидальность напряжения, но может вызвать самовозбуждение двигателя. Частотное регулирование параллельного инвертора нерационально, так как установленная мощность конденсаторов, определяемая минимальной частотой, слишком велика.

Параллельный инвертор применен на первом опытном тепловозе ВМЭ1-024 с передачей переменного тока. Недостатки этого инвертора устранены введением ряда конструктивных особенностей. В схему инвертора (рис. 126, б) введена внешняя подпитка коммутирующего конденсатора, что при низких частотах дает возможность снизить установленную емкость конденсатора в 10 раз по сравнению с обычной системой. Введение индуктивности  $L$  ограничивает всплески тока. Испытания инвертора показали его пригодность для локомотивной службы.

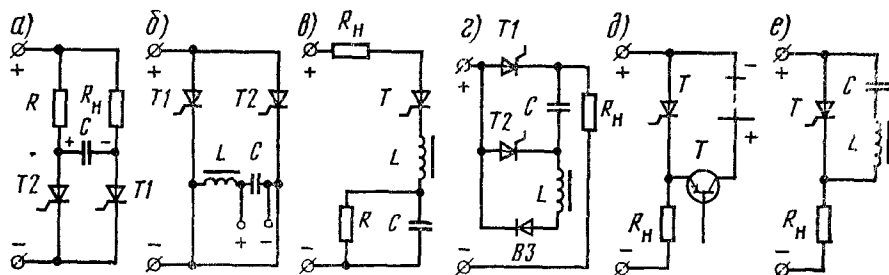


Рис. 126. Схемы коммутации автономных инверторов

2. Коммутация при помощи последовательного  $LC$ -контура, включенного последовательно с тиристором (рис. 126, в). При включении тиристора  $T$  конденсатор  $C$  заряжается, причем анодный ток имеет синусоидальную форму. Выключение тиристора происходит благодаря естественному спадаанию анодного тока (тока  $LC$ -контура) до нуля. Резистор  $R$  необходим для разряда конденсатора к моменту очередного включения тиристора. Интервал проводимости тиристора равен половине периода собственных колебаний  $LC$ -контура. С использованием рассмотренного принципа работают последовательные инверторы. Хотя такие инверторы отличаются повышенной устойчивостью к опрокидыванию, их применение ограничено резкой зависимостью напряжения на тиристорах и формы выходного напряжения от нагрузки.

3. Коммутация посредством параллельно включенного конденсатора, разряжаемого при помощи вспомогательного тиристора. Коммутирующий конденсатор  $C$  (рис. 126, г) подключен к рабочему тиристор  $T1$  через две параллельные цепочки: первая образуется вспомогательным тиристором  $T2$ , вторая — диодом  $V3$  и индуктивностью  $L$ . Первая служит для начального заряда и разряда конденсатора, вторая — для перезаряда конденсатора перед разрядом, с тем чтобы напряжение на нем имело полярность, необходимую для включения рабочего тиристора. Рабочий тиристор совместно с коммутирующим устройством представляет собой тиристорный аналог полностью управляемого вентиля.

Этот принцип коммутации лежит в основе определения класса инверторов с отделенными от нагрузки конденсаторами (компенсация реактивной мощности нагрузки за счет обмена энергией между фазами и возврат ее в источник постоянного тока). Возможность выключения плеча (фазы) без включения очередного плеча дает возможность вводить регулирующую паузу в процессе коммутации и тем самым регулировать инвертируемое напряжение.

Инверторы с отделенными от нагрузки конденсаторами полностью удовлетворяют требованиям регулирования напряжения в широких пределах, исключают возможность возбуждения двигателя за счет конденсаторов инвертора и имеют удовлетворительный гармонический состав выходного напряжения. Поэтому они могут быть основой электропривода переменного тока с частотным регулированием. Возможно их применение в энергетических установках тепловозов.

4. Коммутация посредством внешнего источника напряжения. Напряжение внешнего источника  $E$  на время выключения тиристора прикладывается к нему через транзистор (рис. 126, д). Управление коммутацией осуществляется подачей питания на базу транзистора.

5. Коммутация при помощи  $LC$ -контура (рис. 126, е), включенного параллельно тиристор. Как и во втором случае, выключение тиристора происходит вследствие спада анодного тока, определяемого колебательным процессом  $LC$ -контура.

**Способы регулирования напряжения в автономных инверторах.** В отличие от управляемого выпрямителя или зависимого инвертора в автономном инверторе регулировать выходное напряжение изменением фазы отпирающих импульсов нельзя. Для этого требуется введение либо дополнительных регулирующих силовых звеньев, либо увеличение мощности и усложнение схемы самого инвертора. Известно несколько способов регулирования напряжения: регулирование в цепи постоянного тока; регулирование в цепи переменного тока на выходе инвертора; широтно-импульсное регулирование с помощью вентиля инвертора; регулирование параметров элементов собственно инвертора; фазовое регулирование посредством сложения напряжений двух или нескольких блоков.

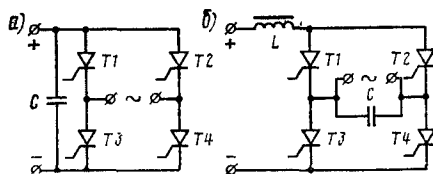


Рис. 127. Принципиальные схемы инверторов:

а — напряжения; б — тока

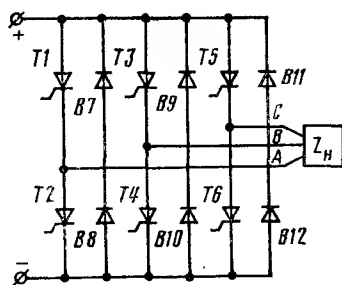


Рис. 128. Силовая схема автономного инвертора

Из всего многообразия инверторов можно выделить две большие группы (рис. 127): инверторы тока и инверторы напряжения. Различаются они тем, что имеют на выходе постоянными форму тока или форму напряжения. Из перечисленных способов регулирования напряжения для инверторов тока и напряжения принципиально применимы регулирование на входе и на выходе и фазовое регулирование между напряжениями блоков. Регулирование напряжения изменением параметров элементов инвертора осуществимо в инверторах тока, а широтно-импульсное регулирование — только в инверторах напряжения. Инверторы тока имеют преимущество при использовании их в качестве стабилизированных источников питания, особенно при повышенной выходной частоте. Из внешних характеристик инверторов следует, что инвертор тока не может работать на режимах, близких к холостому ходу, инвертор напряжения работает и на холостом ходу.

Несмотря на большое разнообразие систем автономных инверторов, все силовые схемы их могут быть представлены одним вариантом (рис. 128). Силовая схема автономного инвертора содержит управляемые вентили  $T1—T6$  и неуправляемые  $B7—B12$ . Вентили  $T1—T6$  служат для коммутации тока фаз,  $B7—B12$  — для замыкания тока, вызванного запасенной в нагрузке электромагнитной энергией. Посредством неуправляемых вентилях реактивная энергия перетекает между фазами нагрузки, а также возвращается источнику питания. Это явление часто называют *компенсацией реактивной мощности нагрузки* за счет источника постоянного тока. Наличие неуправляемых вентилях определяет форму кривой выходного напряжения — в общем случае прямоугольно-ступенчатую с амплитудой, равной выходному напряжению, без учета потерь в вентилях. Форма кривой напряжения и электромагнитные процессы инвертора зависят от длительности включения управляемых вентилях, характера нагрузки и схемы соединения ее фаз.

### 30. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕНТИЛИ

Основной характеристикой полупроводникового вентиля является зависимость тока  $i_v$  в нем от приложенного к вентилю напряжения  $U_v$ . В результате несимметрии электрических свойств вентиля в этой зависимости, называемой *вольт-амперной характеристикой* вентиля, различают прямую и обратную ветви, соответственно отражающие работу вентиля в прямом и обратном направлениях (рис. 129). Токи, с которыми приходится иметь дело при эксплуатации вентиля, в прямом направлении несоизмеримо больше, чем в обратном, наоборот, прямые напряжения значительно меньше обратных. В связи с этим прямые и обратные ветви вольт-амперной характеристики принято вычерчивать в разных масштабах, что приводит к кажущемуся излому характеристики в начале координат, которая фактически является плавной кривой.

При увеличении обратного напряжения до значения  $U_{пр}$  наступает пробой вентиля, процесс нарастания обратного тока начинает развиваться лавинообразно, приводя к потере вентиляем запирающих свойств. Явление пробоя ограничивает возможности их использования по обратным напряжениям, которые в процессе эксплуатации не должны достигать пробивного напряжения. Положение вольт-амперной характеристики вентиля в сильной мере зависит от его температуры (кривые 1, 2, 3 на рис. 129). Наиболее резко изменяется обратный ток вентиля. Чрезмерный рост температуры увеличивает обратные токи, что начинает ощущаться как потеря односторонней проводимости вентиля. Поэтому для каждого типа вентиля, определяющегося материалом полупроводника, характерна своя максимально допустимая рабочая температура.

Одним из своеобразных свойств полупроводниковых вентилях является их емкость, проявляющаяся при подаче на вентиль обратного напряжения. При низких частотах (для силовых вентилях до 1000 Гц) емкость вентиля практически не сказывается на его работе.

Номинальные (паспортные) характеристики тиристора вытекают из классификационной вольт-амперной характеристики (рис. 130). Номинальное напряжение принимается при  $U_n = 0,6 \cdot U_{пр}$  при этом, если при рабочей температуре  $U_{пер} < U_{пр}$ , то вместо  $U_{пер}$  учитывается  $U_{пр}$ . Ток удержания  $I_{уд}$  — минимальный прямой ток, ниже которого тиристор выключается. Ток необходим для расчета минимально допустимой нагрузки преобразователей. Для расчета потерь и последовательного соединения вентилях необходимо знать токи утечки в прямом  $I_{утп}$  и обратном  $I_{уто}$  направлениях.

Важнейшими проектными характеристиками тиристора являются характеристики цепи управления, определяющие проектирование систем управления преобразователей. Для построения систем управления необходимо знание следующих величин: минимальных напряжений и тока в цепи управления тиристора, обеспечивающих надежное включение его при любых эксплуатационных условиях; максимально допустимых напряжений и тока в цепи управления, не вызывающих повреждения тиристора.

Характеризующие цепь управления величины представлены в виде диаграммы управления на рис. 131. Через  $R_{y\max}$  и  $R_{y\min}$  обозначены граничные

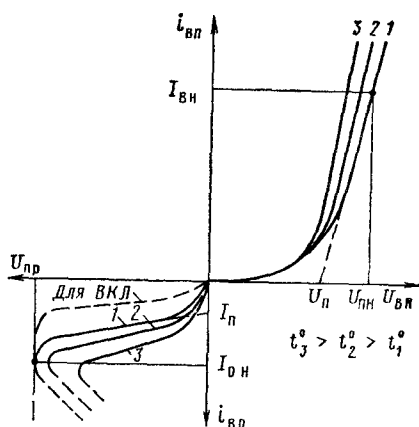


Рис. 129. Вольт-амперная характеристика диода

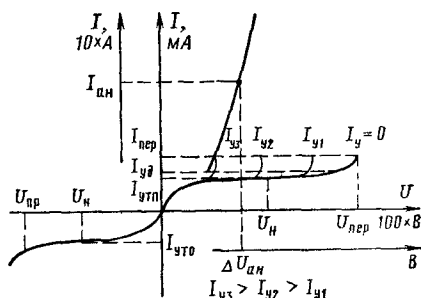


Рис. 130. Классификационная вольт-амперная характеристика тиристора

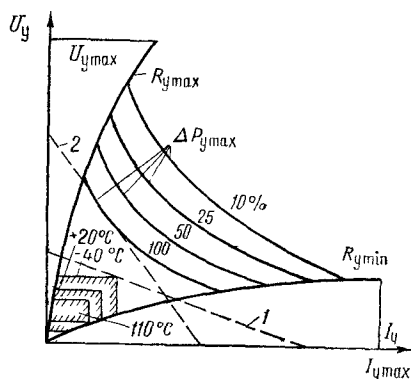


Рис. 131. Диаграмма управления тиристором

вольт-амперные характеристики цепи управления тиристора данного типа. В отличие от вольт-амперной характеристики силовой цепи температурный коэффициент сопротивления управляющего перехода положителен, т. е. с увеличением температуры прямая и обратная ветви характеристики передвигаются ближе к оси напряжений. В связи с этим граничные характеристики следует определять для тиристорov, имеющих наибольшее сопротивление цепи управления при наибольшей рабочей температуре (+110° С) и наименьшее — при наименьшей температуре (—40° С).

Ток и напряжение управления имеют значительный разброс. При заданном анодном напряжении они находятся в области, ограниченной штриховкой. Граничные значения определяются следующим образом. Граничные напряжения — максимальное (верхняя граница заштрихованной области) и минимальное (нижняя граница) значения напряжения, необходимого для отпирания тиристорov при соответствующей температуре. Граничный ток (правая граница) — максимальное значение тока, необходимого для отпирания тиристора при данной температуре. Диаграмма управления ограничена характеристиками максимально допустимых значений напряжения  $U_{y\max}$ , тока  $I_{y\max}$  и мощности потерь  $P_{y\max}$ , выделяемых в тиристоре при протекании тока управления.

Значение  $\Sigma P_{y\max}$  зависит от относительной длительности импульса управления. Для обеспечения надежного включения тиристорov в рабочем диапазоне температур система управления должна обеспечивать токи и напряжения, превышающие граничные значения. Поэтому внешняя характеристика системы управления не должна проходить через заштрихованную область на диаграмме управления, а может лишь касаться ее (прямая 1). Значения тока и напряжения управления не могут быть и бесконечно большими. Они ограничены максимально допустимыми значениями средней мощности потерь, тока и напряжения в цепи управления. Поэтому внешняя характеристика 2 не должна пересекать кривую допустимой мощности, а может лишь касаться ее.

Граничные значения тока и напряжения управления зависят не только от температуры, но и от анодного напряжения. Для обеспечения отпирания тиристора анодное напряжение принимается равным 6 В, так как при больших значениях граничный ток управления почти не снижается. Потери в вентиле, вызывающие его нагревание, принято разделять на прямые, выделяющиеся при прохождении прямого тока, и обратные, вызванные приложенным к вентилю обратным напряжением. Прямые потери составляют основную долю потерь и являются определяющими в тепловом режиме вентиляей.

Мощность прямых потерь можно подсчитать по уравнению для средней мощности за период переменного тока

$$P_{вп} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{вп} i_{вп} d\varphi,$$

где  $U_{вп}$  и  $i_{вп}$  — мгновенные значения прямого напряжения и прямого тока вентиля.

Аппроксимировав ветвь характеристики (см. рис. 127), можно записать  $U_{вп} = U_{п} + R_{д} i_{вп}$ .

Откуда для мощности прямых потерь

$$P_{вп} = U_{п} I_{в\text{ср}} + R_{д} I_{в}^2.$$

Потери в вентиле зависят как от среднего значения прямого тока за период

$$I_{в\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{вп} d\varphi,$$

так и от квадрата действующего значения тока вентиля

$$I_{\text{в}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{\text{вп}}^2 d\varphi.$$

Отсюда следует, что нагревание вентиля прямым током определяется не только его средним значением, но и коэффициентом формы кривой  $P_{\text{вп}} = U_{\text{п}} I_{\text{вср}} + R_{\text{д}} I_{\text{вср}}^2 + I_{\text{вср}}^2$ , который зависит от схемы выпрямления и характера нагрузки выпрямителя. Для создания нормального температурного режима работы вентиля необходимо предусматривать охлаждение, обеспечивающее отвод выделяющегося на вентилях тепла.

Конструкция, характеристики и основные параметры полупроводниковых вентиляей определяются материалом полупроводника. Практически применяются четыре типа полупроводниковых вентиляей: медно-закисные, селеновые, германиевые и кремниевые. В силовых передачах используются в основном кремниевые вентили. На локомотивах начинают широко применяться лавинные кремниевые вентили. Они имеют примерно такие же вольт-амперные характеристики, как и у обычных вентиляей (см. рис. 127), однако при воздействии на них обратного напряжения, превышающего пробивное напряжение, происходит резкое увеличение обратного тока. Лавинные вентили способны выдерживать без повреждений кратковременные большие обратные напряжения и рассеивают при пробое значительно большую мощность, чем обычные вентили. При применении лавинных вентиляей на локомотивах отпадает необходимость в специальных устройствах защиты от перенапряжения и сами вентили могут быть выбраны с меньшим запасом по напряжению.

Свойства и характеристики вентиляей определяются ГОСТ 10662—73. Условное обозначение вентиля содержит его основные технические характеристики: тип, класс, климатическое исполнение и категорию размещения и номер ГОСТа. В обозначении типа вентиля буквы означают: В — вентиль, Л — с лавинной характеристикой. Для вентиляей с водяным охлаждением после этих букв добавляется еще буква В. Цифра означает предельный ток в амперах, например, ВЛ-200 — вентиль на предельный ток 200 А. Стандартом на силовые полупроводниковые диоды установлена шкала токов от 10 до 1600 А.

Класс вентиля характеризует номинальное обратное повторяющееся напряжение. Цифра класса показывает уменьшенное на два порядка номинальное обратное напряжение, например, 3—300В, 16—1600 В и т. д. Стандартом предусмотрена шкала напряжений  $U_{\text{обрн}} = 100; 150; 200; 250$  от 300 до 400 А с градацией 100 А и далее от 1400 до 3800 А с градацией 200 А.

Аналогичным образом обозначаются управляемые полупроводниковые вентили.

В большинстве случаев для обеспечения заданных параметров преобразователя мощности вентиля оказывается недостаточно, поэтому их приходится соединять в последовательные и параллельные цепи.

При параллельном соединении вентиляей происходит перераспределение тока между ними пропорционально их сопротивлению в прямом направлении. Различие в сопротивлении вентиляей практически всегда существует даже для одной группы. Вентили, обладающие меньшим сопротивлением, пропускают больший ток и вероятность выхода их из строя возрастает. Практически неравномерность тока в ветвях преобразователя достигает 20%. Для уменьшения неравномерности нагрузок плеч необходимо прибегать к более жесткому ограничению отклонений прямого падения напряжения.

При последовательном включении вентиляей в результате расхождения их характеристик обратное напряжение на них различно. Вентили с наибольшим

обратным сопротивлением примут на себя наибольшее обратное напряжение, которое может превысить пробивное напряжение. На практике нормальная работа последовательно соединенных вентилях обеспечивается шунтированием каждого из них активным сопротивлением, которое на порядок меньше обратного сопротивления вентиля. Шунтирование вентилях дает возможность снизить неравномерность распределения обратного напряжения с 33—34 до 5—6%. Для обеспечения нормальной работы вентиляхных блоков необходимо в эксплуатации периодически проверять распределение токов и напряжений по вентилях.

### 31. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТИРИСТОРОВ

Как и неуправляемые полупроводниковые диоды, тиристоры выпускаются с нелавинными и лавинными характеристиками. В принятых для тиристоров обозначениях буква Т обозначает тиристор, буква Л — лавинный. Для тиристоров с водяным охлаждением в обозначении добавляется буква В. При наличии нескольких конструктивных исполнений тиристора одного и того же типа буквенную часть обозначения дополняют цифрой, указывающей номер конструктивного исполнения.

В соответствии с ГОСТ 14069—72 тиристоры классифицируют по повторяющемуся напряжению, под которым понимается наибольшее мгновенное значение напряжения, прикладываемого к тиристоры в обратном или прямом закрытом направлении, учитывая все повторяющиеся переходные выбросы напряжения. Номинальное напряжение принимается равным 0,8 повторяющегося. В зависимости от значения повторяющихся напряжений ГОСТом предусматривается деление тиристоров на классы от 0,5 до 26, например, 10-му классу соответствуют 1000 В напряжения и т. д. Так же классифицируются лавинные тиристоры. Рекомендуемое рабочее напряжение для них не должно превышать значения повторяющегося напряжения.

В установках с повышенным напряжением тиристоры (как и неуправляемые диоды) соединяют последовательно, принимая меры для выравнивания напряжения между отдельными приборами (включением шунтирующих активных и активно-емкостных делителей). Подачу импульсов управления в этих случаях осуществляют от выходного импульсного трансформатора через вторичные обмотки, отдельные для каждого тиристора. Под номинальным током понимается среднее значение тока полусинусоидальной формы, протекающего через тиристор при его включении в одноимпульсовую схему на активную нагрузку и угле проводимости  $180^\circ$  эл. Согласно ГОСТу тиристоры классифицируются по предельному току, представляющему среднее значение полусинусоидального тока при активной нагрузке, при заданной допустимой температуре корпуса и  $p - n - p - n$  структуры.

Силовые кремниевые тиристоры предусматриваются ГОСТом на предельные токи от 10 до 1000 А. Тиристоры могут соединяться параллельно. Как и для неуправляемых диодов применяют индуктивные делители тока и выравнивающие резисторы. Задача распределения нагрузки между тиристорами несколько усложняется. При одновременной подаче отпирающего импульса на управляющие электроды параллельно соединенных тиристоров первым перейдет в открытое состояние тиристор, обладающий наименьшим временем включения, поэтому падение напряжения на нем и на параллельно включенных тиристорах снизится, что затрудняет включение остальных тиристоров. По прямому падению напряжения тиристоры делятся на группы:

| Группа                | А       | Е                     | К                     | М                    |
|-----------------------|---------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Падение напряжения, В | до 0,65 | свыше 0,65<br>до 0,75 | свыше 0,75<br>до 0,85 | свыше 0,85<br>до 1,4 |

В зависимости от времени выключения при максимально допустимой температуре  $p - n - p - n$  структуры и предельном токе тиристоры делятся на группы:

| Группа                              |   | 0   | 1   | 2   | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9 |
|-------------------------------------|---|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|---|
| Время выключения не бо-<br>лее, мкс | — | 250 | 150 | 100 | 70 | 50 | 30 | 20 | 15 | 12 |   |

По критической скорости нарастания прямого напряжения  $dU_a/dt$  при максимально допустимой температуре  $p - n - p - n$  структуры и напряжении, равном 0,67 повторяющегося, тиристоры делятся на группы:

| Группа                                               |   | 0  | 1  | 2   | 3   | 4   | 5    | 6 |
|------------------------------------------------------|---|----|----|-----|-----|-----|------|---|
| $\left(\frac{dU_0}{dt}\right)_{\text{крит}}$ , В/мкс | — | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |   |

Скорость нарастания тока, проходящего через тиристор в процессе его отпирания, в значительной степени определяется параметрами анодной цепи. При высоком значении скорости нарастания тока  $di_a/dt$  на проводящем участке объема вентильного элемента может возникнуть высокая плотность тока и соответственно большое падение напряжения. Вследствие этого электрические потери, реализуемые в малом объеме структуры, могут вызвать местный перегрев и плавление полупроводника, приводящее к разрушению прибора. Поэтому скорость нарастания прямого тока должна быть ограничена и в справочных материалах приводятся значения критической скорости нарастания прямого тока  $(di_a/dt)_{\text{крит}}$ .

Для снижения вероятности повреждения вентилях в схемах преобразователей с высокими скоростями нарастания тока в вентильных плечах следует применять управляющие импульсы со скоростью нарастания тока управления не ниже 1 А/мкс для быстрейшего перевода всей активной площади тиристора в состояние высокой проводимости. Кроме того, в необходимых случаях должны быть приняты меры для снижения скорости нарастания анодного тока (например, путем установки в цепи с тиристорами дросселей насыщения).

По критической скорости нарастания прямого тока тиристоры делятся на группы:

| Группа                                      |   | 0  | 1  | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    | 9 |
|---------------------------------------------|---|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|---|
| Критическая скорость на-<br>растания, А/мкс | — | 20 | 40 | 70 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |   |

Для обеспечения нормальной работы тириستоров регламентируются также максимальные значения напряжения и тока управления. Для выбора их при расчете амплитуды и длительности управляющего импульса приводятся диаграммы управления тиристорами разных типов.

Тиристоры можно переводить в открытое состояние импульсами управления различной мощности. Минимальная мощность определяется наименьшими значениями тока и напряжения в цепи управления, при которых отпираются все тиристоры данного типа. Максимальная мощность импульсов управления ограничивается допустимой температурой нагрева полупроводниковой структуры в области управляющего электрода при протекании тока управления.

## ГЛАВА 7

### БЕСКОНТАКТНЫЕ АППАРАТЫ

---

#### 32. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Бесконтактные аппараты, созданные на полупроводниковых и магнитных элементах, получают все более широкое применение на тепловозах. По сравнению с электромеханическими устройствами (реле, контакторами, переключателями и т. д.) бесконтактные аппараты имеют ряд преимуществ: отсутствие подвижных контактов, быстроедействие, высокая чувствительность, постоянная готовность к действию, высокий к. п. д., универсальность, малые затраты на обслуживание и ремонт, высокая надежность. Рациональное использование бесконтактных устройств в схемах тепловозов дает возможность широко применить автоматизацию, улучшить технико-экономические характеристики энергетической установки, а также повысить безопасность движения и улучшить условия труда локомотивных бригад.

Дальнейшее увеличение мощности и усложнение энергетического оборудования, а также повышение скорости движения определяют тенденцию к еще более широкому внедрению на тепловозах полупроводниковых, магнитных и бесконтактных логических элементов. Эта тенденция подтверждается уже сложившейся практикой применения таких элементов на тепловозах. Если на тепловозе ТЭЗ использовались лишь два селеновых выпрямителя, то работа современного мощного локомотива просто немыслима без участия большого количества бесконтактных аппаратов.

В зависимости от преобладания физической структуры бесконтактные аппараты можно разделить на три класса: полупроводниковые, магнитные и магнитно-полупроводниковые. В каждом из этих классов можно выделить функциональные группы аппаратов: реле управления, регуляторы, датчики и т. д. Основными элементами бесконтактных полупроводниковых аппаратов управления являются релейные и импульсные усилители, выполненные на различных полупроводниковых приборах, главным образом на транзисторах и диодах (переключающих, туннельных и других типов).

Бесконтактное полупроводниковое реле (БПР) представляет собой двухкаскадный усилитель на транзисторах, работающий в релейном режиме. БПР может быть выполнено на транзисторах типа  $p - n - p$  и  $n - p - n$ , включаемых, как правило, по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Как известно [18, 19], в такой схеме реализуется наибольшее усиление мощности.

Рассмотрим режимы работы транзистора типа  $p - n - p$  в схеме простейшего однокаскадного усилителя с общим эмиттером (рис. 132, а). Транзистор  $T$  и сопротивление нагрузки  $R_k$  подключены последовательно к напряжению питания  $E_k$ . Параметры рабочего режима транзистора могут быть установлены из характеристики «вход — выход», представляющей зависимость выходных параметров  $i_k$  или  $\mu_{кв}$  входного сигнала  $e_y$  (или  $i_0$ ) (рис. 132, б).

Рабочий режим транзистора может быть characterized значениями тока и напряжения в его переходах, так и допустимой мощностью, рассеиваемой коллектором  $P_k$ . Эта мощность должна быть минимальной, что особенно важно при значительной мощности в нагрузке. Мощность  $P_k$ , рассеи-

ваемая в цепи коллектора, определяется положением рабочей точки на нагрузочной прямой  $AB$ , накладываемой на выходные характеристики (см. рис. 132, б). При этом на линии нагрузки можно рассмотреть три характерные точки, по которым может быть выбран режим работы транзистора.

В первом положении (точка 1) в состоянии насыщения ток в нагрузке  $I_K$  максимален, а напряжение коллектор—эмиттер  $U_{кэ}$  мало.

Поэтому рассеиваемая мощность мала

$$P_{к1} = I_K U_{кэ} \cong \frac{E_K}{R_K} U_{кэн}.$$

Ток базы, соответствующий границе насыщения, будет равен  $I_{бн} = I_{кн}/\beta$ , где  $\beta$  — коэффициент усиления тока (в схеме с ОЭ  $\beta = 20 \div 100$ ).

Во втором положении (точка 2), т. е. в состоянии отсечки, ток в нагрузке, равный обратному току коллектора  $I_{к0}$ , предельно мал, но напряжение  $u_{кэ}$  близко к напряжению питания  $E_K$ , поэтому рассеиваемая мощность также мала  $P_{к2} = I_{к0} E_K$ . В третьем положении (точка 3) ток в нагрузке равен половине тока короткого замыкания, т. е. тока в цепи коллектора при отсутствии внешней нагрузки, напряжение  $U_{кэ}$  равно половине напряжения  $E_K$ . В этом положении рассеиваемая мощность максимальна

$$P_{к3} = \frac{E_K^2}{4R_K}.$$

На рис. 132, б приведены зависимости мощности, рассеиваемой на транзисторе  $P_K$ , и мощности, отдаваемой источником питания в нагрузку  $P_H$ , от напряжения  $u_{кэ}$ . Если сигнал управления  $e_y$  изменяется скачком на такое значение, что обеспечивается переход транзистора из отсечки в насыщение (или наоборот), то однокаскадный усилитель представляет собой *простейший бесконтактный ключ*. Ключевой режим работы, когда транзистор длительно находится в насыщении (точка 1) или в отсечке (точка 2), а в активном состоянии — кратковременно (10—100 мкс), является наиболее экономичным по значению рассеиваемой мощности. Поэтому часто оказывается возможным использовать транзистор в ключевом режиме по предельно допустимым параметрам без специальных теплоотводящих устройств. В режиме усиления (точка 3) рассеиваемая транзистором мощность, как правило, сравнима с мощностью, отдаваемой в нагрузку. При этом необходимо следить за тем, чтобы рассеиваемая мощность

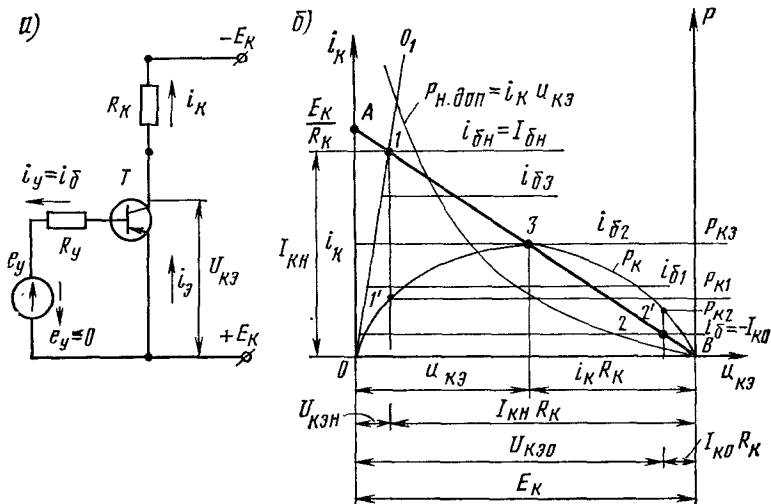


Рис. 132. Однокаскадный транзисторный усилитель:

а — схема; б — вольт-амперная характеристика, совмещенная с нагрузочной и мощностью характеристиками

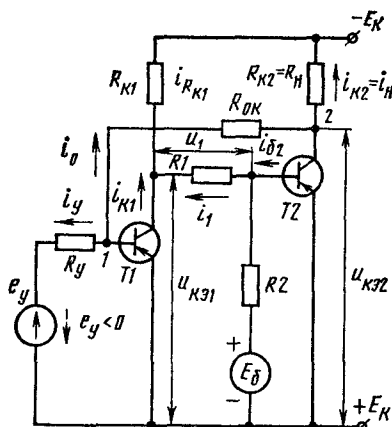


Рис. 133. Схема двухкаскадного транзисторного усилителя (полупроводникового реле)

ния подается на вход первого транзистора  $T1$ . Нагрузка  $R_{K2} = R_H$  включается в цепь коллектора второго транзистора  $T2$ , ток нагрузки  $i_{K2} = i_H$ .

При коммутации транзисторов выходной транзистор  $T2$  должен работать в режиме ключа. Для этого при насыщении транзистора  $T1$  должна быть обеспечена отсечка транзистора  $T2$ . Полное закрытие  $T2$  достигается введением в межкаскадную связь напряжения базового смещения  $E_б$ . Через делитель, состоящий из резисторов  $R1$  и  $R2$ , при насыщении  $T1$  на резисторе  $R1$  создается напряжение

$$u_1 \geq U_{K\text{н}1} + U_{\text{б}02}, \quad (33)$$

где  $U_{K\text{н}1}$  — падение напряжения на насыщенном транзисторе  $T1$ ;

$U_{\text{б}02}$  — напряжение, достаточное для отсечки  $T2$ .

Ток  $i_1$  при отсечке  $T2$  и насыщении  $T1$

$$i_1 = I_{102} = \frac{E_б + U_{K\text{н}1}}{R_1 + R_2} - \frac{I_{K02} R_2}{R_1 + R_2} \quad (34)$$

Чтобы обеспечить условие (33), необходимо, чтобы  $I_{102} \geq I_{102\text{min}}$ .

Так как  $U_{\text{б}02} \ll E_б$ , то условие отсечки  $T1$

$$R_2 < \frac{E_б}{I_{K02} + I_{102\text{min}}}, \quad (35)$$

где  $I_{K02}$  — максимальный обратный ток  $T2$  при наибольшей окружающей температуре;

$I_{102\text{min}}$  определяется из условия (33) по необходимому напряжению  $u_1$  и сопротивлению  $R_1$ .

Вторым условием сохранения ключевого режима является насыщение  $T2$  при отсечке транзистора  $T1$ . Это осуществляется выбором достаточно малого сопротивления  $R_{K1}$ . При насыщении  $T2$  напряжение на эмиттерном переходе  $U_{\text{эб}2}$  пренебрежимо мало по сравнению с напряжением  $E_K$  и  $E_б$  и токи можно определить по формулам:

$$i_1 = I_{1\text{н}2} = \frac{E_K}{R_1 + R_2} - \frac{I_{K01} R_{K1}}{R_1 + R_{K1}}; \quad (36)$$

$$i_{\text{б}2} = I_{\text{б}2} \approx I_{1\text{н}2} - E_б / R_2. \quad (37)$$

не превысила допустимую мощность  $P_{K\text{max}}$  и чтобы транзистор не перегревался. Ключевой режим (или, иначе, режим переключений) используется в большинстве бесконтактных электрических аппаратов на транзисторах: в реле, регуляторах и преобразователях, аппаратах управления и т. д. В их основе лежат различные схемы усилителей.

Двухкаскадный усилитель (рис. 133) дает возможность реализовать значительное усиление тока и мощности управляемых сигналов. Каждый каскад выполнен на транзисторах: входной — на  $T1$ , выходной — на  $T2$ . Оба каскада включены на общее напряжение питания  $E_K$ . Выходное напряжение первого каскада  $u_{K\text{н}1}$  является входным, управляющим напряжением второго каскада усилителя. Сигнал управления

Подставляя (37) в (36) и пренебрегая  $R_{к1}I_{к01}$  из-за его малости по сравнению с  $E_{к}$ , получаем условие насыщения  $T2$

$$R_{к1} < \frac{E_{к}}{I_{б2} + E_{б1}/R_1} - R_1, \quad (38)$$

где  $I_{б2} \gg K_{н}I_{бн2}$  — ток базы  $T2$  при насыщении;

$K_{н}$  — коэффициент насыщения;

$R_1$  соответствует току  $I_{1н2}$  по формуле (36).

При выполнении условий (35) и (38) транзистор  $T2$  входит в отсечку или насыщение тогда, когда транзистор  $T1$  находится еще в активной зоне, а значит, время его переключения будет сокращено.

Для получения релейной характеристики с насыщением и петлей гистерезиса в двухкаскадный усилитель вводится обратная связь по напряжению (см. рис. 133). Выходное напряжение  $u_{кн2}$ , снимаемое с коллектора  $T2$ , через резистор обратной связи  $R_{ок}$  подается на вход усилителя, на базу транзистора  $T1$ . Обратная связь (ОС) по напряжению, называемая также коллекторной, — положительная (эмиттерная ОС [19] здесь не рассматривается). Действие ОС заключается в том, что приращению сигнала управления одного знака (например,  $\Delta e_y > 0$ ) соответствует приращение выходного напряжения того же знака, т.е.  $\Delta u_{кн2} > 0$ , которое подается на вход транзистора  $T1$  и усиливает действие входного сигнала. При введении ОС ток базы транзистора  $T1$  будет равен  $i_{б1} = i_y + i_{ос}$ , следовательно, те же выходные параметры каждого из каскадов будут получены при токах управления  $i_y$ , меньших на ток  $i_{ос}$ , или при сигнале управления  $e_y$ , меньшем на  $|i_{ос} R_y|$ .

Ток в цепи ОС зависит от режима транзистора  $T2$ . Пока  $T2$  находится в отсечке, ток  $i_{ос} \approx E_{к}/(R_{к1} + R_{н})$  и практически не меняется с изменением  $e_y$ . По мере открытия  $T2$  уменьшается напряжение  $| - u_{кн2} |$ , а значит, уменьшается ток  $i_{ос}$ . При насыщении  $T2$  потенциалы точек 1 и 2 мало отличаются друг от друга и поэтому ток ОС  $i_{ос} \approx 0$ .

Релейная характеристика  $i_{к2} = f(e_y)$  в форме петли гистерезиса зависит от  $R_{ок}$  и получается при условии

$$R_{ок} < R_{ок.кр} \approx \beta_1 \beta_2 \frac{R_{н} R_y}{(R_y + r_{эб1})} \frac{R_{к1}}{(R_{к1} + R_1)}, \quad (39)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — коэффициенты усиления  $T1$  и  $T2$ ;

$r_{эб1}$  — входное сопротивление  $T1$ ;  $r_{эб1} = du_{э1}/di_{б1}$ .

Основными параметрами релейной  $s$ -образной характеристики БПР являются напряжения входного сигнала при срабатывании  $e_{yср}$  и отпуске  $e_{yотп}$ ; разность этих напряжений  $e_{yn} = e_{yср} - e_{yотп}$  называется *напряжением переключения*.

Из соотношения (39) видно, что при сопротивлении цепи управления  $R_y \rightarrow 0$  (цепь управления подключена к источнику напряжения) релейный режим осуществить нельзя. Из (39) следует, что для сохранения релейного режима необходимо выполнение условия

$$R_y > r_{эб1} \left( \beta_1 \beta_2 \frac{R_{н}}{R_{ок}} \frac{R_{к1}}{R_{к1} + R_1} \right)^{-1}, \quad (40)$$

т. е. усилитель с коллекторной ОС хорошо согласуется с источником тока в цепи управляющего сигнала.

Определим параметры релейной характеристики  $i_{к2} = f(e_y)$ . Для входного контура по второму закону Кирхгофа можно записать

$$e_y = - i_y R_y - u_{эб1}. \quad (41)$$

При отпускании реле ( $T2$  на границе насыщения) ток обратной связи  $i_{oc} \approx 0$  и  $i_y = i_{б1} \approx I_{к1н2}/\beta_1$ . С учетом этого из (41) напряжение отпущения

$$e_{отп} = -R_y \frac{I_{к1н2}}{\beta_1} - u_{эб1}^0. \quad (42)$$

Ток при отпускании реле, т. е. на границе насыщения  $T2$ ,

$$I_{к1н2} \approx \frac{E_k}{R_{к1}} - \frac{R_{к1} + R_1}{R_{к1}} \left( \frac{E_б}{R_2} + I_{бн2} \right), \quad (43)$$

где  $\beta_1$  и  $u_{эб1}^0$  — коэффициент усиления тока и напряжение между эмиттером и базой транзистора  $T1$  при токе  $i_k = I_{к1н2}$ .

При срабатывании реле ( $T2$  на границе отсечки) ток  $OC$   $i_{oc} = E_k/(R_{ок} + R_n)$  и  $i_y = i_{б1} - i_{oc} = I_{к1о2}/\beta_1 - E_k/(R_{ок} + R_n)$ . Тогда из (41) напряжение срабатывания

$$e_{ср} = E_k \frac{R_y}{R_{ок} + R_n} - R_y \frac{I_{к1о2}}{\beta} - u_{эб1}^0, \quad (44)$$

где  $I_{к1о2}$  — ток  $i_{к1}$  при срабатывании реле, т. е. на границе отсечки  $T2$

$$I_{к1о2} \approx \frac{E_k}{R_{к1}} - \frac{R_{к1} + R_1}{R_{к1}} \left( \frac{E_б}{R} - I_{кo2} \right), \quad (45)$$

$\beta_1$  и  $u_{эб1}^0$  определяются при токе  $i_{к1} = I_{к1о2}$ .

Настройка БПР на необходимые параметры обеспечивается при помощи резисторов в цепях  $OC$  и смещения. На основе изложенных принципов работы БПР построен целый ряд тепловозных бесконтактных полупроводниковых аппаратов.

**Бесконтактные полупроводниковые реле переходов (БПР).** Разработанные ВНИИЖТОМ, БПР предназначены для установки взамен электромеханических на тепловозах 2ТЭ10Л и ТЭП60 (реле БРП7) и на тепловозах 2ТЭ116 (реле БРП8). Схемы обоих типов реле принципиально одинаковы, выполнены на транзисторной основе и отличаются друг от друга лишь техническим исполнением (типами транзисторов).

Бесконтактное реле перехода БРП7 (рис. 134) состоит из двух одинаковых транзисторных узлов, каждый из которых представляет собой полупроводни-

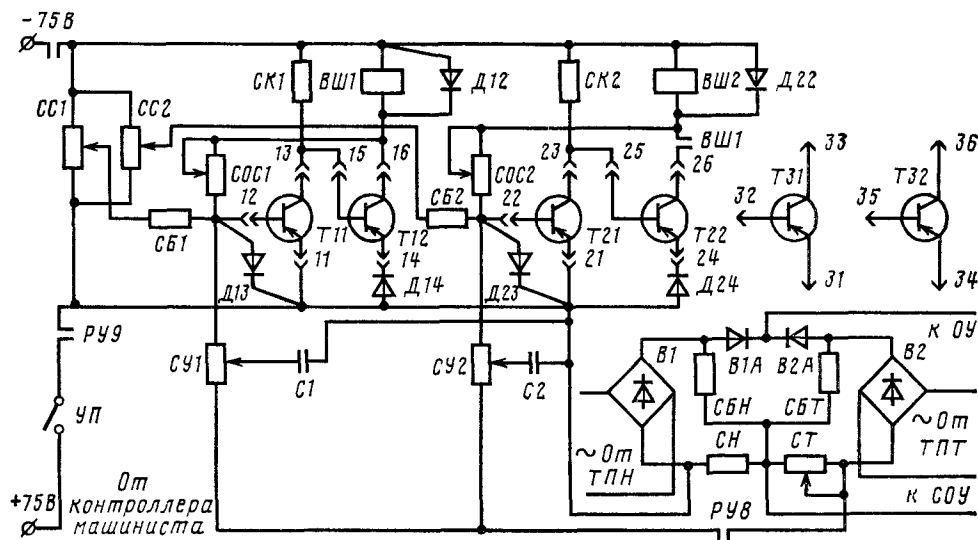


Рис. 134. Схема бесконтактного полупроводникового реле переходов БРП7

ковое реле (РП1 и РП2), выполненное на двух одинаковых транзисторах ( $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$  и  $T_{22}$ ) типа П215. Транзисторы подключены по схеме с общим эмиттером к одному источнику коллекторного напряжения (цепь управления тепловоза). В каждом реле один транзистор ( $T_{11}$  и  $T_{21}$ ) входной, а другой ( $T_{12}$  и  $T_{22}$ ) — выходной.

Цепи электродов транзисторов организуются следующим образом. В коллекторные цепи входных транзисторов  $T_{11}$  и  $T_{21}$  включены резисторы их нагрузки  $СК1$  и  $СК2$ , а выходных  $T_{12}$  и  $T_{22}$  — катушки вентиля групповых контактов ослабления возбуждения  $ВШ1$  и  $ВШ2$ . Цепи баз транзисторов  $T_{11}$  и  $T_{21}$  соединены с источником смещения (потенциометры  $СС1$  и  $СС2$ ) через резисторы  $СБ1$  и  $СБ2$  и с коллекторными цепями транзисторов  $T_{12}$  и  $T_{22}$  через соответствующие резисторы обратной связи  $СОС1$  и  $СОС2$ . Цепи баз транзисторов  $T_{12}$  и  $T_{22}$  соединены с коллекторами входных транзисторов накоротко. Управляющий сигнал подается на выводы базы и эмиттера входных транзисторов через резисторы  $СОУ1$  и  $СОУ2$ .

Характеристика каждого реле такова, что выходной транзистор в зависимости от значения входного сигнала находится либо в режиме отсечки, либо в режиме насыщения, причем плавное изменение напряжения сигнала на входе вызывает скачкообразное изменение выходного тока, т. е. образуется релейная характеристика.

Сигнал на вход БРП подается от трансформаторов постоянного тока и постоянного напряжения  $ТПТ$  и  $ТПН$ , используемых в системе регулирования возбуждения тягового генератора. Для этого схема селективного узла несколько изменена (см. рис. 134): введены разделительные диоды  $В1А$  и  $В2А$  и резисторы  $СН$  и  $СТ$ . Напряжение между крайними выводами резисторов  $СН$  и  $СТ$  увеличивается с возрастанием напряжения тягового генератора и уменьшается с возрастанием его тока. Подавая это напряжение на вход реле  $РП1$  и  $РП2$ , добиваются, чтобы срабатывание и отпадание  $БРП$  происходили при заданных режимах генератора.

Характеристики срабатывания и отпадания имеют вид параллельных наклонных прямых (см. с. 21). Такое расположение их выгоднее расходящихся прямых, свойственных серийному реле перехода, так как уменьшается склонность реле к «звонковой» работе.

На случай выхода из строя транзисторов реле  $РП1$  и  $РП2$  имеется запасный комплект транзисторов  $T_{31}$  и  $T_{32}$ , включаемый при необходимости при помощи штепсельного разъема. Ряд других элементов выполняет защитные функции: диоды  $Д13$  и  $Д23$  — ограничение обратного напряжения в цепи база — эмиттер входных транзисторов; диоды  $Д12$  и  $Д22$  — снятие перенапряжений за счет разрядного тока катушек  $ВШ1$  и  $ВШ2$ ; конденсаторы  $С1$  и  $С2$  — сглаживание пульсаций входного напряжения.

Выпущена опытная партия реле БРП7 для тепловозов 2ТЭ10Л и аналогичные по схеме, но построенные на транзисторах КТ805А реле БРП8 для тепловозов 2ТЭ116. Эксплуатационные испытания показали, что полупроводниковые реле перехода работоспособны и просты в уходе и обслуживании. Разработанные в НИИЭТМе тиристорные реле перехода по сравнению с транзисторными реле менее экономичны и надежны, так как в них использовано примерно в 2,5 раза больше полупроводниковых приборов.

**Полупроводниковые реле времени.** Реле разработано во ВНИТИ для замены применяемых на тепловозах электропневматических реле времени типов РВП-1М и РВП-2. В реле ВЛ-21 (рис. 135) использован принцип заряда конденсаторов через высокоомный резистор с применением коммутирующих импульсов и чувствительного полупроводникового реле (триггера).

Реле времени состоит из генератора управляющих импульсов,  $R$  —  $C$  цепи, полупроводникового реле (триггера), промежуточного и исполнительных элект-

ромеханических реле. К генератору импульсов относятся: транзистор  $ПТ1$ , трансформатор  $Tr$ , конденсатор  $C2$ , диоды  $Д3—Д5$  и резисторы  $R2$ . На генератор импульсов подается напряжение питания, пульсация которого сглаживается конденсатором  $C1$ , а ток во входной цепи ограничивается резистором  $R1$ . Транзисторно-трансформаторный контур генератора импульсов одновременно выполняет функции стабилизатора напряжения, подаваемого на  $R—C$  цепочку и триггер. Этим практически исключается зависимость выдержки времени от изменения напряжения питания. Основное звено—цепочка  $R—C$ , параметрами которой определяется требуемая выдержка времени. В цепь этого звена входят конденсатор  $C3$ , резисторы  $R11—R30$ , сопротивление которых изменяется двумя переключателями  $B1$  и  $B2$ . Пороговым диодом и делителем напряжения  $R3—R5$  создается опорное напряжение, устанавливаемое при помощи резистора  $R5$  на заводе-изготовителе. Триггер образован двумя транзисторами  $ПТ2$  и  $ПТ3$  и обратной связью в виде цепочки конденсатора  $C5$  и резистора  $R7$ . Ряд других элементов: разделительный конденсатор  $C4$ , шунтирующие диоды  $Д7$  и  $Д8$  и резисторы  $R7—R10$  имеют вспомогательное назначение.

Работа реле времени происходит следующим образом. При замыкании управляющего контакта (подача питания) начинается отсчет выдержки времени. При этом триггер устанавливается в положение «выключено», срабатывает реле мгновенного действия  $P2$  и начинается заряд конденсатора  $C3$  через заданное сопротивление резисторов  $R11—R30$ . Значение сопротивления, как отмечено выше, определяет необходимую выдержку времени.

Когда напряжение на конденсаторе  $C3$  достигает значения опорного напряжения, снимаемого с делителя  $R3—R5$ , открывается пороговый диод  $Д6$ . Импульсы со вторичной обмотки трансформатора  $Tr$  проходят через конденсатор  $C4$  на базу входного транзистора  $ПТ2$  триггера. Триггер переходит в положение «включено». При этом включается промежуточное реле  $P3$ , после чего срабатывает реле  $P1$  и коммутирует управляемые цепи нагрузки. При снятии напряжения питания реле времени готовится к следующему циклу.

У реле времени ВЛ-21, построенного по описанному принципу, на погрешность выдержки времени влияют только параметры  $R—C$  цепи и порогового диода  $Д6$ . Максимальная суммарная погрешность при верхнем пределе тем-

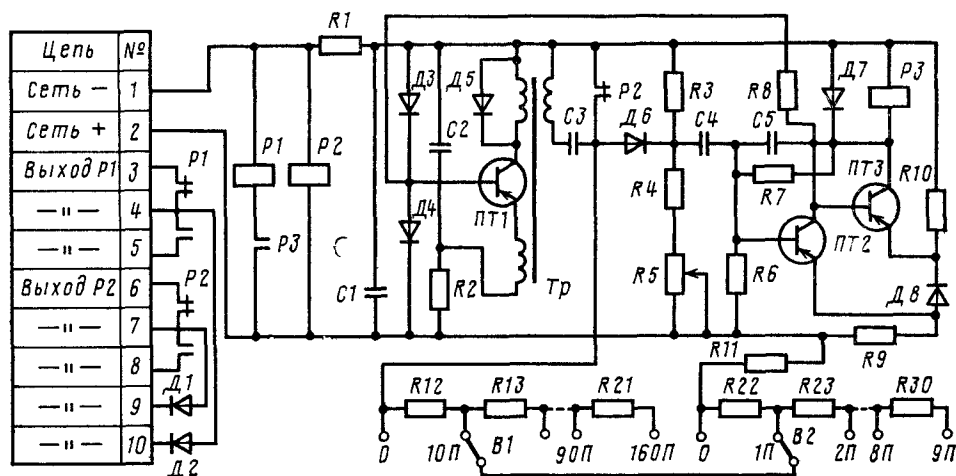


Рис. 135. Схема бесконтактного полупроводникового реле времени ВЛ-21

пературы ( $-40-60^{\circ}\text{C}$ ) составляет  $-4,7 \pm 3,7\%$ . Учитывая случайный характер отдельных погрешностей и их разные знаки, суммарная погрешность выдержки времени не превышает  $5\%$ .

#### Техническая характеристика реле времени ВЛ-21

|                                                                  |                                  |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Количество ступеней регулировки времени                          | 100                              |
| Диапазоны выдержек времени                                       | 0,5—50 с;<br>1—100 с;<br>2—200 с |
| Номинальное напряжение питания постоянного тока                  | 60; 75; 110 В                    |
| Допустимые колебания напряжения питания от номинального значения | 0,7—1,2 В                        |
| Класс точности                                                   | 5                                |
| Потребляемая мощность                                            | 40 Вт                            |
| Масса реле                                                       | 5 кг                             |

Опытная партия реле времени ВЛ-21 прошла длительные эксплуатационные испытания на тепловозах 2ТЭ10Л в различных климатических условиях. Опыт эксплуатации этих реле свидетельствует об их безотказности в работе, простоте ухода и настройки.

Полупроводниковые транзисторные усилители в одно- или двухкаскадном исполнении применяются на тепловозах 2ТЭ116 в бесконтактных блоках пуска дизеля БПД-2, БПД-4 и пуска компрессора БПК-2 (см. гл. 8). Они используются также в качестве ключей для управления тиристорными усилителями в регуляторах напряжения и мощности (например, регуляторы БРНЗ-Б и БРНЗ-В, АРНТ).

### 33. ОСНОВЫ РАСЧЕТА БЕСКОНТАКТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЛЕ

Исходными данными при расчете БПР являются:

- 1) выходные параметры:  $P_H$  и  $R_H$  (или  $U_H$  и  $I_H$ ) — номинальная мощность в нагрузке (или напряжение и ток в нагрузке) в состоянии «включено» и сопротивление нагрузки;
- 2) входные параметры:  $P_{уп}$ ,  $e_{уп}$  — мощность и напряжение переключения;  $k_B$  — коэффициент возврата;
- 3) максимальная окружающая температура  $t_{окр}^{\circ}$ .

Необходимо определить все параметры схемы: напряжения питания ( $E_H$ ,  $E_B$ ); сопротивления смещения, межкаскадной и обратной связей; выбрать транзисторы.

1. *Определение напряжения питания.* Для двухкаскадного усилителя (см. рис. 131), допуская, что падение напряжения в насыщенном транзисторе во много раз меньше напряжения питания, можно принять  $E_H \approx U_H$ . Для реле с коллекторной обратной связью определяем

$$E_K = U_H + U_{экн2}. \quad (46)$$

В случае если  $E_K$  задано по (46) и мощности  $P_H$ , определяют номинальные параметры нагрузки  $U_H$ ,  $I_H$ ,  $R_H$ .

2. *Выбор выходного транзистора Т2.* Определяем наибольший возможный ток коллектора при насыщении Т2

$$(i_{к2})_{\max} = I_{кн} \cong E_K / R_H \quad (47)$$

и наибольшее напряжение на коллекторе при отсечке

$$(U_{к2})_{\max} = U_{к0} \approx E_K. \quad (48)$$

По справочнику [20] выбирают транзистор. Допустимые параметры (максимальные значения)

$$I_{кдоп} > I_{кн}; \quad U_{кдоп} \approx (1,5-2) U_{к0}. \quad (49)$$

Выбрав транзистор, определяют коэффициент усиления  $\beta = \beta_2$  и обратный ток коллектора  $I_{к0} = I_{к02}$  (по техническим условиям или экспериментальным путем [17]). Ток  $I_{к0}$  сильно зависит от температуры, поэтому ток коллектора  $I_{кн}$  должен превосходить  $I_{к0}$

на один-два порядка, т. е.  $I_{кн} \geq (10-100) I_{к0 \max}$ . Подсчитывают ток базы  $T2$  на границе насыщения при наименьшем значении  $I_{бн2} \approx E_K / \beta_2 R_{н2}$ .

3. *Выбор напряжения базового смещения  $E_б$ .* Рекомендуется выбирать  $E_б > (2 \div 3) V$  при условии  $E_б \leq E_K$ .

4. *Выбор сопротивлений межкаскадной связи.* Для отсечки выходного транзистора по равенству (33) определяют напряжение  $U_1$ ; при этом принимают  $U_{б02} \approx (0,1 \div 0,3) V$  и задаются приближенным значением  $|U_{к0н1}| \approx 0,3 \div 0,5 V$  (после выбора транзистора  $T1$  значение  $U_{к0н1}$  уточняем и проверяем достаточность напряжения  $U_1$ ). Задаем коэффициентом насыщения  $K_H = i_б / I_{бн}$  транзистора  $T2$ . Рекомендуемые пределы  $K_H = 1,2 \div 2$  (при увеличении  $K_H$  уменьшается  $K_P$  и возрастает время  $t_{вык}$ )

Сопротивление  $R_1$ ; если оно линейное, определяют по соотношению

$$R_1 = R_{10 \text{тп}} = \frac{(1 - \sqrt{U_1 / E_K}) \sqrt{E_K U_1}}{K_H I_{бн2} + I_{к02}}$$

и выбирают номинал  $R_1$ ; ближайший к оптимальному. Определяют ток, обеспечивающий на  $R_1$  падение напряжения  $U_1$ :  $I_{10 \text{тп}} = U_1 / R_1$ . Из условия отсечки (35) вычисляют и выбирают сопротивление  $R_2$ ; после чего из условия насыщения (38) определяют сопротивление  $R_{к1}$ . На место  $R_1$  может быть установлен диод  $B_1$  (один или несколько). В этом случае, предварительно выбрав диод, по напряжению  $U_1$  и вольт-амперной характеристике диода находим ток  $I_{1(02) \text{тп}}$  и так же, как и для сопротивления  $R_1$ , определяем номиналы  $R_2$  по (35) и  $R_{к1}$  по (38). После этого проверяем правильность выбора диода по максимальному току

$$I_{0 \max} = I_{1(n2)} \approx E_K / (R_{к1} + R_1) < I_{\text{вдоп}} -$$

максимально допустимого постоянного тока диода.

5. *Выбор входного транзистора  $T1$*  Определяют наибольший ток коллектора  $(i_{к1})_{\max} = I_{кн1} \approx E_K / R_{к1}$ ; находят наибольшее напряжение на коллекторе

$$(U_{к01})_{\max} = U_{к01} = R_1 I_{1(n2)} + U_{эбн2}$$

и выбирают транзистор, удовлетворяющий условию (49).

По справочным данным или экспериментально [1] определяют:

а) зависимость коэффициента усиления  $T1$  от коллекторного тока  $i_{к1}$   $\beta_1 = \beta_1 \times \times (i_{к1})$ ; зависимость  $U_{эб1}$  от  $i_{к1}$

$$U_{эб1} = U_{эб1}(i_{к1})_{U_{к1}=0};$$

в) по последней зависимости напряжение

$$U_{к0н1} = U_{эб1}(i_{к1})_{U_{к1}=0} \text{ при } i_{к1} = I_{кн1}.$$

6. *Проверка режима отсечки выходного транзистора  $T2$ .* При насыщении  $T1$  и отсечке  $T2$  определяют: а) ток  $i_1 = I_{1(02)}$  по формуле (34); б) запирающее напряжение  $U_1 = R_1 I_{1(02)}$ ; напряжение на базе  $T2$   $U_{б2} = U_1 - |U_{к0н1}|$ . Для отсечки  $T2$  должно выполняться условие  $U_{б2} > U_{б02}$ , где  $U_{б02} \approx 0,06 \div 0,12 V$ . Если неравенство не выполняется, задаются большим, достаточным значением  $U_1$  и повторяют расчет, начиная с п. 4.

7. *Определение сопротивления цепи управления. Выбор обратной связи.* Если напряжение переключения  $e_{уп} > 1 V$ , то при любой ОС можно считать  $P_{уп} \approx e_{уп}^2 / R_у$ . Отсюда определяют  $R_у \approx e_{уп}^2 / P_{уп}$ . Сравнивая  $R_у$  и  $R_н$ , выбираем вид ОС: коллекторную при  $R_у > R_н$  или эмиттерную при  $R_у < R_н$ .

Можно также вести расчет до определения сопротивления ОС и выбрать коллекторную ОС при  $R_{ок} \gg R_н$  и эмиттерную при  $R_{оэ} \ll R_н$ .

8. *Определение напряжений срабатывания и отпускания.* Для реле с коллекторной ОС определяем: а) напряжение отпускания по (42); б) напряжение срабатывания

$$e_{у \text{сраб}} = e_{у \text{отп}} + e_{уп}.$$

9. *Определение сопротивления обратной связи.* Сопротивление коллекторной ОС определяем по (44) при  $R_{ок} \gg R_н$

$$R_{ок} \approx R_у \frac{E_K}{e_{у \text{сраб}} + U_{эб1}^c + R_у I_{к1(02)} / \beta_1}.$$

Практически сопротивление  $R_{ок}$  окончательно подбирается при настройке реле.

10. *Расчет цепи смещения.* Введение смещения позволяет получить необходимые  $e_{у \text{сраб}}^{\text{см}} = e_{у \text{отп}}^{\text{см}}$  при смещении релейной характеристики. Определяют: а) напряжение срабатывания при смещении

$$e_{у \text{сраб}}^{\text{см}} = \frac{e_{уп}}{2 - k_B}.$$

где  $k_B$  — исходный коэффициент возврата;  $k_B = e_{y\text{отп}}^{cm} / e_{y\text{сраб}}^{cm}$  для нормально отключенного реле  $k_B < 1$ ; для нормально включенного реле  $k_B > 1$ ;

б) «сдвиг» характеристики  $\Delta e_{cm} = e_{y\text{сраб}}^{cm} - e_{y\text{отп}}^{cm}$ ;

в) сопротивление смещения  $R_{cm} \approx R_y E_{cm} / \Delta e_{cm}$ , где  $E_{cm} = E_K$  при  $\Delta e_{cm} < 0$  и  $E_{cm} = E_B$  при  $\Delta e_{cm} > 0$ .

Сопротивление  $R_{cm}$  окончательно подбирают при настройке реле. При необходимости далее выполняют проверку теплового режима транзистора и выбор радиаторов [19].

### 34. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Применяемые на тепловозах полупроводниковые регуляторы содержат в своей структуре тиристорный усилитель. Свойства таких регуляторов зависят от свойств тиристорных усилителей и особенностей системы управления ими. Полагая, что физические принципы работы тиристорных усилителей известны из литературы [1,2], поясним принцип действия релейного элемента на тиристорах (рис. 136,а). Пусть последовательно с тиристором включена нагрузка  $R_H$  и источник напряжения питания  $E$ ; ток нагрузки  $i_H$  определится точкой пересечения вольт-амперных характеристик тиристора и сопротивления  $R_H$  (рис. 136,б).

В большей части устройств тиристоры включаются подачей сигнала к управляющему электроду. Напряжение включения будет определяться допустимым током нагрузки  $i_H \cong E_{вкл} / R_H$  (точки  $1 \rightarrow 1'$ ) (типичное время включения около 10 мкс). При снятии тока управления ( $i_y = 0$ ) тиристор остается включенным. Для подачи сигнала управления используется ключ  $K_1$ , который может быть полупроводниковым или магнитным. Отключение вентили может быть произведено понижением напряжения до  $E_{отк}$  (точки  $2 \rightarrow 2'$ ), после чего ток  $i_H$  будет  $i_H = i_{yt}$  (точка  $2'$ ). Как видно, зависимость выходных параметров ( $i_H$ ,  $U_H$ ) от входа  $i_y$  имеет релейный характер. Снижение напряжения чаще всего достигается шунтированием тиристора источником импульса запирающего напряжения, цепь которого замыкается посредством ключа  $K_2$ . При этом время выключения вентили  $t_{выкл} = 5 \div 25$  мкс. Ключ  $K_2$  выполняется бесконтактным (транзистор, вспомогательный тиристор) и др. В качестве источника запирающего напряжения используется обычно коммутирующий конденсатор  $C_K$ . При включенном тиристоре конденсатор заряжается через резистор  $R_2$ . При замыкании ключа  $K_2$  полярность на катоде тиристора меняется и он выключается. Емкость коммутирующего конденсатора приблизительно подсчитывается по соотношению [19]

$$C_K \geq (1 \div 1,4) \frac{I_H t_{выкл}}{U_c},$$

где  $I_H$  — ток нагрузки во время коммутации;

$U_c$  — напряжение на конденсаторе; большее значение относится к активной нагрузке, меньшее — к активно-индуктивной.

В зависимости от физической структуры и технического исполнения ключей управления тиристорным усилителем будем называть *регуляторы полупроводниковыми*, если ключи выполнены на полупроводниковых приборах: транзисторах, стабилитронах, тиристорах или магнитно-полупроводниковыми, если ключи выполнены на магнитных усилителях, импульсных трансформаторах и т. д. В зависи-

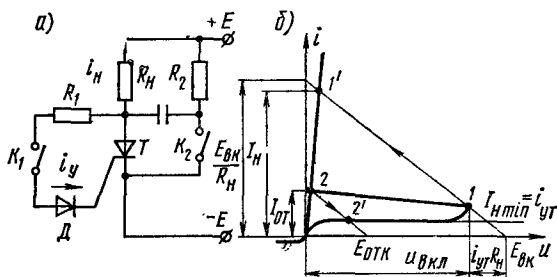


Рис. 136. Тиристорный усилитель:

а — схема; б — характеристика

сти от метода управления ключами возможны два режима работы тиристорных усилителей в регуляторах: 1) режим выключателя или «включено—отключено». При разомкнутом ключе  $K_1$  тиристор не включен и ток в нагрузке  $i_H \approx 0$ , если  $K_1$  замкнут, то тиристор открыт и пропускает в нагрузку ток  $I_H \approx E_{BK}/R_H$ . Такой режим используется в тепловозных полупроводниковых регуляторах напряжения БРНЗ-В и РНТ-6; 2) режим, в котором возможна плавная регулировка среднего значения напряжения на нагрузке. Такой режим обеспечивается путем замыкания и размыкания ключа  $K_1$  с частотой питающего напряжения  $f$ .

Меняя момент замыкания ключа  $K_1$  в каждый положительный полупериод напряжения питания, изменяют тем самым момент включения тиристора  $t_s$ , а значит, и среднее за период значение напряжения на нагрузке  $U_H$ . Пренебрегая током утечки через запертый тиристор и остаточным напряжением при его насыщении, получаем

$$U_H = 0,5E \frac{1 + \cos \omega t_s}{2},$$

где  $E$  — среднее за период напряжение питания.

Из формулы видно, что изменяя момент замыкания  $K_1$  от  $t_s = T/2$  до  $t_s = 0$ , можно изменять среднее напряжение на нагрузке от 0 до максимального, равного  $E/2$ . Такой режим является рабочим для магнитно-полупроводникового регулятора возбуждения тягового генератора тепловоза 2ТЭ116, подробное описание которого, так же как и процессы, происходящие в нем, см. в гл. 8. Изложенные принципы работы тиристорного релейного усилителя проследим на полупроводниковых регуляторах напряжения.

**Бесконтактный регулятор напряжения БРНЗ-В.** Этот регулятор является модификацией ряда регуляторов БРНЗ. В схеме регулятора (рис. 137) можно условно выделить измерительный и регулирующий органы. Измерительный орган, предназначенный для измерения отклонения напряжения  $U_{гв}$  выше установленного значения, собран по мостовой схеме. Три плеча моста образуют резисторы  $R1'$ ,  $R1$ ,  $R2$  (потенциометр),  $R3$  и  $R4$ , четвертое плечо состоит из стабилитронов  $D3$  ( $D6$ ),  $D4$  и  $D5$ . На одну диагональ моста подается напряжение  $U_{гв}$ , сглаженное конденсатором  $C1$ , а в другую диагональ моста включен переход эмиттер-база транзистора  $T1$ . Коэффициент усиления мостовой измерительной схемы мал, поэтому в цепь стабилитронов включены каскады усиления на транзисторах  $T1$  и  $T2$  —  $T3$ .

Регулирующий орган предназначен для регулирования длительности протекания тока в обмотке возбуждения  $ВГ$  и представляет собой мультивибратор, в схему которого входят следующие элементы: тиристоры  $T4$  и  $T5$ , стабилитроны  $D14$ ,  $D15$  и  $D17$ , конденсаторы  $C2$ ,  $C3$  и  $C4$ , диоды  $D8$ — $D13$  и  $D16$ , резисторы  $R6$ — $R9$  и дроссели  $Dp1$  и  $Dp2$ .

Стабилитроны  $D14$ ,  $D15$  и  $D17$  выполняют функции ключей, управляющих выключением и включением силового тиристора  $T4$ .

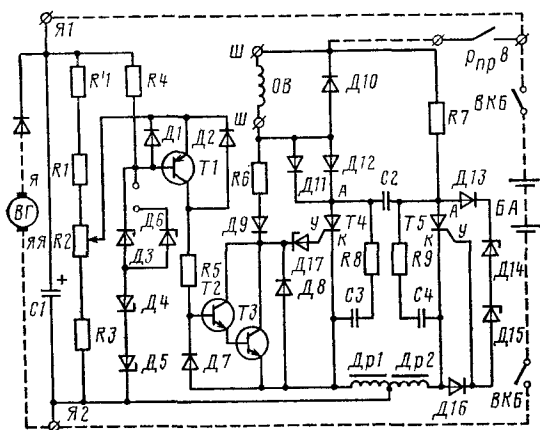
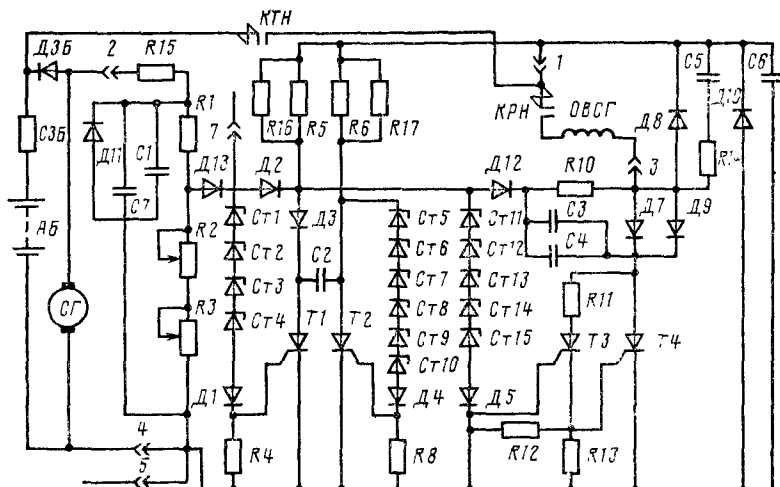


Рис. 137. Схема бесконтактного регулятора напряжения БРНЗ

Рис. 138. Схема бесконтактного регулятора напряжения РНТ6



При напряжении  $U_{гв} < 75$  В транзистор  $T1$  закрыт, так как потенциал базы выше потенциала эмиттера, соединенного через потенциометр  $R2$  и резистор  $R3$  с минусом  $ВГ$ . Регулирующий орган работает в режиме «включено—отключено», причем большую часть периода тиристор  $T4$  открыт, следовательно, ток возбуждения  $ВГ$  близок к максимальному возможному значению. Когда напряжение  $U_{гв} = 75$  В или  $U_{гв} > 75$  В, напряжение на движке потенциометра  $R2$  возрастает до значения, при котором потенциал эмиттера  $T1$  станет больше потенциала базы, транзистор  $T1$  открывается и открываются его повторители — транзисторы  $T2$  и  $T3$ . При этом транзистор  $T3$  шунтирует цепь: стабилитрон  $Д17$  — управляющий электрод  $T4$ . Тиристор  $T4$  запирается обратным напряжением разряда конденсатора  $C2$ , и в обмотке возбуждения ток уменьшается. Одновременно снижается напряжение  $U_{гв}$ . В дальнейшем цикл колебаний возобновляется.

Регулятор РНТ-3В имеет высокую чувствительность и поддерживает напряжение  $U_{гв} = 75 \pm 1$  В. Стабильность характеристик и надежность регулятора обеспечиваются введением ряда дополнительных элементов. Применение на тепловозах синхронных генераторов вызвало необходимость создания стартер-генераторов типов СТГ1—СТГ7, предназначенных для раскрутки вала дизеля при пуске и обеспечения постоянным током напряжением 110 В цепей управления, освещения и заряда аккумуляторной батареи при работающем дизеле. Стартер-генераторы таких типов применяются на тепловозах 2ТЭ116 и дизель-поездах ДР1. Их описание дано в гл. 4. Чтобы стабилизировать напряжение 110 В этих стартер-генераторов (СТГ), Ворошиловградский тепловозостроительный завод разработал ряд тиристорных регуляторов напряжения типов РНТ1—РНТ6. В регуляторах используются тиристоры в регулирующем органе и стабилитроны — в измерительном. Отличаются они друг от друга лишь количеством полупроводниковых приборов.

**Тиристорный регулятор напряжения РНТ6** (рис. 138). Регулятор обеспечивает стабилизацию напряжения стартер-генератора тепловоза 2ТЭ116 на уровне 110 В во всем диапазоне изменения его нагрузки и частоты вращения якоря. Измерительный орган, составленный из резисторов  $R15$  и  $R1$ — $R4$ , диодов  $Д1$ ,  $Д11$  и  $Д13$ , конденсаторов  $C1$  и  $C7$ , стабилитронов  $СТ1$ — $СТ4$ , воспринимает отклонение напряжения  $U_{сг}$  от эталонного значения, определяемого напряжением пробоя стабилитронов  $СТ1$ — $СТ4$ .

В регулирующем органе, состоящем из тириستоров  $T1$ — $T4$  стабилитронов  $СТ5$ — $СТ10$ ,  $СТ11$ — $СТ15$ , конденсаторов  $C2$ — $C6$ , диодов  $Д2$ — $Д5$ ,

Д7, Д8, Д10 и Д12 и резисторов  $R5 — R8$ , поступающий с измерительного органа сигнал преобразуется в серию импульсов, длительность которых пропорциональна значению этого сигнала. Импульсы, генерируемые тиристорным усилителем  $T1 — T3 — T4$ , поступают в обмотку возбуждения *ОВСГ* стартер-генератора *СГ*.

Регулятор напряжения работает следующим образом. При замыкании силовых контактов КТН напряжение аккумуляторной батареи подается на стабилитроны  $Ст5—Ст10$  и  $Ст11—Ст15$ , являющиеся ключами в цепях управления тиристоров  $T2$  и  $T3$  соответственно. Замыкание этих ключей (пробой указанных стабилитронов) приводит к включению обоих тиристоров.

Открытие тиристора  $T3$  сопровождается открытием тиристора  $T4$ , при этом напряжение на тиристоре  $T3$  становится меньше напряжения включения и он закрывается. При открытых тиристорах  $T2$  и  $T4$  создается цепь заряда конденсаторов  $C2$  и  $C3 — C4$  до напряжения  $U_{ба}$ . После пуска дизеля контактор регулятора напряжения *КРН* своими силовыми контактами подает напряжение на обмотку возбуждения *ОВСГ* стартер-генератора.

При напряжении  $U_{сг} > 110$  В происходит пробой стабилитронов  $Ст1 — Ст4$  в цепи управления тиристора  $T1$ . Через открытый тиристор  $T1$  подаются импульсы запирающего напряжения с конденсаторов  $C3 — C4$  на тиристор  $T4$  и с конденсатора  $C2 —$  на тиристор  $T2$ .

При закрытии тиристора  $T2$  происходит заряд конденсатора  $C2$  обратной полярности через тиристор  $T1$  и резисторы  $R6 — R7$ , когда напряжение на нем станет достаточным для пробоя стабилитронов  $Ст5 — Ст10$ , открывается тиристор  $T2$ . Разрядный импульс конденсатора  $C2$  закрывает тиристор  $T1$  и далее цикл повторяется. Частота автоколебаний мультивибратора, собранного на тиристорах  $T1$  и  $T2$ , определяется постоянной времени разряда конденсатора  $C2$ .

При закрытии тиристора  $T4$  в обмотке возбуждения стартер-генератора ток падает (э.д.с. самоиндукции разряжается через диод *Д8*), и напряжение  $U_{сг}$  уменьшается.

При  $U_{сг} \approx 110$  В стабилитроны  $Ст1 — Ст4$  запирают цепь управления тиристора  $T1$  и он закрывается. Колебания мультивибратора прекращаются. Тиристор  $T2$  остается открытым, создавая цепь заряда конденсатора  $C2$  через резисторы  $R5$  и  $R16$ .

Когда заряд  $C2$  станет достаточным для пробоя стабилитронов  $Ст11 — Ст15$ , открывается тиристор  $T3$ , а затем  $T4$ . Ток возбуждения, а значит, и напряжение снова повышается и когда немного превысит 110 В, процесс коммутации тиристоров повторяется.

Среднее значение тока возбуждения *СГ* зависит от длительности открытого и закрытого состояний тиристора  $T4$  или от так называемой скважности импульсов тока через тиристор  $T4$ . Чем меньше скважность этих импульсов, т. е. чем больше времени тиристор открыт, тем больше среднее значение тока возбуждения и наоборот.

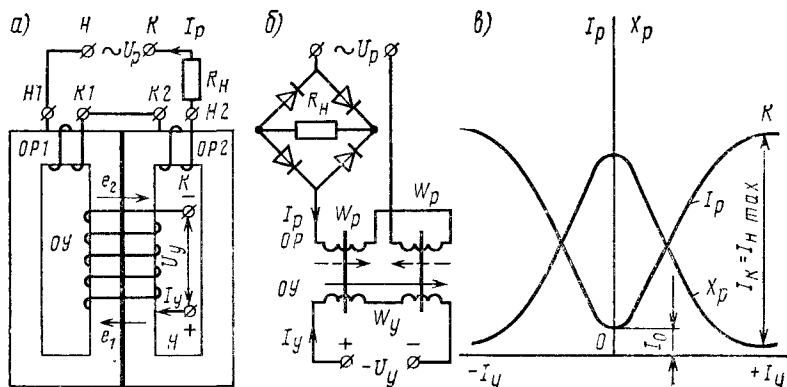
Амплитуда колебаний напряжения, поддерживаемого регулятором, зависит от точности настройки измерительного органа и быстродействия системы коммутации тиристоров. Длительность переходного процесса при скачкообразном изменении нагрузки *СГ* не превышает 3 с, частота колебаний тока возбуждения *СГ* в зависимости от величины возмущений изменяется от 11 до 20 Гц.

### 35. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

*Магнитным усилителем (МУ)* называется бесконтактный электромагнитный аппарат, представляющий собой ферромагнитный сердечник с наложенными на него обмотками и предназначенный для управления выходным

Рис. 139. Простой магнитный усилитель:

а — схема расположения обмоток; б — соединение обмоток; в — статическая характеристика усилителя



сигналом большой мощности посредством одного или нескольких входных сигналов малой мощности. В зависимости от магнитного режима, обусловленного схемным и техническим исполнением, МУ различают: простые МУ (без обратной связи), МУ с обратной связью и релейные МУ.

**Простой МУ (без обратной связи).** Усилитель (рис. 139, а) включает в себя сердечник из ферромагнитных материалов и обмотки переменного и постоянного тока. Обмотки переменного тока принято называть *рабочими обмотками* ОР, обмотки постоянного тока — *обмотками управления* или *подмагничивания* ОУ. На обмотку ОУ подается входной сигнал в виде постоянного тока  $I_y$  напряжения  $U_y$ , на зажимы рабочей обмотки включается нагрузка, ток  $I_p$  в которой является *выходным сигналом*. Питание рабочей цепи производится от источника напряжения переменного тока  $\sim U_p$ .

Принцип действия магнитного усилителя основан на использовании свойства насыщения ферромагнитного сердечника. Уровнем насыщения сердечника можно управлять, изменяя подмагничивание его постоянным током  $I_y$ . При этом будут изменяться выходные параметры: ток  $I_p$  и напряжение  $\sim U_p$ . Покажем это на статической характеристике простого МУ, представляющей собой зависимость тока в рабочей обмотке  $I_p$  от тока в обмотке управления  $I_y$  (рис. 139, в). Известно, что ток в рабочей цепи определяется по формуле

$$I_p = \frac{U_p}{\sqrt{X_p^2 + R^2}},$$

где  $R$  — активное сопротивление рабочей цепи, включая и нагрузку;

$X_p$  — индуктивное сопротивление рабочей обмотки. Индуктивное сопротивление рабочей обмотки  $X_p = \omega L_p$ , где  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота питания рабочей цепи. Индуктивность рабочей обмотки

$$L_p = \frac{\omega_p^2 s_c}{l_c} \mu_{\sim}.$$

В этой формуле являются постоянными для определенного типа МУ его конструктивные параметры: число витков рабочей обмотки  $\omega_p$ , площадь поперечного потока в сердечнике  $s_c$  и длина пути магнитного потока в сердечнике  $l_c$ . Переменная величина — только магнитная проницаемость сердечника  $\mu_{\sim}$ . Таким образом, индуктивность обмотки  $L = f(\mu_{\sim})$ , а значит, и индуктивное сопротивление обмотки (при неизменной частоте  $f$ )  $X_p = 2\pi f L_p = f(\mu_{\sim})$ .

Увеличивая подмагничивание сердечника постоянным током  $I_y$ , можно довести его до состояния насыщения, при котором магнитная проницаемость  $\mu_{\sim}$ , а следовательно, и индуктивное сопротивление рабочих обмоток  $X_p$  будет

незначительным (см. рис. 139, в). Поэтому ток в рабочей цепи окажется наибольшим, определяемым только активным сопротивлением цепи  $R$ . Для простейшего МУ обе кривые  $(I_p, X_p) = f(I_y)$  будут симметричны относительно оси ординат, так как магнитное состояние сердечника не зависит от направления тока  $I_y$ .

Принцип действия магнитного усилителя можно наглядно показать графически (рис. 140). На осях координат — индукция  $B$ , напряженность магнитного поля  $H$  и время  $t$ . В случае если в рабочей цепи отсутствует сопротивление  $R_n$ , мгновенное значение напряжения питания будет полностью уравновешиваться э. д. с. самоиндукции в рабочих обмотках  $e_p$

$$u = -e_p = \omega_p \frac{d\Phi_{\text{мгн}}}{dt} = \omega_p S_c \frac{dB_{\text{мгн}}}{dt},$$

здесь  $\Phi_{\text{мгн}}$  и  $B_{\text{мгн}}$  — мгновенные значения соответственно переменных магнитного потока и индукции в сердечнике

При синусоидальном изменении напряжения  $u = U_p \sin \omega t$  индукция будет изменяться тоже синусоидально, но с запаздыванием относительно напряжения на четверть периода. При этом ее амплитуда  $B_{\sim} = \frac{U_p}{\omega_p S_c}$ . На рис. 140 по кривой индукции  $B_{\text{мгн}}$  построена кривая напряженности переменного магнитного поля

$$H_{\sim} = \frac{\omega_p I_p}{l_c}.$$

Кривые 1 построены при отсутствии, а кривые 2 — при наличии постоянного магнитного поля. Из рис. 138 видно, что с ростом постоянного подмагничивания  $B_-$  вследствие насыщения сердечника сильно растет амплитуда напряженности переменного магнитного поля  $H_{\sim}$ , а значит, изменяется и пропорциональная ей амплитуда рабочего тока

$$I_p = \frac{H_{\sim} l_c}{\omega_p}.$$

Если в рабочей цепи есть сопротивление нагрузки  $R_n$ , напряжение на рабочих обмотках  $\omega_p$  будет несинусоидальным, так как несинусоидально напряжение на сопротивлении нагрузки. Вследствие этого при одном и том же постоянном подмагничивании введение сопротивления нагрузки  $R_n$  последовательно с рабочими обмотками вызывает уменьшение амплитуды напряженности переменного магнитного поля и рабочего тока, т. е. снижение эффекта усиления.

Современные МУ выполняются, как правило, на двух одинаковых сердечниках кольцевой, П- или Ш-образной формы, на каждом из которых размещены одинаковые рабочие обмотки, общее число которых должно быть четным. Для устранения наводки в обмотках управления переменной э. д. с. взаимоиנדукции под действием переменного потока рабочей обмотки она соединяется своими частями встречно-последовательно. При этом магнитный поток и индуцируемая э. д. с. рабочих обмоток будет в противофазе. Такое соединение рабочих обмоток дает возможность применить экономичную общую обмотку управления, охватывающую оба сердечника.

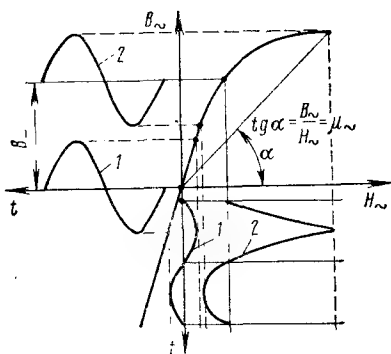


Рис. 140. График зависимости параметров магнитного усилителя:

$$B_{\sim} = f(H_{\sim}, t) \text{ и } H_{\sim} = f(I_p)$$

Наиболее распространенная схема простого МУ приведена на рис. 139, б. Нагрузка на усилитель может быть включена на переменном или постоянном токе, т. е. через выпрямитель. Простой МУ применяется обычно для линейного усиления входного сигнала. В тепловозных схемах такие МУ используются в узлах автоматического ограничения тока и напряжения генератора и регулирования мощности энергетической установки. По спецификации тепловозных схем такие МУ называются *трансформаторами постоянного тока ТПТ и постоянного напряжения ТПН*.

Основные параметры простого МУ можно определить по его статической характеристике (см. рис. 139, в), на которой можно отметить две особые точки: точку пересечения ее с осью ординат, определяющую ток холостого хода  $I_0$ , и точку, лежащую непосредственно после перегиба и определяющую максимальный ток нагрузки  $I_K = I_{н\max}$ . Отношение этих величин  $K = I_K/I_0$  называют *коэффициентом кратности* или просто кратностью тока нагрузки при изменении подмагничивающего поля от максимума до нуля.

Кратность тока нагрузки — один из важнейших параметров МУ. Выбор расчетного значения кратности тока в нагрузке необходимо производить не только из условия получения определенного тока холостого хода, но и с учетом требования, предъявляемого к линейности характеристики вход—выход МУ. Нелинейность характеристики МУ увеличивается с ростом тока  $I_y$ . Рабочий участок характеристики, определяемый ее линейностью, заканчивается при  $I_n = 0,8 I_K$ . Нелинейность характеристики растет также с увеличением сопротивления нагрузки и ухудшением магнитных свойств материала сердечника. В зависимости от перечисленных факторов кратность тока изменяется от 5 до 100 и более (для материалов с большой магнитной проницаемостью).

Ряд коэффициентов применяют для характеристики режимов работы усилителя. К ним относятся коэффициенты усиления:

$$а) \text{ по току } K_i = \frac{I_n - I_0}{I_y};$$

$$б) \text{ по напряжению } K_u = \frac{U_n - U_0}{U_y};$$

$$в) \text{ по мощности } K_p = \frac{P_n - P_0}{P_y} = K_i K_u = K_i^2 \frac{R_n}{R_y}.$$

В простых МУ коэффициент усиления по мощности  $K_p$  изменяется от нескольких десятков до сотен единиц.

**Магнитный усилитель с обратной связью.** Эти усилители применяют для получения больших значений коэффициента усиления по мощности. В МУ обратной связью (ОС) является использование выходного спрямленного тока  $I_p$  рабочих обмоток для его подмагничивания. Если подмагничивание током  $I_p$  усиливает подмагничивающее действие обмотки управления, то такую обратную связь принято называть *положительной*; если же действие тока  $I_p$  ослабляет действие обмотки управления, то такая обратная связь называется *отрицательной*. Очевидно, что повышению коэффициента усиления способствует только положительная ОС, которая получила наибольшее применение в тепловозных магнитных аппаратах. По техническому исполнению ОС различают МУ с внешней, внутренней и смешанной обратной связью.

Внешняя ОС выполняется при помощи отдельной обмотки. В зависимости от способа включения обмотки ОС различают схемы МУ с обратной связью по напряжению (рис. 141, а) и по току (рис. 141, б). В тепловозных аппаратах применяется обратная связь по току нагрузки. Обратная связь по напряжению применяется только в очень мощных МУ. Действие внешней обратной связи можно изменять при помощи резистора с переменным сопротивлением.

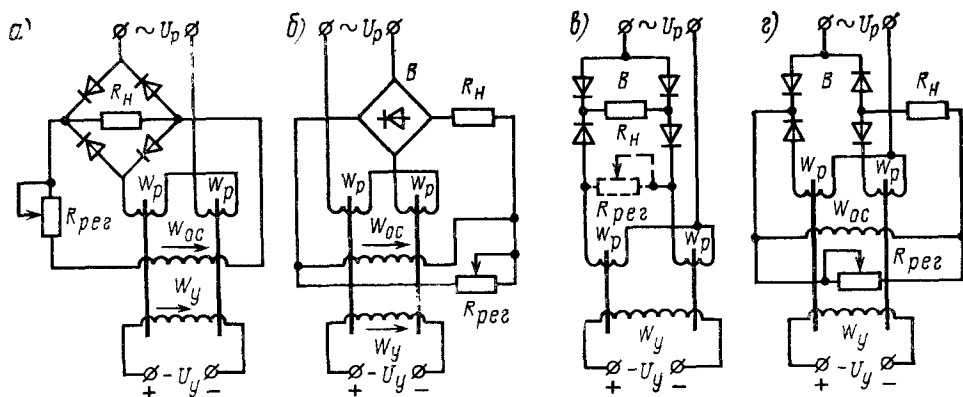


Рис. 141. Схемы магнитного усилителя с обратной связью

Внутренняя ОС осуществляется действием спрямленного выходного тока, протекающего по рабочим обмоткам. В схеме МУ с внутренней ОС (рис. 141 а) рабочие обмотки соединяются с двухполупериодным мостовым выпрямителем, в середину плеч которого включается нагрузка  $R_H$ . При такой схеме усилителя в каждой рабочей обмотке ток проходит только в одном направлении. Создаваемый при этом в каждом сердечнике магнитный поток будет складываться с магнитным потоком обмотки управления, усиливая подмагничивание сердечника. Получается как бы двойное последовательное усиление: подав в обмотку управления малой мощности входной сигнал, получим на выходе МУ, как в простом МУ, выходной сигнал (ток  $I_p$  и напряжение  $U_p$ ) большей мощности. Этот возросший выходной ток в рабочих обмотках вызывает дополнительное подмагничивание сердечника, сопровождаемое еще большим возрастанием выходного сигнала.

Магнитные усилители с внутренней ОС, выполненные с выходом на постоянном (выпрямленном) токе (рис. 141, б и в), наиболее широко применяются в тепловозных магнитных аппаратах: блоках регулирования генератора и в магнитном регуляторе напряжения вспомогательного генератора. В бесконтактном магнитном реле переходов и магнитном реле времени обратная связь выполнена смешанной: параллельно с внутренней обратной связью подмагничивание сердечника осуществляется также и обмоткой внешней ОС (рис. 141, г). Принципиально на всех схемах усилителей (рис. 141, а, б, в, г) показана одна обмотка управления, хотя практически выполняется несколько таких обмоток, позволяющих производить суммирование нескольких входных сигналов.

Магнитные усилители с внутренней ОС, выполненные по схеме (рис. 141, в), принято называть *усилителями с самонасыщением*. В спецификации тепловозных схем такие усилители, применяемые в системе возбуждения и регулирования тягового генератора отечественных тепловозов, называются амплистатами возбуждения генератора или амплистатами подвозбуждения возбудителя. Напряженность подмагничивающего поля  $H_-$  в усилителе с обратной связью:

$$H_- = H_y \pm H_{oc} = \frac{I_y \omega_y \pm I_{oc,op} \omega_{oc}}{l_-},$$

где  $\omega_{oc}$  — число витков обратной связи (внешней);  
 $\omega_{oc} = \omega_p$  — для усилителя с внутренней обратной связью;  
 $\omega_{oc} = \omega_p + \omega_{oc}^B$  — для смешанной обратной связи;  
 $I_y, I_{oc,op}$  — среднее значение тока соответственно в обмотках управления и обратной связи;  
 $l_-$  — средняя длина пути потока подмагничивания.

Степень влияния обратной связи оценивается коэффициентом обратной связи, представляющим собой отношение приращения напряженности поля обратной связи к приращению среднего значения напряженности поля переменного тока:

$$K_{oc} = \frac{\Delta H_{oc}}{\Delta H_{cp}} = \frac{\Delta I_{oc} \omega_{oc}}{I_{\sim}} : \frac{\Delta I \omega_p}{k_f I_{\sim}} = \frac{\Delta I_{oc}}{\Delta I} \cdot \frac{\omega_{oc}}{\omega_p} \cdot \frac{I_{\sim} k_f}{I_{-}}, \quad (50)$$

где  $I_{\sim}$ ,  $I_{-}$  — длина средних силовых линий соответственно постоянного и переменного тока.

Для большинства магнитных усилителей, кроме некоторых типов, выполненных на многостержневых сердечниках, принято  $I_{-} = I_{\sim} = I$ ;  $k_f$  — коэффициент формы выходного тока. Для усилителей с выходом на постоянном токе при максимальном токе выхода коэффициент  $k_f$  можно считать одинаковым для обоих видов обратной связи и равным 1,11.

Среднее значение тока обратной связи можно выразить через действующее значение рабочего тока

$$\Delta I_{oc} = \Delta I_{oc.p} k_b = \Delta I \frac{k_b}{k_f}, \quad (51)$$

где  $\Delta I$  — приращение действующего значения полного тока (в случае внешней обратной связи) и приращение действующего значения первой гармоники тока в рабочих обмотках в случае внутренней обратной связи.

Коэффициент выпрямления

$$k_b = \frac{I_{пр} - I_{обр}}{I_{пр}},$$

где  $I_{пр}$  — прямой ток выпрямителя;

$I_{обр}$  — обратный ток выпрямителя при полном обратном напряжении на вентиле.

Подставив формулу (51) в (50), получим: для внешней ОС  $K_{oc} = k_b \omega_{oc} / \omega_p$ ; для внутренней  $K_{oc} = k_b$ . Из выражений  $K_{oc}$  видно, что внешняя ОС дает возможность изменять коэффициент  $K_{oc}$  от 0 до  $K_{oc} \geq 1$ . При внутренней ОС коэффициент  $K_{oc}$  определяется значением коэффициента выпрямления  $k_b$  и, как правило,  $0 < K_{oc} < 1$  и только секционированием обмоток  $\omega_p$  и встречным включением их секций можно достигнуть  $K_{oc} > 1$ . При внешней ОС регулирование коэффициента  $K_{oc}$  осуществляется изменением сопротивления резистора  $R_{рег}$ , шунтирующего всю или часть обмотки ОС (см. рис. 139, б). Оба способа могут быть использованы при выборе режима типового МУ, имеющего несколько управляющих обмоток.

Основные параметры МУ с обратной связью могут быть определены из его статической характеристики (рис. 142, а — линия 1'—б'). Она получается графическим построением: путем алгебраического сложения напряженностей

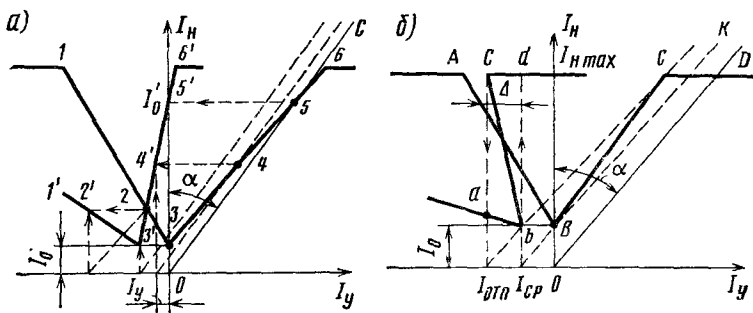


Рис. 142. Характеристики магнитного усилителя при коэффициенте обратной связи:

а —  $K_{oc} < 1$ ; б —  $K_{oc} > 1$

полей обмоток ОУ и обратной связи (линия ОС). На рис. 142, а показано использование для этой цели характеристики МУ без ОС (линия 1—б) и характеристики обратной связи (линия ОС). Видно, что при введении ОС левая ветвь характеристики МУ уменьшает крутизну, а правая — наоборот, увеличивает крутизну, а значит, в рабочей зоне коэффициент усиления МУ увеличивается.

В реальном усилителе с увеличением коэффициента  $K_{oc}$  ( $\lg \alpha$ ) будет возрастать ток холостого хода усилителя ( $I'_0 > I_0$ ), а вся характеристика — смещаться влево. Для того чтобы при отсутствии сигнала на входе ( $I_0 = 0$ ) ток в нагрузке имел минимальное значение  $I_{нос}$ , необходимо компенсировать напряженность поля  $H_0$ , создаваемую обмоткой ОС при прохождении по ней тока  $I'_0$ . Это может быть осуществлено при помощи отдельной обмотки смещения, создающей напряженность

$$H_{см} = H_0 = \frac{w_{осм} I'_0}{l_c},$$

направленную встречно напряженности  $H_0$ . В системе регулирования возбуждения генератора тепловозов 2ТЭ10Л и системах, ей подобных, компенсация действия тока  $I'_0$  обеспечивается размагничивающей обмоткой возбуждателя.

В усилителях с ОС подмагничивающее поле создается в основном за счет ОС, в результате чего достигается значительное изменение коэффициентов усиления. Количественную оценку влияния ОС на коэффициенты усиления можно сделать по выражениям этих коэффициентов, которые могут быть получены из закона равенства м. д. с. усилителя

$$I_n w_p = I_y w_y \pm I_{oc} w_{oc}. \quad (52)$$

Заменяя в равенстве (52) ток обратной связи током нагрузки  $I_{oc} = I_{нкв}$ , получим выражения основных параметров усилителя с ОС

$$\left. \begin{aligned} I_{нос} &= \frac{I_y \frac{w_y}{w_p}}{1 \mp \frac{w_{ос}}{w_p} k_b} = I_y \frac{k'_i}{1 \mp K_{oc}}; \\ K_i &= \frac{I_{нос}}{I_y} = \frac{w_y}{w_p} \cdot \frac{1}{1 \mp K_{oc}} = K'_i \frac{1}{1 \mp K_{oc}}; \\ K_p &= K'_i \frac{R_n}{R_y} = \left( \frac{w_y}{w_p} \right)^2 \frac{R_n}{R_y} \cdot \frac{1}{(1 \mp K_{oc})^2} = \frac{K'_p}{(1 \mp K_{oc})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

где  $K'_i$ ,  $K'_p$  — коэффициенты усиления магнитного усилителя без ОС.

Знак «—» в знаменателе соответствует положительной, а знак «+» — отрицательной ОС. Из формул (53) видно, что положительная ОС повышает усиление тока в  $(1 - K_{oc})^{-2}$  раз. При  $K_{oc} \rightarrow 1$ :  $K_i \rightarrow \infty$  и  $K_p \rightarrow \infty$ .

**Магнитный усилитель в релейном режиме.** С увеличением коэффициента  $K_{oc}$  растет крутизна статической характеристики усилителя. При  $K_{oc} > 1$  в характеристике усилителя появляются отрицательный наклон и петля, характерные для устройств релейного действия. МУ с глубокой положительной ОС ( $K_{oc} > 1$ ), работающий в релейном режиме, принято называть *бесконтактным магнитным реле* (БМР). БМР обладает всеми достоинствами МУ и широко применяется в технике автоматизации различных объектов. В тепловозах БМР применяется в системе автоматического управления ступенями ослабления возбуждения тяговых двигателей (реле переходов) и в системе автоматики гидропередачи. Принципиально БМР может быть выполнено как с внешней обратной связью (см. рис. 141, б), так и со смешанной (см. рис. 141, г).

Статическую характеристику БМР, так же как и усилителя с ОС, можно построить графически, используя характеристику усилителя без ОС и характеристику обратной связи. Такое построение приведено на рис. 142, б для случая идеализированной характеристики усилителя  $ABCD\ abc$ . Если крутизна характеристики обратной связи  $OK$  меньше, чем крутизна правой ветви  $BC$ , то при смещении прямой  $OK$  влево она может занять два предельных положения и пересечет характеристику  $ABC$  в двух точках  $B$  и  $C$  (на рис. 142, б показано штриховой линией). Режим усилителя между этими двумя предельными точками неустойчив, и под действием поля обратной связи ток на выходе скачком изменяется между точками  $B$  и  $C$  релейной характеристики  $ABCD$ .

Релейный режим усилителя характеризуется двумя значениями тока управления: тока срабатывания  $I_{ср}$  и тока отпадания  $I_{отп}$  (им соответствуют напряженности поля  $H_{ср}$  и  $H_{отп}$ ). При токе  $I_{ср}$  ток выхода БМР скачком изменяется от тока холостого хода  $I_0$  до максимального значения  $I_{max}$  в точке  $d$  и при дальнейшем увеличении тока  $I_y$  изменяется незначительно. Уменьшение тока  $I_y$  до значения  $I_{отп}$  вызывает также скачкообразное изменение тока выхода от  $I_{max}$  до  $I_{min}$  в точке  $a$  и последующее незначительное возрастание  $I_n$  с увеличением отрицательного управляющего сигнала. Релейная характеристика  $abcd$ , приведенная на рис. 142, б, соответствует однопозиционному поляризованному реле с одним размыкающим контактом. При введении отрицательного смещения  $I_{см}(-H_{см})$  можно сдвинуть петлю в правый квадрант, т. е. получить характеристику электромагнитного реле с одним замыкающим контактом. В тепловозных схемах используются БМР с такой характеристикой.

С увеличением коэффициента обратной связи  $K_{ос}$ , определяющего угол наклона характеристики обратной связи  $\alpha$ , увеличивается ширина петли релейной характеристики  $\Delta = I_{ср} - I_{отп}$  (см. рис. 142, б). Шириной петли определяется коэффициент возврата БМР

$$K_{вз} = \frac{I_{отп}}{I_{ср}} = \frac{I_{ср} - \Delta}{I_{ср}} = 1 - \frac{\Delta}{I_p} . \quad (54)$$

Настройка БМР на требуемое значение  $K_{вз}$  производится за счет изменения  $K_{ос}$  способами, рассмотренными ранее.

О быстройдействии МУ можно судить по длительности промежутка времени между моментом подачи сигнала на его вход и изменением выходного сигнала. Большая продолжительность переходных процессов при включении и выключении, особенно дающая знать о себе с увеличением мощности на выходе, является одним из основных недостатков МУ, определяющих применимость их в аппаратах конкретного назначения. Продолжительность переходного процесса МУ характеризуется его постоянной времени  $T_y$ , которая определяется в основном параметрами управляющей цепи. Для простого МУ постоянная времени определяется по формуле

$$T'_y = \frac{L_y}{R_y} = \frac{\omega_y s_c}{I_c} \cdot \frac{\mu}{R_y} = \frac{R_H}{R_y} \cdot \frac{\omega_H^2}{\omega_p} \cdot \frac{1}{4f} , \quad (55)$$

где  $L_y$ ,  $R_y$  — соответственно индуктивность и сопротивление управляющей цепи.

Для МУ с обратной связью постоянная времени

$$T_{yос} = \frac{T'_y}{1 \mp K_{ос}} . \quad (56)$$

Из формулы (56) видно, что введение положительной ОС (знак «—» в знаменателе) увеличивает постоянную времени. Однако при заданном коэффи-

циенте усиления переходный процесс МУ с положительной ОС короче, чем у простого МУ. В МУ, имеющих несколько обмоток управления, постоянная времени  $T_y$  определяется суммой постоянных времени цепи каждой обмотки и колеблется от нескольких сотых до десятых долей секунды.

Существует много способов повышения быстродействия МУ. Как видно из формулы (55), уменьшить постоянную времени можно за счет увеличения частоты питания  $f$  или же варьирования параметрами обмоток усилителя. Уменьшая параметры обмоток управления ( $\omega_y$ ,  $R_y$ ) или даже совсем исключая их из схемы, можно достигнуть значительного быстродействия. В таких МУ, называемых *быстродействующими магнитно-полупроводниковыми усилителями*, управляемость обеспечивается транзисторами, шунтирующими вентили выпрямления и выполняющими функции нелинейного переменного сопротивления.

### 36. МАГНИТНЫЕ АППАРАТЫ

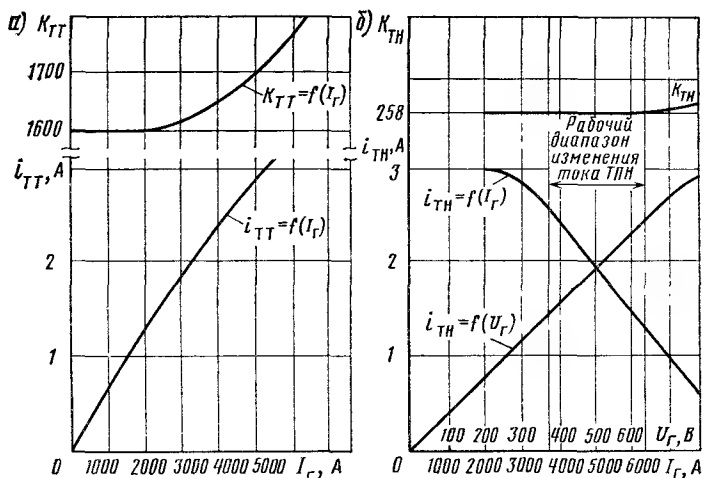
В различных узлах электрической схемы тепловозов 2ТЭ10Л и других применяют бесконтактные магнитные аппараты, основанные на принципе работы магнитных усилителей и различающихся назначением, техническим и схемным исполнением, а также способами введения входных сигналов.

**Трансформаторы постоянного тока (ТПТ) и постоянного напряжения (ТПН).** Предназначены эти аппараты для измерения соответственно тока и напряжения тягового генератора и преобразования их в форму, удобную для последующего использования в системе возбуждения и регулирования генератора. ТПТ и ТПН выполняют функции магнитных датчиков тока и напряжения. По принципу работы и характеристикам эти аппараты не отличаются

Таблица 19

| Параметры                                 | Типы аппарата |          |          |
|-------------------------------------------|---------------|----------|----------|
|                                           | ТПТ-4Б        | ТПТ-10   | ТПН-3А   |
| Форма сердечников                         | Тороидальная  |          |          |
| Сечение сердечников, мм <sup>2</sup>      | 48            | 32       | 150      |
| Марка сплава сердечников                  | 79НМ          | 79НМ     | 79НМ     |
| Напряжение питания, В                     | 70            | 15—50    | 30       |
| Частота питания, Гц                       | 133           | 45—133   | 133      |
| Длительный ток в рабочей цепи не более, А | 2,6           | 2,57     | 2,5      |
| Сопротивление цепи нагрузки, Ом           | 7             | 6        | 5        |
| То же цепи управления, Ом                 | —             | —        | 500      |
| Кратность токов:                          |               |          |          |
| в обмотке управления                      | 6600          | 2400     | 1,7      |
| в рабочей обмотке                         | 2000          | 1400     | 0,8      |
|                                           | 3,6           | 3,6      | 2,6      |
|                                           | 1,2           | 1,2      | 1,3      |
| Число витков:                             |               |          |          |
| в рабочей обмотке                         | 1600×2        | 680×2    | 260×2    |
| в обмотке управления                      | —             | —        | 420      |
| Марка диаметра провода:                   | ПЭВ2          | ПЭВ2     | ПЭВ2     |
| рабочей обмотки                           | 0,8/0,89      | 0,8/0,89 | 1,0/1,11 |
| обмотки управления                        | —             | —        | 1,0/1,11 |
| Сопротивление при 20° С, Ом               |               |          |          |
| рабочей обмотки                           | 3,0×2         | 1,5×2    | 0,58×2   |
| обмотки управления                        | —             | —        | 1,7      |
| Масса, кг                                 | 3,3           | 2,8      | 4        |

Рис. 143. Характеристики трансформаторов:  
а — ТПТ; б — ТПН



от описанных выше простейших МУ. На тепловозах применялись трансформаторы ТПТ и ТПН нескольких типов. В табл. 19 приведены основные технические данные трансформаторов постоянного тока типов ТПТ-4Б, ТПТ-10 и постоянного напряжения типа ТПН-3А, которые используются на тепловозах 2ТЭ10Л и др.

Трансформаторы ТПТ и ТПН состоят из двух кольцевых сердечников, намотанных из ленты железоникелевого сплава. На каждом сердечнике размещены рабочие обмотки, которые между собой соединены встречно. В ТПТ обмотка управления отсутствует, а ее роль выполняют один или несколько силовых кабелей генератора, пропускаемых через центральное отверстие сердечников. В ТПН обмотка управления общая, намотана на оба сердечника. Сердечники трансформаторов с обмотками и шпильками залиты компаундом на основе эпоксидной смолы. К шпилькам прикреплены угольники, при помощи которых трансформаторы устанавливаются на тепловозе.

Статические характеристики трансформаторов ТПТ и ТПН должны удовлетворять требованию линейности в рабочей зоне. Из приведенных на рис. 143 характеристик ТПН-3Н и ТПТ-4Б видно, что они удовлетворяют этому требованию. Наряду с линейностью характеристики ТПТ и ТПН должны обладать высокой чувствительностью, которая определяется крутизной их характеристики. Нагрузкой для трансформаторов ТПТ и ТПН являются балластные резисторы соответственно  $СБТТ$  и  $СБТН$  и подключенная параллельно им через выпрямительные мосты  $B1$  и  $B2$  обмотка управления  $ОУ$  амплитата. Эти элементы образуют селективный узел, посредством которого формируются сигналы по току и напряжению генератора, подаваемые в систему его регулирования (схему включения и принцип действия селективного узла см. в гл. 7).

**Индуктивный датчик.** Установлен в системе объединенного регулирования дизель-генераторной установки тепловозов 2ТЭ10Л и др. в качестве датчика нагрузки дизеля. Датчик ИД-10 (рис. 144, а) состоит из неподвижной части катушки 1, намотанной на каркас 2 из пресс-материала АГ-4, выводы которой выполнены в виде штепсельного разъема 3. Катушка помещена в магнитопровод 4, вместе с которым она залита эпоксидным компаундом. Внутри катушки перемещается якорь 5, изготовленный из электротехнической стали марки Э10.

Входным сигналом индуктивного датчика является линейное перемещение штока серводвигателя регулятора скорости дизеля, выходным — ток в цепи регулировочной обмотки амплитата, подключаемой к датчику через вы-

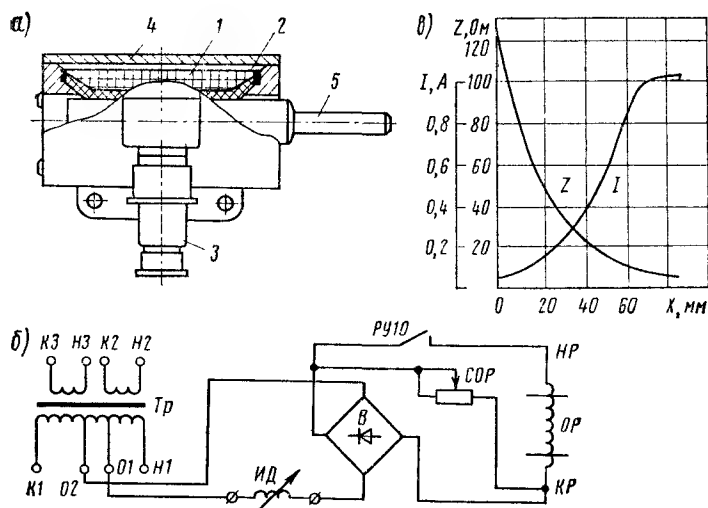


Рис. 144. Индуктивный датчик ИД10:

а — устройство; б — схема подключения; в — статическая характеристика; 1 — катушка; 2 — каркас; 3 — штепсельный разъем; 4 — магнитопровод; 5 — якорь

прямитель. Схема включения индуктивного датчика приведена на рис. 144, б. При перемещении якоря, соединенного со штоком серводвигателя регулятора дизеля, изменяется индуктивность катушки, а следовательно, ее полное сопротивление переменному току. Характеристика индуктивного датчика ИД-10 приведена на рис. 144, в. Питание датчика ИД-10 производится от распределительного трансформатора напряжением 10 В частотой 133 Гц. Датчик имеет ход якоря 65 мм, максимальное полное сопротивление катушки не менее 70 Ом. Масса аппарата 1 кг.

**Бесконтактное тахометрическое устройство.** Назначение устройства — измерение частоты вращения вала дизеля и формирование сигнала по частоте вращения вала дизеля, вводимого в систему регулирования генератора. Блок БА-420, принципиальная схема которого приведена на рис. 145, а, состоит из насыщающегося трансформатора  $Tr1$ , компенсирующего трансформатора  $Tr2$ , выпрямительного моста  $B$ , сглаживающего фильтра, состоящего из индуктивности конденсатора  $L$  и резистора  $R$ . Детали блока размещены в металлическом корпусе. Насыщающийся трансформатор выполнен на тороидальном сердечнике из пермаллоя, компенсирующий трансформатор — на тороидальном альсиферовом сердечнике. Обмотки трансформаторов залиты эпоксидным компаундом. Сглаживающий фильтр-дрессель и два электролитических конденсатора смонтированы на изоляционной панели.

Принцип действия такого устройства основан на использовании свойства насыщенного трансформатора  $Tr1$  изменять выходное напряжение и ток нагрузки по линейной зависимости от частоты питающего напряжения. Так как источник питания СПВ — синхронный подвозбудитель имеет частоту, пропор-

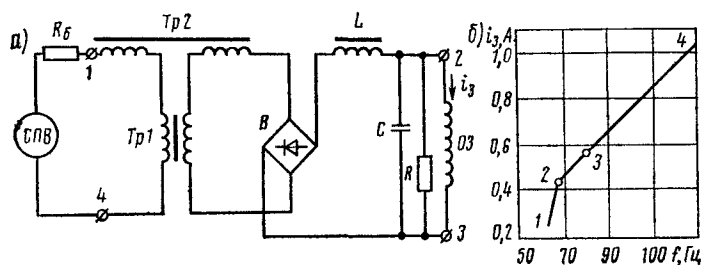


Рис. 145. Бесконтактное тахометрическое устройство:

а — схема; б — статическая характеристика

циональную частоте вращения дизеля, то и ток нагрузки трансформатора  $Tr1$  является линейной функцией от частоты вращения вала дизеля.

Для устранения погрешности измерения частоты вследствие неидеальности петли гистерезиса сердечника в схему включен компенсирующий трансформатор  $Tr2$ , у которого первичная обмотка соединена последовательно с первичной обмоткой трансформатора  $Tr1$ , а вторичная обмотка — встречно со вторичной обмоткой  $Tr1$  и ее э. д. с. компенсирует часть э. д. с. вторичной обмотки  $Tr1$ , обусловленную изменением намагничивающего тока при насыщении сердечника. Выходное напряжение трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$  выпрямляется мостом  $B$ , сглаживается фильтром, и подается на задающую обмотку амплитаста  $O3$ .

На рис. 145, б приведена необходимая зависимость тока в задающей обмотке от частоты. Цифрами на графике указаны позиции контроллера машиниста. Колебания тока нагрузки синхронного подвозбудителя при частоте 150 Гц вызывают изменение его напряжения в пределах от 125 до 95 В. При этом напряжение на нагрузке не должно изменяться более чем на 2% при начальном токе нагрузки 1,0 А и на 3,5% при начальном токе нагрузки 1,7 А.

При длительной эксплуатации блока БА-420 на тепловозе 2ТЭ10Л установлена высокая его надежность. В настоящее время бесконтактное тахометрическое устройство устанавливается и на других тепловозах (см. схему тепловоза 2ТЭ116 в гл. 8).

**Магнитные регуляторы.** В тепловозных замкнутых системах регулирования магнитные регуляторы осуществляют заданную программу и необходимое усиление регулирующего воздействия. Основным элементом таких регуляторов является магнитный усилитель. В зависимости от круга выполняемых функций и назначения магнитные регуляторы, применяемые в тепловозных схемах, могут быть разделены на две группы: магнитные регуляторы возбуждения тягового генератора и магнитные регуляторы напряжения вспомогательного генератора. Здесь рассматриваются только регуляторы, организующие регулирующее воздействие необходимой формы и уровня энергии в цепи возбуждения тягового генератора. Применяемые же в них полупроводниковые приборы выполняют вспомогательные функции: выпрямления переменного тока в постоянный, разделения направления тока в электрических цепях и т. п.

Магнитные регуляторы возбуждения тягового генератора составляют основу системы объединенного регулирования дизель-генераторной установки. Получая сигналы от датчиков о состоянии и режимах работы дизеля и генератора, такая система обеспечивает полное использование мощности дизеля, а также ограничение напряжения и тока тягового генератора. В такой системе функции магнитного регулятора выполняет магнитный усилитель с внутренней обратной связью, называемой амплитастом.

#### Техническая характеристика амплитаста АВ-3

|                                          |                     |
|------------------------------------------|---------------------|
| Количество сердечников                   | 2                   |
| Форма сердечников                        | П-образная          |
| Сечение сердечников                      | 450 мм <sup>2</sup> |
| Марка стали сердечников                  | Э320                |
| Толщина листов                           | 0,35 мм             |
| Напряжение питания                       | 60 В                |
| Частота питания                          | 133 Гц              |
| Длительный ток рабочей цепи              | 8,5 А               |
| Сопротивление в цепи нагрузки            | 6 Ом                |
| Минимальный ток выхода, не более         | 0,5 А               |
| Максимальное напряжение выхода, не менее | 35 В                |
| Максимальная м. д. с. управления         | 3400 А              |
| М. д. с. управления при $U_{\max}$       | 100 А               |
| Масса                                    | 12 кг               |

Основным требованием, предъявляемым к амплистату возбуждения и регулирования тепловозного генератора, является формирование программы регулирования, обусловленной внешней характеристикой генератора, и выполнение ее с необходимым коэффициентом усиления, точностью и быстродействием.

Амплистаты выпускают с несколькими управляющими обмотками, которые позволяют вводить в усилитель различные входные сигналы управления и выполнять их алгебраическое суммирование в зависимости от условий работы усилителя в системе. В тепловозах ТЭ10 и ТЭП60 первых выпусков применяются трехфазные амплистаты АВ-4 для возбуждения генератора, а в 2ТЭ10Л и ряде новых тепловозов с каскадной системой регулирования генератора используется однофазный амплистат АВ-3 для возбуждения возбудителя. Введение промежуточной ступени усиления позволяет уменьшить мощность элементов магнитного регулятора. Принцип регулирования от этого не изменяется.

Конструктивно амплистат АВ-3 для тепловозов 2ТЭ10Л и др. выполнен на двух П-образных сердечниках, шихтованных из листов холоднокатаной электротехнической стали Э310 или Э320 толщиной 0,35 мм. На каждый сердечник наложена рабочая обмотка, а оба сердечника охвачены четырьмя общими обмотками подмагничивания, которые в соответствии с основной выполняемой функцией называются: задающая регулировочная, стабилизирующая и управляющая.

Нагрузка (обмотка возбуждения возбудителя) подключена к амплистату АВ-3 через выпрямительный мост, собранный на диодах ВК-10-80, которые одновременно служат для создания внутренней обратной связи.

Питание рабочих обмоток амплистата АВ-3 осуществляется от синхронного однофазного подвозбудителя ГС-500 через распределительный трансформатор. Параметры обмоток амплистата АВ-3 приведены в табл. 20.

Т а б л и ц а 20

| Показатели                              | Обмотка |          |              |             |                 |
|-----------------------------------------|---------|----------|--------------|-------------|-----------------|
|                                         | рабочая | задающая | регулирующая | управляющая | стабилизирующая |
| Число витков                            | 118×2   | 500      | 100×2        | 500         | 1000            |
| Марка провода                           | ПСД     | ПЭВ2     | ПЭВ2         | ПЭВ2        | ПЭВ2            |
| Площадь сечения или диаметр провода, мм | 1,45*   | 0,80*    | 0,80*        | 0,80*       | 0,80*           |
|                                         | 1,74    | 0,89     | 0,89         | 0,89        | 0,89            |
| Сопротивление при 20° С, Ом             | 0,163   | 4,95     | 1,14         | 4,35        | 9,4             |
| Номинальный ток, А                      | 6,0     | 1,4      | 1,5          | 1,4         | 1,7             |

\* В числителе площадь, в знаменателе диаметр.

Физические свойства и принцип работы амплистата возбуждения ничем не отличаются от свойств и принципа работы магнитного усилителя с обратной связью. Однако использование усилителя в тепловозной схеме в качестве магнитного регулятора возбуждения генератора придает характерные особенности взаимодействия его обмоток между собой и с сопряженными с ними датчиками, а также обуславливает особенности реализации его статической характеристики.

## СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕПЛОВЗОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

---

### 37. КЛАССИФИКАЦИЯ СХЕМ

Схема электрических соединений представляет собой графическое изображение электрической системы со всеми связями, необходимыми для ее работы в определенных условиях. Обычно схемы электрических соединений для краткости называют *электрическими схемами*.

В зависимости от назначения электрооборудования схема тепловоза с электрической передачей разделяется на несколько комплексов или узлов:

1. Узел силовых цепей, т. е. соединений электрических элементов энергетической цепи. В передаче постоянного тока — это генератор и тяговые электродвигатели, в передаче переменного тока — генератор, узел выпрямления тока и тяговые электродвигатели, в передаче переменного тока — генератор, узел выпрямления тока, узел инвертирования и тяговые электродвигатели. Такая система может быть построена и без комплекса выпрямитель—инвертор. Тогда промежуточным звеном между генератором и тяговыми двигателями должно быть устройство для регулирования напряжения и частоты переменного тока.

2. Узел возбуждения генератора, куда входят машины и аппараты каскада возбуждения и автоматического его регулирования.

3. Узел вспомогательного генератора и аккумуляторной батареи с элементами их переключения и регулирования напряжения вспомогательного генератора.

4. Узел управления, куда входят цепь дистанционного управления силовой цепью, возбуждением и вспомогательными цепями, элементы взаимного блокирования цепей и автоматического управления режимом работы агрегатов энергетической цепи и вспомогательных и их защиты.

Самостоятельное значение имеет силовая цепь пуска дизеля. При передаче постоянного тока — это цепь включения тягового генератора в качестве стартерного двигателя; при тяговом генераторе переменного тока — цепь включения стартерного двигателя. В обоих случаях в узел входит источник электрической энергии — аккумуляторная батарея. Цепи управления процессом пуска дизеля входят в общий комплекс цепей управления. На всех тепловозах имеются цепи агрегатов собственных нужд, цепи измерительных приборов, сигналов и освещения.

На современных мощных тепловозах комплекс собственных нужд или вспомогательных агрегатов сложен и содержит несколько машин (см. гл. 4).

Для разработки схемы или разбора существующей, т. е. чтения схемы, необходимо знать назначение, устройство и работу каждого узла и его элементов; функциональную взаимосвязь элементов узла и узлов, а также знать условные изображения, принятые для графического изображения схем.

Схемы разделяются на два основных вида:

1. Принципиальные, в которых условно изображены электрические машины или их элементы и те из агрегатов и проводов, которые дают детальное представление о принципах изображенного узла (системы).

2. Монтажные или схемы соединений, показывающие соединение машин и аппаратов на тепловозе и прокладку проводов и кабелей, их марки и сечения, способы их крепления. Этот вид схем является по существу узловыми рабочими чертежами, которые необходимы при установке и монтаже электрооборудования.

Наиболее широко используются принципиальные схемы при изучении новых систем, монтаже на тепловозе, настройке узлов и отдельных их элементов или поиске повреждений. В изображении принципиальной схемы не показано действительное расположение ее элементов на тепловозе. Для удобства чтения схемы принято определенное расположение узлов на чертеже, как, например, на схеме тепловозов 2ТЭ10В первых выпусков (рис. 146, см. вкладку). Вправо от якоря генератора располагают узел тяговых электродвигателей с включенными в их цепь элементами автоматического управления и защиты. Слева от якоря размещают узел возбуждения и далее в том же направлении узел вспомогательного генератора и аккумуляторной батареи. Крайнюю левую часть чертежа или нижнюю его часть занимает комплекс узлов управления, где показаны: развертка контроллера, цепи питания катушек аппаратов, питаемых через контроллер и через автоматы и кнопки управления, элементы взаимосвязи и взаимной блокировки аппаратов.

При изображении схем принято считать все электрические цепи разомкнутыми («обесточенными»). Полагая такое изображение в схеме нормальным, приняты названия контактов: замыкающие — разомкнутых, когда катушка аппарата не получает питания, и размыкающие — размыкающихся при питании катушки током, достаточным для действия электромагнита аппарата.

В современном локомотивном парке имеется много различных тепловозов с электрической передачей, а следовательно, существует много разновидностей схем. Невозможно рассмотреть здесь все схемы.

В компоновке силовой цепи и цепи возбуждения (регулирования) тягового генератора тепловоза имеется ряд общих принципиальных решений (см. гл. 1). Все тяговые двигатели соединены параллельно. Предусмотрены две ступени ослабления возбуждения двигателей. Узел возбуждения генератора решается по одной из трех функциональных схем, приведенных на рис. 20.

Существенное развитие в схемах тепловозов, выполненных по одной и той же функциональной схеме, вносит исполнение операций регулирования и защиты различными техническими средствами.

Повторять в этой книге все схемы невозможно, но и не нужно, так как по каждой из серий тепловозов имеется специальная литература [6, 8, 15, 16].

Схема тепловоза 2ТЭ10В является усовершенствованием и развитием схемы 2ТЭ10Л. Она приведена как пример современного выполнения схемы электрической передачи на постоянном токе с регулированием возбуждения генератора через амплистат, т. е. в соответствии с функциональной схемой (см. рис. 20, б).

Схема тепловоза 2ТЭ116 (рис. 147, см. вкладку) представляет развитие схемы переменного-постоянного тока, осуществленной впервые на ТЭ109 в соответствии с функциональной схемой (см. рис. 20, в). Как иллюстрация схемы тепловоза с передачей переменного тока приведена принципиальная схема маневрового тепловоза ВМЭ1А-024, разработанная и осуществленная силами ЛИИЖТа и депо Варшавское Октябрьской дороги. На основании этой схемы созданы и схемы тепловозов Ворошиловградского тепловозостроительного завода. Во всех современных схемах регулирование «аппаратное».

### 38. СИЛОВАЯ ЦЕПЬ

Схема силовой цепи на всех современных тепловозах с передачей постоянного и переменного-постоянного тока по существу одинакова (см. рис. 146, 147). Все тяговые двигатели соединены между собой параллельно, переключение двигателей, как было на тепловозах до ТЭЗ, не применяется. Применяются две ступени (*ОП1* и *ОП2*) ослабления возбуждения, осуществляемого групповыми контакторами *ВШ*. Число тяговых двигателей на магистральных тепловозах 6. На маневровом ТЭМ7, имеющем 8 осей, вследствие требования меньшей нагрузки на ось маневрового и промышленного локомотивов, число тяговых двигателей 8, т. е. все оси тепловозов различного назначения являются ведущими. Двигатели включаются поездными контакторами *П* с дугогашением (см. гл. 4).

На схеме (см. рис. 146) изображена силовая цепь тепловоза ТЭ10В до введения современного решения системы защиты от боксования [15]. Здесь катушки трех реле боксования *РБ1—РБ3* включены между якорями тяговых двигателей попарно. Катушки *РБ* подключаются через блок-контакты поездных контакторов *П*, что обеспечивает изменение комбинаций включения *РБ* при неисправности какого-нибудь из двигателей.

Отбор сигнала по току нагрузки генератора с 1970 г. для предотвращения подачи сигнала в систему регулирования генератора по току боксующей оси производится посредством нескольких трансформаторов постоянного тока ТПТ с выделением наиболее «сильного» сигнала через группу выпрямительных мостиков *В1—2—3—6*. Такой отбор обеспечивает *динамическую жесткость* характеристики генератора. До этого в схемах тепловозов с регулированием через амплистат отбор производился одним ТПТ (ТЭ10, ТЭП60).

При защите по схеме (см. рис. 146) происходит ввод дополнительного резистора в цепь задающей обмотки амплистата. Это обеспечивается размыкающими контактами реле *РУ5*, катушка которого получает питание при замыкании контактов любого *РБ*. Одна пара замыкающих контактов реле *РБ* включает сигнал боксования на пульте машиниста, вторая пара подводит питание на катушку реле времени *РВ4*. Замыкающие с выдержкой времени на размыкание контакты этого реле подводят питание на катушку дополнительного вентиля *МР5*, который обеспечивает подачу воздуха под поршень приставки объединенного регулятора. Движением этого поршня вверх достигается уменьшение тока в регулировочной обмотке, что также способствует уменьшению напряжения генератора при боксовании. Кроме того, такие же три контакта *РВ4* с выдержкой на размыкание закорачивают резистор *СО4* в цепи обмотки управления *ОУ*, чем увеличивается ее размагничивающее действие. Восстановление нормального питания *ОУ* и *ОР* происходит через 1,5 с после прекращения боксования, т. е. разрыва цепи *РУ5*.

На тепловозе ТЭ10Л (В) также обеспечиваются «жесткие» статические характеристики генератора на семи низших позициях управления для реализации большой силы тяги при трогании поезда с места и движении с низкой скоростью.

Реализацию всех операций перестройки характеристик можно видеть в схеме узла возбуждения и регулирования. Ослабление возбуждения тяговых двигателей осуществляется включением резисторов *СШ1—6* параллельно их обмоткам возбуждения. Групповые контакторы ослабления возбуждения *ВШ1* и *ВШ2* замыкаются при срабатывании реле переходов *РП1* и *РП2*.

Включающие катушки *РП* питаются током, пропорциональным напряжению генератора, ток в выключающих катушках пропорционален току нагрузки генератора.

В цепях катушек напряжения реле переходов имеется ряд блокировок. Так, например: замыкающие контакты *ВШ1* в цепи *РП2* предотвращают замыкание этого реле, т. е. осуществление второй ступени ослабления возбуждения, если не была включена первая ступень. Замыкающие блок-контакты *РУ4*, которое получает питание на позициях управления 1—4, осуществляют перестройку резисторов катушек для увеличения сопротивления с переходом на высшие позиции. Резисторы перестраиваются еще и собственными размыкающими блок-контактами реле *ВШ1* и *ВШ2*. «Токовые» катушки реле включены неизменно. На этой же схеме можно видеть включение реле заземления *РЗ* от зажима шунта амперметра на землю через резистор *СРЗ* при замкнутом рубильнике *ВРЗ*.

Отличительной особенностью в схеме современных тепловозов является новое решение и выполнение защиты от боксования. К изменению схемы защиты привели длительные наблюдения за работой рассмотренной системы. Так, например: при одновременном боксовании колесных пар двух тяговых двигателей, на которые включена катушка *РБ*, реле не срабатывает, т. е. не совершает действий для ограничения напряжения генератора и для включения сигнала о боксовании на пульте машиниста. Имели место случаи, когда при повреждении тягового двигателя без переброски дуги на корпус реле заземления не включалось, а срабатывало реле боксования. Объективных признаков для выявления неисправного двигателя в пути нет и может быть отключен двигатель исправный. Практически тепловоз будет работать без двух тяговых двигателей, следствием чего явится значительная перегрузка, а следовательно, возможность повреждения оставшихся двигателей.

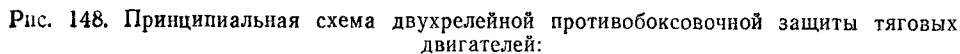
Принципиальная схема двухрелейной защиты для тепловоза ТЭ10В приведена на рис. 148. Два реле боксования *РБ1* и *РБ2* реагируют на боксование через полупроводниковый мост *БДС*. Каждое из шести плеч моста подключается замыкающими блок-контактами поездных контакторов *П1—П6* на соответствующий тяговый двигатель.

Действие системы можно проследить на конкретном примере. Предположим боксование первой колесной пары. Потенциал в точке присоединения провода *1101* к тяговому двигателю 1 резко уменьшается. От точки с большим потенциалом, т. е. от двигателя любой небоксующей оси образуется цепь на катушку реле боксования *РБ1*. Например, от двигателя 6 от точки присоединения провода *1127* через замкнутый блок-контакт *П6*, провод *1319*, нижний диод четвертого плеча, провод *1323*, катушку *РБ1*, провод *1104*, резистор *СРБ1*, провод *1320*, верхний диод 3-го плеча, блок-контакт *П* и провод *1101* на двигатель 1. Через замыкающий контакт *РБ1* между проводами *1036* и *1037* собирается цепь питания *РУ17*.

Это реле имеет несколько пар контактов. Его замыкающие контакты между проводами *1038* и *1039* обеспечивают питание катушки реле времени *РВ4*, размыкающие контакты которого разрывают цепь питания контакторов *ВШ1* и *ВШ2*. Предотвращается работа двигателей с ослабленным возбуждением. Вторая пара размыкающих контактов *РВ4* управляет резистором в цепи *ОЗ*. Замыкающие контакты *РУ17* собирают цепь питания катушки вентиля регулятора *МР5* (см. рис. 146).

Действием *МР5* сердечник индуктивного датчика *ИД* (см. узел возбуждения генератора) ставится в положение увеличенного сопротивления; ток питания регулировочной обмотки амплистата уменьшается. Размыкающие контакты *РУ17* между проводами *1139* и *1042* вводят резистор *СШ* — ток питания задающей обмотки также уменьшается. Уменьшение тока в двух намагничивающих обмотках амплистата приводит к уменьшению тока в его рабочей обмотке, а значит в обмотке возбуждения генератора. Напряжение генератора уменьшается. В схемах с машинным регулированием и в первых схемах

В рассматриваемой схеме, если замкнуты контакты *ВШ1* и *ВШ2*, т. е. боксование возникает при работе двигателя с ослабленным возбуждением, получает питание катушка *РУ16*. Его контактами между проводами *1120* и *1121* обеспечивается шунтирование резисторов *СРБ2* и *СРБ3*, т. е. уменьшение сопротивления цепи питания катушки *РБ2*. В итоге — при боксовании, возникающем при работе двигателей с ослабленным возбуждением, включается *РБ2*. Его замыкающие контакты собирают цепи питания катушек реле *РУ5* и *РВ5*. Замыкающие контакты *РУ5* собирают цепь питания *РУ17*. Происходят все описанные ранее действия. Кроме того, замыкающие контакты *РУ5* собирают цепи звукового сигнала и лампы «сброс нагрузки» на пульте машиниста.



179

Реле времени *РВ5* через замыкающие контакты выводит часть сопротивления *СОУ* в цепи управляющей обмотки амплистата. Эта обмотка размагничивающая, следовательно, выходной ток амплистата, т. е. ток возбуждения генератора, уменьшается. Если боксование продолжается, включается *РБ2*.

В схемах тепловозов ТЭ116 и ТЭМ7, где регулирование генератора осуществляется через селективный узел (см. схемы рис. 147), описанными действиями аппаратов при боксовании проводятся перестройки резисторов в цепях потенциометра задания селективного узла. Восстановление напряжения так же, как в схемах с тремя *РБ* (см. рис. 146), происходит с выдержкой времени.

При усовершенствованной системе защиты от боксования достигается: двухступенчатая (через *РБ1* и *РБ2*) защита двигателей при работе на полном возбуждении и одноступенчатая, но при высокой чувствительности *РБ2*, если двигатели работают с ослабленным возбуждением. «Звонковая» работа системы исключается благодаря участию в переключениях реле времени. Необходимо отметить, что при слабом боксовании оно может прекратиться и без действия *РБ* за счет динамической жесткости характеристики генератора.

На тепловозах ТЭ10Л, ТЭ10В, ТЭ116 защита от боксования получила дополнительное усовершенствование. Отбор сигналов боксования по току производится от всех двигателей: выделенный максимальный сигнал поступает в блок боксования, действиями которого обеспечивается уменьшение напряжения генератора.

### 39. СХЕМЫ УЗЛОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРА

**Узел возбуждения генератора тепловоза ТЭ10Л (В).** Схема узла возбуждения (см. рис. 146) генератора ГП315Б мощностью 2000 кВт тепловоза ТЭ10Л (В) относится к системам аппаратного регулирования с использованием магнитных усилителей (см. гл. 1). Обмотка возбуждения генератора *Н—НН* питается от возбудителя *В* при замыкании контактов контактора *ВВ*. Здесь регулирование перенесено с генератора на его возбудитель, т. е. схема «каскадная». В связи с этим в узле возбуждения имеется еще и «подвозбудитель» *СПВ*.

Возбудитель В-600 — генератор независимого возбуждения мощностью 20,6 кВт имеет две обмотки возбуждения. *Намагничивающая обмотка Н1—НН1* получает питание от «подвозбудителя» *СПВ* через амплистат *АВ*. *Размагничивающая обмотка Н2—НН2* при нормальной работе системы обеспечивает получение минимального напряжения возбудителя, а следовательно, и генератора при трогании тепловоза с места. Она получает питание от вспомогательного генератора через контакты контактора *ВВ*, провод 405, «нормальные» контакты аварийного переключателя, провода 460, 461, 467, 466, резистор *СВВ* и провод 458, присоединенный через штепсельные разъемы 2—20 и 2—22 к общему минусу 3/1 ÷ 9 системы питания вспомогательных нужд постоянным током напряжения 75 В.

В системе амплистата *АВ*, от выходных зажимов которого 2—1 получает питание обмотка *Н1—НН1*, осуществляется автоматическое регулирование возбудителя *В*, а значит, и генератора *Г*. Рабочие обмотки амплистата получают питание от *СПВ*. Это однофазный синхронный генератор ГС500 (см. гл. 4). Рабочие обмотки *АВ* включены на зажимы *Н1—О1* первичной обмотки распределительного трансформатора *Тр* с напряжением 60 В на высшей позиции. В систему *АВ* входит блок выпрямителей *ВВ*, которые выполняют также роль внутренней обратной связи *АВ*.

Характеристика возбудителя *В* формируется действием трех обмоток управления амплистата возбуждения. *Задающая обмотка ОЗ* устанавливает

уровень напряжения возбудителя, а значит, и главного генератора для каждой позиции контроллера, т. е. при разной частоте вращения вала дизеля. Обмотка получает питание от тахометрического частотного датчика *БТ* (см. гл. 5 и 7) через группу резисторов *СОЗ*. Включение и выключение этих резисторов, т. е. перестройка режима питания *ОЗ* и в итоге уровня напряжения тягового генератора производятся посредством нескольких аппаратов, состояние которых зависит от режима управления тепловозом и от состояния энергетической цепи. Замыкающими контактами реле *РУЗ*, катушка которого получает питание на позициях 2—15, достигается увеличенное сопротивление, а значит, уменьшенный ток *ОЗ* для ограничения напряжения генератора на первой позиции контроллера.

Сопротивление в цепи *ОЗ* изменяется, кроме того, замыкающими контактами реле *РУ10*, катушка которого получает питание на позициях 4—15. Основная роль этого реле — включение регулировочной обмотки *ОР*. Расчетom и опытом установлена необходимость некоторого усиления действия «задающей» обмотки.

Значительная часть *СОЗ* вводится при размыкании ножевых выключателей *ОМ*, т. е. при выключении из силовой цепи неисправного тягового двигателя, так как при уменьшенном числе работающих двигателей необходимо понижение напряжения генератора. При боксовании контактами *РВ4* вводится дополнительный резистор *ССН*.

На тепловозах ранних выпусков питание *ОЗ* осуществлялось от тахогенератора, напряжение которого пропорционально частоте вращения вала. Режим *ОЗ* устанавливается изменением сопротивления в цепи обмотки возбуждения тахогенератора.

Обмотка управления *ОУ* размагничивающая. Она получает сигналы по току нагрузки генератора (в рассматриваемой схеме по току тяговых двигателей) и по его напряжению от магнитных усилителей *ТПТ* и *ТПН* через селективный узел, в который входят: выпрямительные мосты сигналов по току *В1—В3* и *В6* (см. рис. 146) и по напряжению *В4*, балластные резисторы *СБТТ* и *СБТН*, вентили *В5* и *В7* и реле управления *РУ15*, катушка которого получает питание на позициях 8—15. Путь тока в обмотку управления *ОУ* довольно сложен и в некоторых частях различен на «ходовых» и на «разгоночных» позициях.

Сигнал по току поступает от того из *ТПТ*, который реагирует на ток двигателей не боксующих в данный момент колесных пар. Выделение наибольшего сигнала по току происходит в группе вентиляей. Например, если наибольший сигнал идет от *ТПТ4*, он проходит через провод 1082 на мост *В6* и далее по мостам *В1—В3*, запирая сигналы остальных *ТПТ*. Выделенный сигнал наибольшего тока (от любого *ТПТ*) выходит к точке *Б2*. От точки *Б3* комбинированный сигнал по току и по напряжению поступает по проводам 1097, 1099 и через резистор *СОУ* к зажиму *КУ* обмотки управления *ОУ* амплитата. Зажим *НУ* обмотки присоединен проводом 110 к проводу 1137 между резисторами *СБТТ* и *СБТН*. Между точками *Б2* и *Б3* путь тока различен на ходовых и разгоночных позициях.

На ходовых позициях происходит ограничение тока и напряжения генератора. К точке *Б3* подходит сигнал по току через вентиль *В5* от точки *Б2* и по напряжению через вентиль *В7* от моста *В4*, где происходит выпрямление сигнала, идущего от *ТПН* по проводу 1094 (второй конец обмотки *ТПН* присоединен проводом 1091 к зажиму *Н5* вторичной обмотки распределительного трансформатора).

На «разгоночных» позициях контакты *РУ15* замкнуты и шунтируют вентиль *В7* и мост *В4*. Резистор *СБТН* оказывается включенным параллельно *СБТТ* в цепь сигнала по току. Падение напряжения на *ОУ* значительно умень-

шается и ток в обмотке управления становится столь малым, что ограничение по току практически отсутствует. Это способствует развитию большой силы тяги при разгоне тепловоза. При легких условиях работы, т. е. при малой силе тока, сигнал от *ТПН* ограничивает напряжение тягового генератора.

Регулировочная обмотка *ОР* действует согласно с задающей обмоткой *й*; ток в *ОР*, а следовательно, ее м. д. с. зависит от нагрузки дизеля. При его перегрузке ток в *ОР* уменьшается настолько, чтобы совместное действие обмоток *ОЗ*, *ОУ* и *ОР* обеспечивало возбуждение генератора, при котором его напряжение отвечает условию  $UI = idem$ .

Обмотка *ОР* объединяет регулирование генератора и дизеля. В цепь *ОР* включен элемент, сопротивление которого зависит от положения силового поршня регулятора дизеля, — индуктивный датчик *ИД* (см. гл. 5). Питание катушки *ИД* происходит от зажимов *01* и *02* первичной обмотки распределительного трансформатора *Тр*. По пути в обмотку *ОР* ток выпрямляется мостиком *БВ*. Эта цепь собирается замыкающими контактами реле *РУ10*, соединяющими провода *412* и *415*.

Четвертая обмотка управления амплитата *ОС* выполняет роль, не относящуюся к формированию внешней характеристики генератора. Она включена на вторичную обмотку «стабилизирующего» трансформатора *СТР*. Первичная обмотка *СТР* включена через резистор на напряжение возбудителя. Во вторичной обмотке *СТР* э. д. с. наводится только при колебаниях напряжения *В*, что имеет место при переходных режимах, которые могут возникать например, при резком снижении («сбросе») или повышении («набросе») частоты вращения вала дизеля при переключении позиций.

На тепловозе 2ТЭ10В и на других с такой же системой регулирования генератора предусмотрена схема «аварийного» возбуждения, позволяющего локомотиву продолжать движение при неисправностях в цепях нормального возбуждения. При аварийной работе возбуждение возбудителя осуществляется от вспомогательного генератора. При этом размыкается внешняя цепь *САВ* — лишаются питания рабочие обмотки амплитата возбуждения *АВ* и обмотки управления *ТПТ* и *ТПН*. Одновременно изменяется направление тока в обмотке возбуждения *Н2—НН2*, которая в этих условиях становится единственной обмоткой независимого возбуждения возбудителя.

Характеристика возбудителя, а значит, и тягового генератора становится «жесткой» (рис. 149), при работе на 15-й позиции при токе  $>4000$  А наступает перегрузка дизеля. В аварийной схеме ограничения тока не предусмотрено, наблюдение за нагрузкой и ее ограничение целиком ложится на машиниста.

Для плавного трогания с места в цепи обмотки *Н2—НН2* в аварийном режиме предусмотрены две ступени сопротивления резистора *СВВ*: управляемые *РУ8* (2-я позиция) и *РУ10* (4-я позиция).

Узел возбуждения генератора тепловозов с передачей переменного тока. Схема узла возбуждения тягового генератора тепловозов ТЭ116, ТЭМ7 и других тепловозов с передачей переменного тока, изображенная упрощенно на рис. 150, соответ-

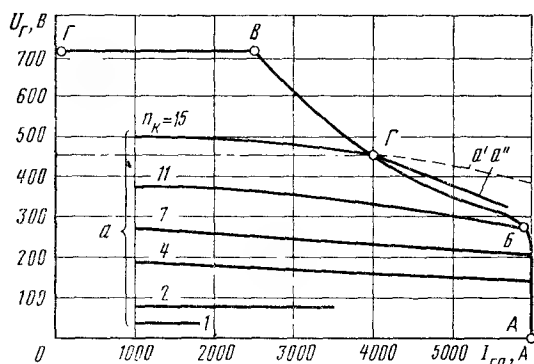


Рис. 149. Внешняя характеристика генератора тепловоза ТЭ10В:

*АВВГ* — при нормальном возбуждении; *а* — при «аварийном»

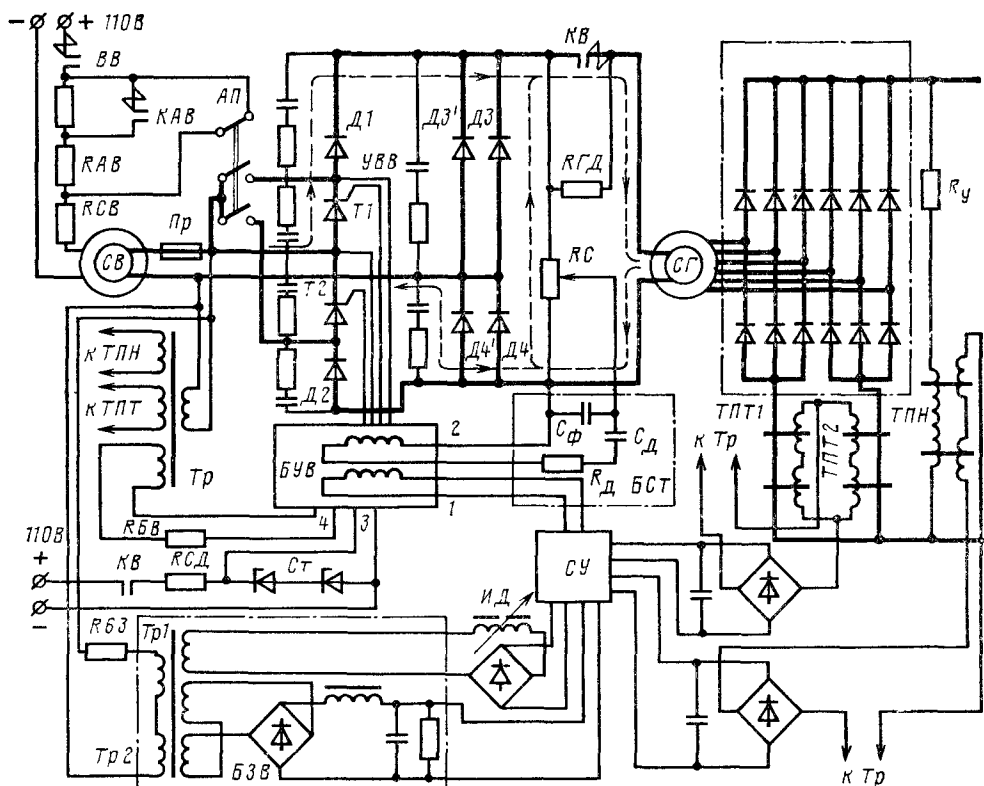


Рис. 150. Принципиальная схема узла возбуждения генератора при передаче переменного тока

ует принципиальной схеме регулирования тепловозного генератора переменного тока.

Силовая цепь этих тепловозов не рассматривается, так как она идентична на всех современных локомотивах как в отношении соединения тяговых электродвигателей, так и по способам и средствам их регулирования и защиты (см. рис. 146, 147). Тяговые двигатели питаются от синхронного генератора через выпрямитель, представляющий собой два параллельно соединенных трехфазных моста, составленных из вентилей ВКД2 (см. гл. 5). Обмотка возбуждения генератора получает питание от возбудителя СВ однофазного синхронного генератора.

Выпрямление тока возбуждения и его регулирование для получения гиперболической характеристики генератора СГ осуществляются посредством управляемого выпрямительного моста УВВ. В два плеча моста включены тиристоры Т1 и Т2; остальные вентили Д1÷Д2 — неуправляемые кремниевые диоды. Диоды защищены от перенапряжений цепочкой Р—С.

Сигналы импульсного широтного управления тиристорами подаются из блока БУВ (см. гл. 6). Управление заключается в сдвиге моментов открытия тиристоров в соответствии с программой управления, формируемой в селективном узле. Если оба тиристора закрыты, напряжения на выходе нет. В некоторый момент времени, характеризуемый углом зажигания (открытия)  $\alpha$ , с блока управления БУВ на тиристор Т1 поступает управляющий импульс — тиристор открывается. На выходе моста появляется напряжение. В отрицательный полупериод питающего напряжения тиристор Т1 закрыт, ток проходит через тиристор Т2 (см. гл. 6, 7).

В итоге на вход обмотки возбуждения генератора подается пульсирующее напряжение, среднее значение которого, а значит, и тока в обмотке возбуждения  $СГ$  зависит от момента подачи управляющего импульса, т. е. от «угла зажигания»  $\alpha$ . Изменяя действием БУВ значение  $\alpha$  от некоторого минимального угла до  $180^\circ$ , можно изменять ток возбуждения тягового генератора от максимума до нуля. Ток в обмотке возбуждения сглаживается вследствие значительной ее индуктивности. Когда оба тиристора закрыты, ток замыкается через диоды, как показано штриховой линией на рис. 150.

Включение последовательно с тиристорами  $T1$  и  $T2$  неуправляемых диодов  $D1$  и  $D2$  обеспечивает питание возбуждения генератора при неисправности тириستоров или узла их управления. В таких условиях система переводится в режим аварийного возбуждения. Внешняя характеристика — выпуклая, крутопадающая. Дублирование диодов  $D3$  и  $D4$  сделано из-за возможности значительных «толчков» тока в обмотке возбуждения  $СГ$  при внезапном коротком замыкании в цепи статора. Блоки системы регулирования БУВ и СУ содержат много различных аппаратов, поэтому, кроме изображения их на рис. 150, они рассматриваются более подробно каждый в отдельности.

На схеме рис. 150 можно видеть, что БУВ имеет четыре входные цепи и две выходные. По выходным цепям подаются импульсы управления на тиристоры  $T1$  и  $T2$ .

Входными цепями являются: 1) цепь управления, по которой в БУВ поступает сигнал управления тиристорами, сформированный в селективном узле СУ; 2) цепь стабилизации, осуществляющая обратную связь по выходному напряжению УВМ, для предотвращения колебательного режима системы (как стабилизирующей обмотки управления на тепловозах с амплистатом возбуждения); 3) цепь питания от источника постоянного тока  $100\text{ В}^1$ . В эту цепь, включаемую замыкающими блок-контактами контактора  $КВ$ , введены стабилизаторы  $СТ$  через резистор  $РСД$ ; в блок управления поступает напряжение постоянного тока  $13,5\text{ В}$  для питания транзисторов; 4) цепь питания переменного тока от распределительного трансформатора  $Тр$  через резистор  $РБВ$ .

В схеме (рис. 151) можно выделить три узла БУВ: преобразователя напряжения  $П$ , магнитного усилителя  $МУ$  и блокинг-генераторов  $БГ1$  и  $БГ2$ . Основными элементами преобразователя  $П$  являются два стабилизатора, блокинг-генератор на германиевых триодах (транзисторах) и трансформатор с насыщающимся сердечником. Магнитный усилитель  $МУ$  обеспечивает сдвиг управляющих импульсов. Сигнал управления  $i_y$  из селективного узла является током управления  $МУ$ . Рабочая обмотка  $МУ$  питается от преобразователя напряжения  $П$ . Напряжение на выходе магнитного усилителя  $U_{му}$  зависит от тока управления  $i_y$ . Передний фронт напряжения, которым определяется момент подачи управляющего импульса на УВМ, перемещается в зависимости от величины  $i_y$ .

Диод  $D_{ог}$  служит для ограничения тока управления. Он запирает цепь питания обмотки управления  $МУ$  и направляет ток от селективного узла по обходной цепи через  $R_{ог}$ , если  $i_y \geq i_{ог}$ , где  $i_{ог}$  — ток от трансформатора узла  $П$ , равный максимально допустимому току обмотки управления  $МУ$ . Блокинг-генераторы  $БГ1$  и  $БГ2$  вырабатывают управляющие импульсы. Каждый из них дает импульс для одного полупериода питающего напряжения, т. е. для одного из тиристоров  $T1$  и  $T2$ . Сигналом для действия  $БГ$  является импульс тока через конденсатор  $С$  в виде «скачка» напряжения  $U_{му}$ . Управляющие им-

<sup>1</sup> Для питания вспомогательных цепей на современных тепловозах принято напряжение  $100\text{ В}$  вместо  $75\text{ В}$ .

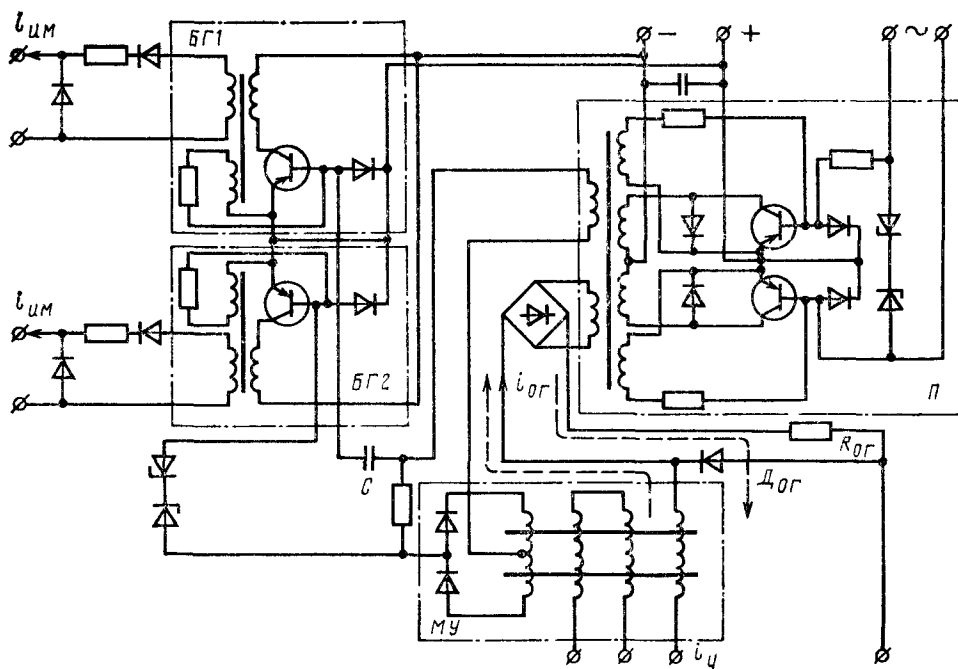


Рис. 151. Схема блока управления тиристорами (БУВ)

пульсы на выходе  $БГ$  имеют прямоугольную форму. Длительность импульса определяет значение  $\alpha$ , а в итоге — напряжение на выходе  $УВВ$ .

Стабилитроны в цепи конденсатора  $C$  предотвращают ложное действие блокинг-генераторов от напряжения холостого хода магнитного усилителя и от напряжения конденсатора, когда он приобретает заряд.

Как видно из произведенного разбора, роль блока управления выпрямителя (БУВ) заключается в формировании импульса и подаче его на цепи управления тиристоров  $T1$  и  $T2$  в очередности, определяемой напряжением (знаком) полувольты переменного тока с длительностью, определяемой состоянием энергетической цепи, отраженным величиной тока управления  $i_y$ , поступающего из селективного узла  $СУ$ . В этом узле происходит дозировка сигналов состояния энергетической цепи, при которой величина тока управления магнитного усилителя в блоке управления возбуждением обеспечивает такие интервалы импульсов управления тиристорами  $T1$  и  $T2$ , а значит, и интервалы открытия тиристоров, чтобы напряжение, подаваемое на возбуждение главного генератора  $СГ$ , соответствовало его работе по закону  $U_r I_r = idem$ .

Упрощенная схема селективного узла и связь его с блоком управления выпрямителями БУВ, представленная на рис. 152, позволяет рассмотреть этот узел в системах тепловозов 2ТЭ116 и ТЭМ7. В системе образуются три канала регулирования возбуждения тягового генератора через  $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$ , действующих

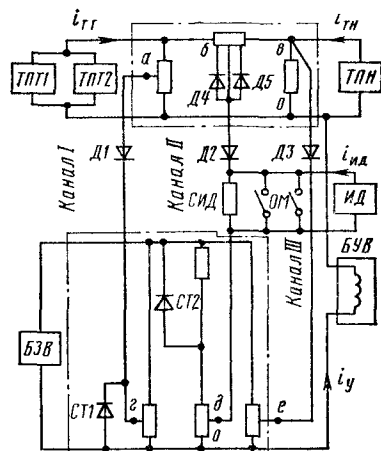


Рис. 152. Упрощенная схема селективного узла

в разных зонах нагрузки генератора и дизеля (как и сигналы регулирования режима амплистата возбуждения в системе тепловоза 2ТЭ10В и др.). В отличие от роли селективного узла на тепловозах с регулированием через амплистат, где СУ осуществляет дозировку сигналов по напряжению генератора и по току его нагрузки, СУ здесь формирует *сумму всех сигналов*.

Сигнал управления, поступающий на обмотку управления магнитного усилителя в БУВ, снимается с потенциометров: *a* и *ов* обратных связей по току и по напряжению генератора через ТПТ<sup>1</sup> и ТПН; *г*, *д*, *е* — уставки задания, т. е. уровня напряжения через тахометрический датчик БЗВ; СИД — связь по режиму нагрузки дизеля через индуктивный датчик ИД.

Очередность поступления в БУВ сигналов по току и напряжению генератора определяется состоянием каналов *I*, *II* и *III*. Через канал *I* поддерживается примерно постоянным максимальный ток генератора; через канал *III* — максимальное напряжение. При действии канала *II*, т. е. при поступлении сигналов по току и по напряжению генератора, формируется средняя часть внешней характеристики синхронного генератора СГ. В канал *II* включен потенциометр СИД индуктивного датчика. Действием снимаемого с него сигнала, характеризующего режим нагрузки дизеля, внешняя характеристика генератора располагается около прямых *БВ* и *Б"В"* по кривой гиперболического вида *Б'В'* (см. рис. 22).

Действием БЗВ определяется уровень внешней характеристики генератора на разных позициях управления дизелем. В блоке задания возбуждения происходят и перестройки режима возбуждения тягового генератора в зависимости от состояния энергетической цепи тепловоза, так же как в системах регулирования через амплистат — в цепи задающей обмотки его управления (посмотрите схему возбуждения ТЭ10В).

На первой позиции управления замыкающими контактами РУ8 вводится резистор «плавного трогания». При срабатывании реле боксования вводится дополнительный резистор замыкающими контактами РУ11. При отключении одного из *n* тяговых двигателей мощность генератора уменьшается примерно на  $1/n$  за счет закорачивания резистора СИД «обратными» ножами ОМ. При отсутствии нагрузки тягового генератора на тепловозах, где от него получают питание двигатели вспомогательных агрегатов, вводится дополнительный резистор замыкающими контактами РУ5. Напряжение генератора снижается до необходимого для питания агрегатов собственных нужд  $\sim 550$  В. Стабилитрон СТ2 служит для ограничения мощности генератора на низших позициях управления. Подбором разделительных диодов Д1, Д2 и Д3, а также настройкой резисторов в узле потенциометра обратной связи и производится дозировка сигналов для получения заданного вида характеристики генератора.

В формировании характеристики (рис. 153) участвуют также и «корректирующие» диоды Д4 и Д5 (см. рис. 152), действием которых рабочая зона характеристики превращается в ломаную линию *БН1*, *Н1Н2*, *Н2В*, близкую к гиперболе  $UI = \text{const}$ ; без корректировки — это прямая *БВ*. Уставка характеристики по позициям управления дизелем производится через узел потенциометра задания, на который подается питание от тахометрического датчика БЗВ.

В образовании гиперболической части характеристики так же, как в схемах с регулированием через амплистат, участвует индуктивный датчик ИД, представляющий связь по частоте вращения вала дизеля. Сигнал от ИД реализуется при работе СУ на канале *II* через резистор *Р33*. При отключении какого-нибудь двигателя и при аварийных режимах эта связь исключается посредством замыкания одного из *ТБ*.

<sup>1</sup> На современных тепловозах устанавливается три или четыре ТПТ.

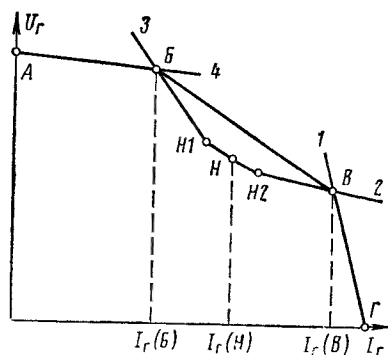


Рис. 153. Селективная характеристика

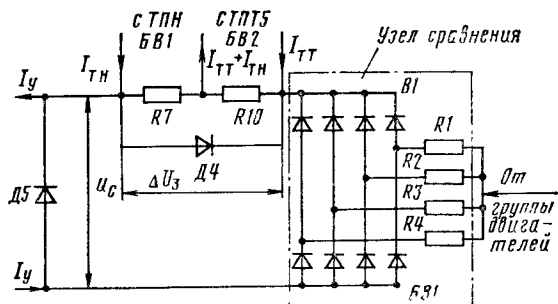


Рис. 154. Принципиальная схема защиты от боксования тепловоза ТЭМ7

В узле потенциометра задания  $СУ$  имеются резисторы для его настройки и для автоматических перестроек в определенных условиях. Так, например, при боксовании для снижения напряжения генератора действием  $РБ$  на входе задания вводится  $R$ . Для плавности разгона при трогании тепловоза с места на первой позиции управления в уставку канала  $II$  введено сопротивление  $R_{д.}$ . На всех остальных позициях оно выведено замыкающими контактами реле  $РУ18$ , катушка которого получает питание на всех позициях, кроме первой. Часть перестроек происходит посредством стабилизаторов (см. гл. 7). Так, например,  $СТ2$  служит для снижения селективной характеристики на низких позициях управления.

В схеме тепловоза ТЭМ7 включены различные аппараты автоматического управления и защиты силовой цепи. Так же, как в ранее рассмотренной схеме тепловоза ТЭ10В для ослабления возбуждения тяговых двигателей, осуществляемого групповыми контактами, служат два реле перехода  $РП1$  и  $РП2$ . Защита при пробое осуществляется реле заземления  $РЗ$ . Блок защиты от боксования осуществлен принципиально так, как рассмотрено на с. 119. Сигнал при боксовании получается через узел сравнения — блок  $БВ1$  — полупроводниковый мост, каждое из четырех плеч которого пропускает ток от двух тяговых двигателей.

Принципиальная схема обнаружения боксования приведена на рис. 154. Сигналы, пропорциональные токам групп двигателей, т. е. от  $ТПТ1—ТПТ4$ , выделяются по резисторам  $R1, R2, R3, R4$  и сравниваются между собой. При боксовании на выходе узла сравнения  $Б1$  (на рис. 154,  $БВ1$ ) выделяется сигнал рассогласования, встречно этому сигналу в схему включено напряжение  $\Delta U_{\Delta}$ , которое складывается из двух падений напряжения — первое выделяется на резисторе  $R7$  и пропорционально напряжению на выпрямительной установке, т. е. подаваемому в силовую цепь. Сигнал снимается с того же трансформатора постоянного напряжения  $ТПН$ , что и для системы регулирования возбуждения; второе выделяется на резисторе  $R10$  и пропорционально току нагрузки тягового генератора. Этот сигнал снимается с отдельного трансформатора постоянного тока  $ТПТ5$ .

В зависимости от сигнала рассогласования и значения встречного сигнала формируется сигнал управления, который подается на вход полупроводникового усилителя с релейной характеристикой ( $БУ$ ). Полупроводниковый усилитель срабатывает при напряжении  $\sim 3$  В и включает реле боксования  $РБ$ . При срабатывании реле включается сигнальная лампа «боксование» на основном и вспомогательном пультах, происходит отключение части топливных насосов дизеля (включается вентиль  $ВТН$ ), индуктивный датчик становится в по-

ложение минимального возбуждения (включается электромагнит *ВУИД*), отключается контактор аварийного возбуждения *КАВ* и в цепь возбуждения возбuditеля вводится добавочный резистор.

При возникновении боксования на полном возбуждении контакторы ослабления возбуждения не могут включиться, так как цепь питания их катушек размыкается размыкающим контактом *РБ*. При боксовании дополнительно к этим воздействиям происходит изменение сигнала уставки в цепи задания возбуждения путем введения добавочного резистора в цепь потенциометра задания (между зажимами *Р1* и *Р2*) резистора *Р<sub>6</sub>*.

Схема обнаружения боксования имеет переменную чувствительность за счет изменения встречного сигнала  $\Delta U_a$ , пропорционального сумме сигналов по току и напряжению. Отключение реле боксования происходит после прекращения боксования, когда сигнал на выходе полупроводникового усилителя *БУ* станет меньше 2 В. При отключении одного из двигателей, входящих в общий канал измерения тока, сигнал соответствующей пары двигателей в узел сравнения не подается.

Узлы регулирования возбуждения генератора на тепловозах ТЭ116 и ТЭМ7 принципиально одинаковы.

#### 40. УЗЛЫ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

**Общие положения.** Цепи управления следует рассматривать, изучив или изучая силовые и вспомогательные узлы, так как понимание операций управления возможно лишь при знании его целей и средств, которые обусловлены устройством, состоянием и действием управляемых узлов и агрегатов, их взаимосвязью и взаимодействием. Отдельные узлы управления рассматривают на принципиальных схемах (например, рис. 146).

На модернизированных тепловозах 2ТЭ10В в схему внесены следующие основные изменения. Для включения электродвигателя топливного насоса *ТН* взамен реле *РУЗ* установлен контактор *КТН*. Контакты реле *ТРВ*, *ТРМ* и *РДМ2* включены в цепь промежуточного реле *РУ2*, контакты которого находятся в цепи *КВ* и *ВВ*. Изменено подключение электромагнита *МР5* и вентиля *ВП6*, а также заменен ряд реле управления (*РУ5—РУ10*, *РУ12*, *РУ15*, *РУ17*, *РУ18*) на реле промышленной серии ТРПУ-1.

Управление тепловозом производится рукоятками контроллера и реверсора, кнопками и автоматами, расположенными на пульте управления. К аппаратам ручного управления относятся также рубильник аккумуляторной батареи *ВБ*, отключатели тяговых электродвигателей *ОМ*, выключатель реле переходов *УП* (см. гл. 5, 7). Основная операция управления заключается в изменении режима работы дизеля. При позиционном управлении дизелем весь диапазон управления разбит на ступени (на маневровых тепловозах 6—8; на магистральных 15—16). На разных ступенях или позициях включаются в разных комбинациях магниты регулятора (топливные вентили), обеспечивая различную затяжку режимной пружины регулятора; а следовательно, различную подачу топлива в цилиндры: от минимальной — при холостом ходе и на первых позициях до максимальной — на последней позиции управления. Одновременно с включением вентилях включаются и некоторые из реле управления. Ряд аппаратов машинист включает при подготовке тепловоза к движению, и они остаются включенными все время его движения. К ним относятся: рубильник аккумуляторной батареи, кнопка или автомат включения двигателя топливоподкачивающего насоса.

При движении тепловоза, кроме того, включены: кнопка или автомат «управления машинами» (управление тепловозом), выключатель реле переходов, кнопка или автомат «управление общее», отключатели тяговых двигателей (вы-

ключаемые на перегоне лишь при необходимости отключения неисправного двигателя, для чего необходимо остановить поезд). Рукоятка реверсора устанавливается в ходовое положение «вперед» или «назад» и остается в таком положении до необходимости изменения направления движения. После остановки тепловоза реверсор переводится в нулевое положение.

Рассматривая цепи и узлы управления, можно видеть взаимосвязь ряда аппаратов, обеспечивающую автоматическое управление тем или иным процессом, например пуском дизеля, и автоматическую защиту элементов энергетической цепи.

Кроме упомянутых аппаратов управления силовой и вспомогательных цепей, имеются еще аппараты сигналов тепловоза, его освещения, вентиляции и обогрева, а также аппараты связи с системой автоматической локомотивной сигнализации (АЛС).

**Цепи управления тепловоза 2ТЭ10Л(В).** Читать схему удобно слева направо. В принятых сейчас изображениях левые концы проводов присоединяют к положительному зажиму источника питания, которым является при пуске дизеля и при работе на аварийном режиме аккумуляторная батарея, при нормальном движении тепловоза — вспомогательный генератор. Правые концы проводов присоединены к отрицательному зажиму.

**Управление пуском дизеля.** Для пуска дизеля необходимы два условия: создание в цилиндре давления воздуха, при котором его температура достаточна для воспламенения топлива; ввод топлива в цилиндры осуществляется включением блокировочного магнита регулятора (электротяговый магнит) при наличии топлива в коллекторе дизеля, т. е. при работе топливоподкачивающего насоса.

Пуск дизеля происходит при включенном рубильнике *АБ* при нулевых положениях главной и реверсивной рукояток контроллера и открытом пульте управления, при включении автоматов 45 и 46 (выключение топливных насосов первой или второй секции или одновременно обеих). Через контакты *КЗ* и размыкающие контакты *РУЗ* собирается цепь питания двигателей топливоподкачивающего насоса *ТН* (см. развертку контроллера на рис. 146). Начинается подача топлива. Две другие цепи: катушки «ускорителя пуска» *ВП7* и электромагнита регулятора *ЭТ* соберутся после замыкания пусковых контактов *Д1* и *Д2*, так как топливо можно вводить в цилиндры дизеля только после приведения его вала во вращение.

Когда избыточное давление топлива в коллекторе достигнет 0,2 МПа, машинист нажимает кнопку «Пуск дизеля». На нулевой позиции контроллера замыкается одна пара контактов (четвертая снизу), через которую собираются цепи питания катушек пусковых контакторов.

Эти цепи довольно сложны, так как при пуске ограничивается подача топлива в цилиндры и до приведения во вращение вала производится смазка дизеля. Масло поступает от маслопрокачивающего насоса, двигатель *МН* которого питается от аккумуляторной батареи при замыкании контактов контактора *КМН* (см. этот узел справа от общей группы цепей управления). Продолжительность прокачки масла выдерживается автоматически действием реле времени *РВ1*. Взаимное блокирование двух реле времени *РВ1* и *РВ2* и нескольких реле управления обеспечивает определенную последовательность всех операций пуска.

Непосредственно после замыкания кнопки «Пуск дизеля» получает питание катушка реле управления *РУ5* по цепи, собранной через замыкающие контакты *РУЗ* и размыкающие контакты *РУ9*. Контакты *РУ6* собирают цепь питания катушки *РВ1*. Одна пара контактов *РВ1* замыкается мгновенно и обеспечивает питание катушки *КМН* контактора маслопрокачивающего насоса. Контакты *КМН* собирают цепь питания двигателя *МН*; контакты *КМН* раз-

рывают цепь, шунтировавшую резистор в цепи катушки *PВ2* (для удержания реле требуется меньший ток, чем для его включения). Через установленную выдержку времени 90 с, необходимую для прокачки масла через систему смазки дизеля, размыкаются контакты *PВ1*, катушка *КМН* лишается питания, насос останавливается. Замыкающие контакты *PВ1* между проводами 2324 и 325 собирают цепь питания катушки пускового контактора *Д1* через контакты *PУ9*, размыкающие контакты контакторов *КМН* и *КВ*, замкнутые контакты концевого выключателя валоповоротного механизма 105 и далее по проводам 333 и 368.

Контакты *КМН* предотвращают включение *Д1* до завершения предварительной смазки дизеля, контакты *КВ* страхуют от возможности сбоя силовой цепи пуска при нормальной работе генератора, контакты 105 предотвращают включение цепи дизеля при его осмотре или ремонте, контакты *PУ9* предотвращают случайное включение цепи пуска при работающем дизеле.

Замыканием контактора *Д1* пусковая цепь генератора подключается к минусу аккумуляторной батареи. Контакты *Д1* собирают цепи питания двух контакторов *Д3*: «своего» через провод 250; второй секции через провода 249 и 50 и далее через межтепловозное соединение. Батареи соединены параллельно. Контакты *Д3* между проводами 246 и 245 собирают цепь питания контактора *Д2*.

Силовая цепь пуска собрана: генератор работает как стартерный двигатель последовательного возбуждения. После включения *Д1* и *Д2* контакты этих контакторов собирают цепи катушек подачи топлива в цилиндры; через контакты *Д1* получает питание тяговый электромагнит *ЭТ1*; контакты *Д2* включают катушку ускорителя пуска *ВП7*. По окончании пуска цепь *ЭТ1* держат контакты реле давления масла *РДМ1*, которые замыкаются при избыточном давлении в системе смазки более 0,06 МПа, и контакты реле *PУ8*, катушка которого получает питание при замыкании контактов *РДМ1*. При давлении менее 0,06 МПа цепь *ЭТ* разрывается, дизель останавливается.

Кроме этих средств защиты дизеля, предусмотрено включение катушки *PУ7*, а значит, остановки дизеля при нажатии аварийной кнопки *АК*, т.е. при обнаружении бригадой опасной ситуации любого происхождения. После срабатывания *PУ7* по любой причине его катушка получает питание через его замыкающие контакты между проводами 220 и 223. Для выключения реле приходится выключать рубильник батареи. Этим привлекается внимание машиниста к состоянию агрегатов тепловоза. Разбор работы схемы позволяет установить, что рассмотренный узел не только служит для пуска дизеля, но и обеспечивает его защиту при движении тепловоза.

*Управление при движении тепловоза.* При трогании с места и движении тепловоза необходимо собрать силовую цепь включением контакторов *П1—П6* и подать возбуждение на возбудитель *В* и тяговый генератор *Г* включением контакторов *ВВ* и *КВ*. В дополнение к включениям, произведенным для пуска дизеля, включаются: автомат 46 «управление тепловозом» и тумблер тяговых электродвигателей *ОМ1—ОМ6*.

Вал управления реверсором устанавливают в ходовое положение «вперед» или «назад». Вал управления контроллером переводят на 1-ю позицию. Силовые контакты реверсора *РР* включают обмотки возбуждения тяговых электродвигателей для питания в направлении, обусловленном направлением движения. При любом из ходовых положений реверсора через его блок-контакты после провода 104 или 106 собираются цепи катушек *ВВ* и *КВ*. В цепях этих аппаратов имеется ряд защитных блокировок, большинство из них — общие для *КВ* и *ВВ*.

В общую часть цепи включены размыкающие контакты пусковых контакторов *Д1* и *Д3* для предотвращения случайного собирания силовой цепи при 190

пуске дизеля. Далее следует *БД* — четыре контакта дверей каждой из двух аппаратных камер обеих секций тепловоза для обеспечения безопасности локомотивной бригады.

От размыкающих контактов реле заземления цепь идет через размыкающие контакты *РУ8*, шунтированные замыкающими контактами *КВ*. Соберется цепь через размыкающие контакты *РУ8*; на 2-й позиции контроллера катушки *РУ8* получает питание и эти контакты размыкаются, но так как *КВ* уже включен, цепь держат замыкающие контакты *КВ*. Такая блокировка сделана для обязательной установки контроллера на 1-ю позицию в случае размыкания *КВ* по любой причине.

Через замыкающие контакты реле давления в тормозной магистрали *РД* и контакты поездных контакторов цепь идет к разветвлению 4/2. Одна ветвь через замыкающие контакты *РУ4*, дублированные замыкающими контактами *РДМ2*, и через размыкающие контакты тепловых реле воды *ТРВ* и масла *ТРМ* подводит питание на катушку контактора *КВ*, вторая через замыкающие контакты *РУ9* — на катушку контактора *ВВ*.

Вспомнив функции аппаратов, контакты которых включены в цепи питания контакторов возбуждения, легко установить, что возбуждение генератора ограничивается при снижении избыточного давления в системе смазки (*РУ9*) на 0,06 МПа и снимается при заземлении в силовой цепи, снижении давления в системе смазки ниже 0,11 МПа (на позициях 12—15), при пониженном давлении в тормозной системе, перегреве воды или масла, нарушении бдительности машиниста и открытых дверях аппаратных камер.

Одновременно с включением катушек *ВВ* и *КВ* через провод 137 получает питание катушка реле времени *РВ3*; его контакты между проводами 181 и 178 собирают цепь питания катушек поездных контакторов *П1—П6* при включенных тумблерах тяговых двигателей *ОМ1—ОМ6*. Замыкание контактов *РВ3* происходит мгновенно; размыкание с выдержкой времени 2—3 с. Это сделано для того, чтобы поездные контакторы размыкались позже размыкания контакторов возбуждения.

На 1-й позиции контроллера сохраняется «нулевая», т. е. минимальная, подача топлива в цилиндры дизеля. Начиная со 2-й позиции, подача топлива увеличивается на каждом положении управления за счет включения магнитов регулятора (топливных вентилей) *МР1—МР4* в разных комбинациях. Это можно увидеть на развертке контроллера.

Одновременно с включением *МР1—МР4* получают питание катушки некоторых реле управления. На позициях 1—11 получает питание катушка *РУ4*, замыкающие контакты которой введены в цепь питания *КВ*. На позициях 4—15 включается *РУ10*, контакты которого замыкают цепь питания регулировочной обмотки амплостата возбуждения. На позициях 2—15 получает питание катушка «реле плавного пуска» *РУ8*. На позициях 8—15 включается *РУ15* для перестройки сигналов по току и по напряжению в системе регулирования.

На всех ходовых позициях при включенном тумблере управления переходами *УП* через два верхних кулачка контроллера подается напряжение на цепь катушек контакторов ослабления возбуждения тяговых электродвигателей, получающих питание при замыкании контактов *РП*.

На современных тепловозах имеется пятый «магнит регулятора» *МР5*, который включается автоматически при действии узла защиты от боксования (см. ранее). Действием *МР5* осуществляется перемещение сердечника *ИД* таким образом, чтобы препятствовать повышению напряжения генератора.

#### 41. СХЕМА ТЕПЛОВОЗА ВМЭ1А-024

Тепловоз выполнен на базе поставлявшегося на железные дороги СССР маневрового тепловоза ВМЭ1 мощностью 442 кВт Венгерской Народной Республики. Все оборудование тепловоза, кроме дизеля, компрессора, экипажной части и кузова, разработано и изготовлено заново. Дизель *Д* (рис. 155) вращает тяговый синхронный генератор *СГ* и генератор собственных нужд *ГСН*. Синхронный генератор имеет две трехфазные сдвинутые на  $30^\circ$  эл. обмотки статора, ротор с явно выраженными полюсами, обмоткой возбуждения, демпферной обмоткой и контактными кольцами.

Асинхронные тяговые двигатели *АТД 1—4* соединены попарно последовательно и питаются от статического преобразователя частоты. Преобразователь состоит из выпрямительной установки *В1*, общего для всех двигателей звена постоянного тока и двух автономных инверторов напряжения *И1* и *И2*. В звено постоянного тока включены: тиристорный ограничитель перенапряжений *ТК*, тормозной резистор *R<sub>т</sub>* с контактором *КТ* и фильтры *L<sub>ф</sub>*, *C<sub>ф</sub>*.

Генератор собственных нужд — *ГСН* — трехфазный синхронный с явно выраженными полюсами, с самовозбуждением через трехобмоточный трансформатор *ТС* и выпрямитель *В3*. *ГСН* питает: обмотку возбуждения *СГ* через трансформатор *ТВ*, выпрямитель *В2*, тиристорный регулятор возбуждения *ТРВ* и блок гашения поля *БГП*. От него же получают питание асинхронные двигатели вспомогательных агрегатов — вентиляторов: холодильника *МХ*, тяговых двигателей *МТ*; преобразовательной установки *МП*, а также приводы тормозного компрессора *МК* и водяного насоса *МВ*; цепи заряда аккумуляторной батареи *АБ* через тормозное зарядное устройство *УЗА* и резисторы заряда *СЗБ*. На выход *УЗА* подключены все потребители тепловоза — освещение, отопление кабины и т. д. (на схеме не показаны). Пуск дизеля осуществляется от стартерного двигателя постоянного тока *С*, питаемого от *АБ* через пусковой контактор *КП*. Для исследований может быть осуществлен пуск дизеля от *АБ* через тяговые инверторы и синхронный генератор (эти дополнительные цепи и устройства не показаны).

Тепловоз оборудован автоматической системой внутреннего регулирования. В систему входят: контроллер машиниста *КМ* посредством которого про-

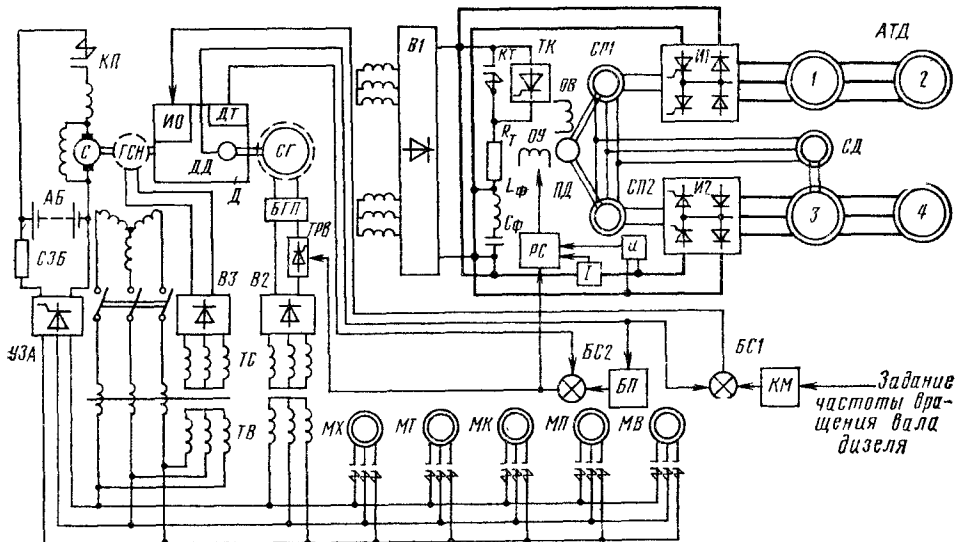


Рис. 155. Принципиальная схема тепловоза ВМЭ1А-024

изводится плавное задание частоты вращения вала дизеля; объединенный регулятор энергетической цепи, включающий: блок программы *БП*, датчики вращения вала дизеля *ДД*, подачи топлива *ДТ*, тока *I* и напряжения *U*, исполнительный орган подачи топлива *ИО*, регулятор частот слежения *РС* и блоки сравнения *БС1* и *БС2* (соответствующие усилители выходных сигналов с целью упрощения не показаны), сельсин-датчик *СД* и два сельсина-сумматора *СП1*, *СП2* с приводным двигателем *ПД*, имеющим обмотки: возбуждения *ОВ* и управления *ОУ*.

Автоматическое регулирование энергетической цепи осуществляется следующим образом: сигнал по заданной частоте вращения вала дизеля сравнивается в блоке *БС1* с фактической частотой. Сигнал рассогласования усиливается и подается в исполнительный орган *ИО* для изменения подачи топлива. На холостом ходу дизель-генератора функция регулирования на этом заканчивается. При включении тягового режима вступает в работу блок программы *БП*, на вход которого подается сигнал фактической подачи топлива, а с выхода снимается величина заданной подачи топлива для экономичной работы дизеля. В блоке сравнения *БС2* сигналы программной и фактической подач топлива сравниваются; результат сравнения усиливается и подается на входы тиристорного регулятора возбуждения *ТРВ* и регулятора частот скольжения *РС* асинхронных тяговых двигателей.

В зоне регулируемого напряжения рассогласование программной и фактической подач топлива устраняется соответствующим изменением тока возбуждения *СГ*; в зоне ослабления возбуждения — изменением абсолютного скольжения тяговых двигателей. На схеме не показаны некоторые вспомогательные узлы и цепи: защиты, ограничений, индикации и др. Подробное рассмотрение схемы и отдельных узлов в учебнике нецелесообразно, так как тепловоз ВМЭ1А-024, а также и ТЭ120 Ворошиловградского завода являются опытными локомотивами, часть элементов которых будет еще изменяться.

## ГЛАВА 9

# ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

### 42. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Тепловозы с электрической передачей дают возможность сравнительно легко применять электрическое торможение. Для этого тяговые электродвигатели необходимо перевести в генераторный режим работы, так как момент электрической машины, работающей в генераторном режиме, направлен противоположно моменту двигательного режима. При электрическом торможении кинетическая энергия движущегося поезда превращается в электрическую.

При тепловозной тяге полученная при торможении электрическая энергия может рассеиваться в виде тепла в тормозных резисторах и частично использоваться для питания вспомогательных приводов, например привода вентиляторов, охлаждающих тяговые двигатели и тормозные резисторы, заряда аккумуляторной батареи и др.

Электрическое торможение позволяет повысить скорость движения поездов на уклоне, а поэтому обеспечить более экономичное ведение поезда, т. е. снизить расход топлива; минимально использовать пневматические тормоза, а следовательно, снизить износ тормозных колодок локомотива и вагонов, повысить безопасность движения поездов. Электрическое торможение обладает рядом технических преимуществ по сравнению с пневматическим торможением, а именно плавностью торможения, возможностью регулирования тормозного усилия по желанию машиниста, быстротой действия, независимостью тормозных характеристик от температуры окружающей среды и влажности.

Регулирование скорости движения поезда пневматическими тормозами

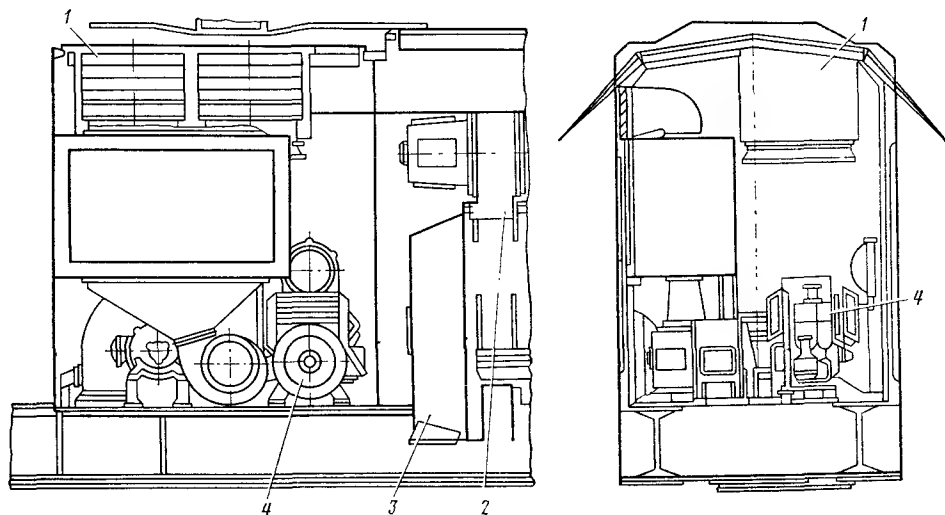


Рис. 156. Расположение блоков тормозных резисторов на современных тепловозах:  
1 — блок тормозных резисторов; 2 — возбуждатель; 3 — синхронный генератор; 4 — мотор-компрессор

неэкономично; требуется высокая квалификация машиниста, а при больших скоростях такое регулирование малоэффективно вследствие резкого уменьшения тормозной силы. При высоких скоростях целесообразно применять для регулирования скорости движения электрическое торможение, которое может обеспечить подтормаживание поезда на спусках для поддержания заданной скорости и снижение скорости до значений, при которых становится эффективным пневматический тормоз.

Исследования показали, что при скоростях примерно 60—70 км/ч коэффициент трения из-за нагрева колодки и бандажа уже после 20 с от начала торможения составляет лишь 40% первоначального его значения. По тем же причинам на затяжных уклонах коэффициент трения может снизиться более чем на 60%. При электрическом же торможении тормозные колодки почти всегда холодные, благодаря чему при экстренной необходимости можно осуществить максимально эффективное торможение пневматическими тормозами.

Тормозные резисторы должны иметь минимальные размеры и массу; их необходимо изготавливать из специальных сплавов типа нихрома и фехрали, обладающих большими удельными электрическими сопротивлениями ( $1,4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ) и допускающих высокую рабочую температуру (1000—1100° С). Резисторы должны интенсивно принудительно охлаждаться. Существует ряд конструкций тормозных резисторов, как, например, охлаждаемые выпускными газами дизеля; воздухом, эжектируемыми выпускными газами, используемыми для охлаждения вентилятора холодильника, а также резисторы, представляющие собой автономный агрегат.

Наиболее распространен автономный агрегат тормозных резисторов, так как он включается в работу только в момент электрического торможения, вентилятор получает питание от тяговых электродвигателей, работающих в генераторном режиме, не влияет на работу других узлов и агрегатов тепловоза и легче вписывается в его габариты. Размещение блоков тормозных резисторов на современных тепловозах показано на рис. 156. Параметры тормозных резисторов следующие: тип БСО-9047 и 9048; ток номинальный 570 А; мощность резисторов 460 кВт; расход охлаждающего воздуха не менее  $11 \text{ м}^3/\text{с}$ ; напряжение относительно корпуса 900 В.

#### 43. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОРМОЗНОГО УСИЛИЯ

При переводе тяговых электродвигателей в тормозной режим необходимо их отключить от тягового генератора, якорные обмотки присоединить к тормозным резисторам, а обмотки возбуждения — к источнику питания (рис. 157).

Использование тягового генератора в качестве возбудителя дает возможность осуществить независимое возбуждение двигателей при электрическом торможении. Это обеспечивает гибкость управления скоростью движения при плавном регулировании тормозного усилия в широком диапазоне. Такой способ регулирования нашел широкое применение в современных схемах реостатного торможения тепловозов.

Тормозное усилие в большинстве случаев регулируется изменением магнитного потока двигателей, т. е. регулированием напряжения генератора,

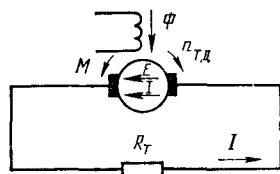


Рис. 157. Принципиальная схема включения двигателя, работающего в режиме торможения

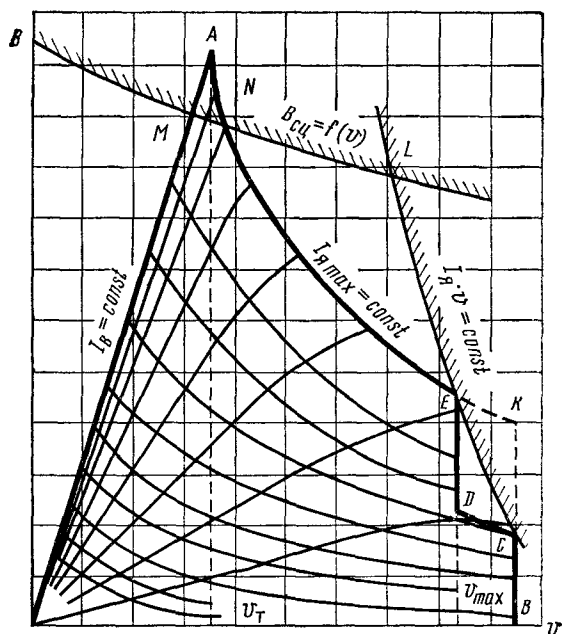


Рис. 158. Область тормозных режимов тягового электродвигателя

которое осуществляется изменением частоты вращения вала дизеля или тока возбуждения возбудителя.

Тормозное усилие можно регулировать также изменением тормозного сопротивления, такой способ значительно усложняет схему, так как требует дополнительных переключающих аппаратов.

Электромагнитный момент, развиваемый на валу двигателя,

$$M_{\text{тд}} = C_m I_{\text{тд}} \Phi, \quad (57)$$

где  $I_{\text{тд}}$  — ток якоря двигателя, работающего в тормозном режиме (тормозной ток).

Для цепи тормозного тока можно написать уравнение равновесия э. д. с.

$$C_e n_{\text{тд}} \Phi = I_{\text{тд}} (R_{\text{т}} + \Sigma r_{\text{тд}}) = I_{\text{тд}} R'_{\text{т}},$$

где  $R_{\text{т}}$  — тормозное сопротивление;  
 $\Sigma r_{\text{тд}}$  — суммарное сопротивление обмоток электродвигателя, включаемых в цепь тормозного тока;

$R'_{\text{т}}$  — сопротивление цепи тормозного тока.

Решив уравнение относительно тормозного тока, получим

$$I_{\text{тд}} = \frac{C_e n_{\text{тд}} \Phi}{R'_{\text{т}}}.$$

Подставив значение  $I_{\text{тд}}$  в формулу (57), получим

$$M_{\text{тд}} = \frac{C_e C_m}{R'_{\text{т}}} \Phi^2 n_{\text{тд}}. \quad (58)$$

Выразим поток через  $I_{\text{тд}}$ :

$$\Phi = \frac{I_{\text{тд}} R'_{\text{т}}}{C_e n_{\text{тд}}}, \quad \text{тогда} \quad M_{\text{тд}} = \frac{C_m R'_{\text{т}}}{C_e} I_{\text{тд}}^2 \frac{1}{n_{\text{тд}}}. \quad (59)$$

Рассматривая формулу (58), можно сделать заключение, что при постоянном значении потока тормозной момент, развиваемый электродвигателем, пропорционален частоте вращения якоря, следовательно, характеристика  $M_{\text{тд}} = f_{\text{тд}}(n_{\text{тд}})$  (без учета реакции якоря) изображается прямой линией, проходящей через начало координат (рис. 158). Угол наклона этой прямой зависит от магнитного потока, который определяется током возбуждения электродвигателя. Частота расположения прямых при увеличении тока возбуждения возрастает вследствие насыщения магнитной цепи машины.

Из выражения (59) следует, что при постоянстве тормозного тока тормозной момент электродвигателя обратно пропорционален частоте его вращения и зависимость  $M_{\text{тд}} = f(n_{\text{тд}})$  изобразится гиперболой. Уменьшение тока через одинаковый интервал увеличивает в квадратичной зависимости частоту расположения гипербол.

#### 44. ТОРМОЗНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Тормозные характеристики представляют собой зависимость тормозного усилия от скорости движения  $B = f(v)$ ; их можно получить, используя соотношения (58) и (59), в которых тормозной момент двигателя необходимо привести к ободу движущегося колеса. Для этого необходимо использовать соотношения:

$$B = \frac{2M}{D_k} \frac{\mu m}{\eta} \quad \text{и} \quad v = 0,188 \frac{D_k n_{\text{тд}}}{\mu}, \quad (60)$$

где  $\mu$  — передаточное отношение тягового редуктора;  
 $m$  — число тяговых электродвигателей;  
 $D_k$  — диаметр колеса.

Тогда тормозное усилие определится уравнениями:

$$B = 10, \mu^2 \frac{C_e C_M}{\eta R'_T D_k^2} \Phi^2 v;$$

$$B = \frac{0,370 C_M R'_T I_{\text{тд}}^2}{\eta C_e v}, \quad (61)$$

где  $\eta$  — к. п. д. электродвигателя и тягового редуктора.

Тяговый электродвигатель в тормозном режиме, так же как и в тяговом; имеет ряд ограничений, которыми определяются пределы регулирования тормозных усилий.

Таковыми ограничениями являются: 1) максимальный ток возбуждения, который определяется условиями нагревания катушек главных полюсов; 2) максимальный тормозной ток, ограничиваемый нагреванием обмотки якоря электродвигателя; 3) коммутация; 4) сцепление колес с рельсами.

Максимальный ток возбуждения продолжительного или кратковременного режима (рекомендуется принимать равным максимальному в тяговом режиме), как это следует из соотношения (58), определяет ограничивающую тормозную характеристику  $OA$ .

В этом случае целесообразно магнитный поток выразить через пропорциональное ему значение  $E/n$  в соответствии с равенством  $\frac{E}{n} = C_e \Phi$ , тогда

$$B = 10,3 \frac{\mu^2}{\eta R'_T D_k^2} \left( \frac{E}{n} \right)_{\text{max}}^2 v. \quad (62)$$

Значение  $\left( \frac{E}{n} \right)_{\text{max}}$  соответствует максимальному току катушек главных полюсов

и определяется по нагрузочным кривым  $\frac{E}{n} = f(I_B)$  (расчетным или опытным), где  $I_B$  — ток возбуждения электродвигателя. С учетом параметров электродвигателя максимальное тормозное усилие, которое может быть реализовано, определится формулой

$$B_{\text{max}} = 1,94 \frac{\mu I_{\text{max}}}{\eta D_k} \left( \frac{E}{n} \right)_{\text{max}}. \quad (63)$$

В этом режиме магнитная цепь сильно насыщена и размагничивающим действием реакции якоря можно пренебречь, следовательно, ограничивающая характеристика  $B = f(v)$  может быть выражена прямой  $OA$ . Величины  $B_{\text{max}}$  и  $v_T$  (скорость тепловоза; при которой необходимо обеспечить наибольшую эффективность торможения) определяют точку  $A$ . Максимальный тормозной ток (продолжительный или кратковременный) по формуле (61) определяет тормозную характеристику  $AK$  по условиям нагревания обмотки якоря. Максимальное тормозное усилие при этом

$$B_{\text{max}} = 0,367 \frac{I_{\text{max}}^2 R'_T}{\eta v}. \quad (64)$$

Сопротивление цепи тормозного тока

$$R'_T = 0,274 \frac{B_{\text{max}} v_T}{I_{\text{max}}^2} \eta \cdot 10^3. \quad (65)$$

При высоких скоростях движения тормозное усилие ограничивается коммутацией машины. Критерием удовлетворительной коммутации является допустимое значение реактивной э. д. с. в секции обмотки якоря, которая не должна превышать 6В.

Скорость в момент начала ограничения тормозного усилия по условиям коммутации

$$v_k = k_k \frac{e_{гдоп}}{I}, \quad (66)$$

где  $k_k$  — коэффициент, определяемый параметрами якорной обмотки.

Уравнение ограничивающей кривой тормозного усилия по условиям коммутации имеет вид (от  $v_t$  до  $v_k$ )

$$B_k = 0,367 \frac{I^2 k_k^2 e_{гдоп} R'_T}{\eta \psi^3}. \quad (67)$$

Зависимость  $B_k = f(v)$  при постоянном значении  $e_{гдоп}$  представлена кривой  $LC$ . Наибольшее тормозное усилие при максимальной скорости (точка  $C$ ) определяется из выражения

$$B_v = B_k \left( \frac{v_k}{v_{max}} \right)^3. \quad (68)$$

Ограничивающая кривая по условиям сцепления  $ML$

$$B_{сц} = \psi 2P,$$

где  $\psi$  — коэффициент сцепления колес с рельсами при торможении;

$2P$  — нагрузка от колесной пары на рельс.

Семейство тормозных характеристик для различных токов якоря и возбуждения с учетом ограничительных кривых по сцеплению, коммутации, нагреванию обмоток двигателя, построенных в координатах «тормозное усилие—скорость тепловоза», определяет некоторую площадь, которую можно назвать *областью тормозных режимов* тягового электродвигателя. Основными параметрами этой области являются: максимальное тормозное усилие  $B_{max}$ , допустимое по условиям нагревания обмоток двигателя; скорость тепловоза  $v_k$  в момент начала ограничения тормозного усилия по условиям коммутации; наибольшее тормозное усилие  $B_v$ , которое можно реализовать при максимальной скорости движения тепловоза.

Анализ приведенных соотношений позволяет сделать следующие выводы: 1) максимальное тормозное усилие определяется токами, допустимыми по нагреванию обмоток якоря и катушек главных полюсов; 2) с увеличением тормозного сопротивления скорость  $v_t$ , при которой может быть реализовано  $B_{max}$ , смещается в зону больших скоростей; 3) тормозное усилие, ограниченное коммутацией электродвигателя, пропорционально тормозному сопротивлению и обратно пропорционально скорости тепловоза.

Тормозной ток (усилия) по потенциальным условиям проверяют по максимально допустимому напряжению между коллекторными пластинами для скорости  $v_k$ :

$$U_{kmax} = \frac{2pIR'_T}{\alpha\kappa} \epsilon \leq 35 \dots 40 \text{ В},$$

где  $p$  — число пар полюсов;

$\kappa$  — число коллекторных пластин.

Степень искажения магнитного поля  $\epsilon$  находят по кривым в зависимости от типа воздушного зазора и допустимого коэффициента устойчивости. Исходными данными при расчете тормозных характеристик являются нагрузочные характеристики электродвигателя

для  $\frac{E}{n} = f(I_B)$ , сопротивление цепи тормозного тока и параметры передачи ( $\mu$ ;  $D_k$ )

Расчет ведут в такой последовательности:

1) задаются тормозным током  $I$ ;

2) по нагрузочной характеристике, соответствующей току  $I$ ; для нескольких значений тока возбуждения определяют  $E/n$ ;

3) вычисляют скорости тепловоза для каждого тока возбуждения по формуле

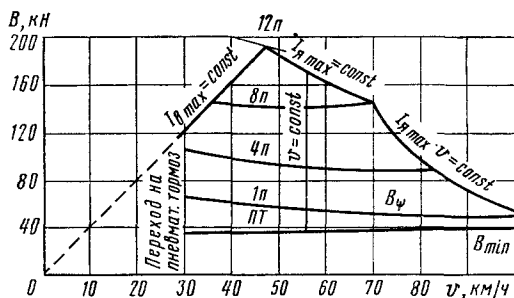
$$v = 0,188 \frac{IR'_T}{\frac{E}{n}} \frac{D_k}{\mu};$$

4) подсчитывают тормозное усилие  $B$ , соответствующее этим скоростям;

$$B = 10,3\mu^2 \frac{\left(\frac{E}{n}\right)^2}{\eta R'_T D_k^2}. \quad (69)$$

Рис. 159. Тормозные характеристики тепловоза:

1П, 4П, 8П, 12П — позиции тормозного контроллера машиниста; ПТ — предварительное торможение



Расчет для других тормозных токов выполняется так же. Полученные зависимости  $B = f(v)$  строят в виде кривых в пределах области тормозных режимов. Это позволяет быстро с учетом всех ограничений определить возможные режимы торможения; тормозной ток и ток возбуждения двигателя, требуемые для обеспечения той или иной скорости движения.

Тормозное усилие, необходимое для поддержания заданной скорости поезда на спусках, можно определить по формуле; полученной из уравнения движения поезда;

$$B = \frac{i - \omega_0}{m} (P + Q), \quad (70)$$

где  $i$  — крутизна уклона пути, ‰;  
 $\omega_0$  — удельное сопротивление движению поезда при данной скорости;  
 $m$  — число движущих осей тепловоза для индивидуального привода или число электродвигателей для группового привода;

$P + Q$  — масса локомотива и состава.

Параметры и характеристики электрического тормоза можно также определять по заданной мощности электрического тормоза, которая обычно указывается в технических условиях МПС (для тепловозов 2ТЭ116 —  $P_T = 2700$  кВт; для 2ТЭ121 —  $P_T = 3200$  кВт), для этого необходимы следующие исходные данные: конструктивная скорость тепловоза  $v_k$ , км/ч; передаточное число тягового редуктора  $\mu$ ; диаметр колеса  $D_k$ ; мощность электрического тормоза  $P_T$ , кВт; максимальный ток якоря в тормозном режиме  $I_{я max}$ , А; максимальный ток возбуждения  $I_{в max}$ , А; максимально допустимое значение произведения тока якоря на частоту вращения тягового электродвигателя (ограничение по коммутации)  $I_{я max} v$ .

Расчет сопротивления цепи тормозного тока производится следующим образом: мощность электрического тормоза на зажимах тяговых электродвигателей

$$P'_T = P_T \eta_{ТД},$$

где  $\eta_{ТД}$  — к. п. д. двигателя в тормозном режиме.

Напряжение на тормозном сопротивлении

$$U_T = \frac{P'_T}{6 I_{я max}}; \quad 6 — \text{количество осей.}$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_{ТЭ} = \frac{U_T}{I_{я max}}.$$

Расчет тормозных характеристик вида  $B = f(v)$  ведут на участке; где  $I_{я max} = \text{const}$ ; по формуле

$$Bv = 6 I_{я} E k_{\Pi} k_{\Pi\text{М}} 3,6 \cdot 10^{-3}, \quad (71)$$

где  $k_{\Pi} = 1,03$ ;  $k_{\Pi\text{М}} = 1,02$  — коэффициенты; учитывающие механические и магнитные потери

$$E = I_{я} (R_{ТЭ} + R_{дп 110^{\circ}\text{C}} + R_{я 110^{\circ}\text{C}}).$$

Задавая скоростью движения тепловоза  $v$  по формуле (71), определяем тормозное усилие  $B$  (рис. 159). Для построения характеристики  $B = f(v)$  на участке  $I_{я max} = \text{const}$  определяем одну точку, так как она является прямой линией, проходящей через начало координат.

Зная  $I_{я max}$ , определяем  $E$ ; зная количество витков обмотки главных полюсов  $w_{гп}$ , определим м. д. с. главных полюсов  $F_{2п} = I_{я max} w_{гп}$ ; по нагрузочным характеристикам

электродвигателя находим  $E/n$ , тогда частота вращения двигателя определится как  $n = \frac{E}{\frac{E}{n}}$ , а скорость тепловоза по формуле (50), тормозную силу  $B$  определим по формуле

(71). Характеристика  $B = f(v)$  на участке ограничения по коммутации определяется из равенства  $I_{\text{я}} v = \text{const}$  (постоянная, которая должна согласовываться с заданной тормозной мощностью). Предположим, задано, что  $I_{\text{я}} v = 0,056 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{км/ч}$ , а  $P_{\text{т}} = 4000 \text{ кВт}$ ; задавая скорость тепловоза, находим  $I_{\text{я}}$ , а затем тормозную силу  $B$  по формуле (71) и тормозную мощность на ободу колеса по соотношению  $P_{\text{то}} = \frac{Bv}{3,6}$ , результаты расчета сводим в таблицу.

Характеристики  $B_{\psi} = f(v)$ , соответствующие ступеням предварительного торможения ПТ и ступеням на первом, четвертом и восьмом положениях тормозного контроллера — ПП, 4П, 8П, определены таким образом, чтобы на каждом из них использовалась определенная доля предельной тормозной силы по сцеплению при коэффициенте сцепления, подсчитанном по формуле  $\psi = 0,138 + \frac{4,6}{29 + v}$ . Эти характеристики идут с некоторым повышением в области низких скоростей соответственно изменению коэффициента сцепления колес с рельсами. Минимальная тормозная сила (ПТ) ограничена значением  $B_{\text{min}}$ , необходимым для поддержания сцепных устройств поезда в сжатом состоянии и предотвращения продольных реакций.

Характеристики  $I_{\text{в}} = f(I_{\text{я}})$  на участках примерного постоянства тормозного усилия находятся из соответствующих характеристик  $B = f(v)$ . Ток якоря  $I_{\text{я}}$  определяется по формуле (71),  $\frac{E}{n}$  по формуле  $\frac{E}{n} = \frac{0,188 D_{\text{к}} E}{\mu v}$ , а  $F_{2\pi}$  по нагрузочным характеристикам. Ток возбуждения двигателя определится  $I_{\text{в}} = \frac{F_{2\pi}}{\omega}$

Как отмечалось выше, тормозное усилие можно регулировать изменением тока возбуждения тяговых электродвигателей, изменением тормозного тока или тормозного усилия (см. рис. 158). Выбор способа регулирования определяется требованиями, предъявляемыми к режимам торможения. При остановочном торможении удобны характеристики постоянства тормозного усилия, так как они согласуются с характеристиками пневматического тормоза состава, вследствие чего можно использовать единый орган управления. Кроме того, машинист может задавать значение замедления поезда независимо от скорости.

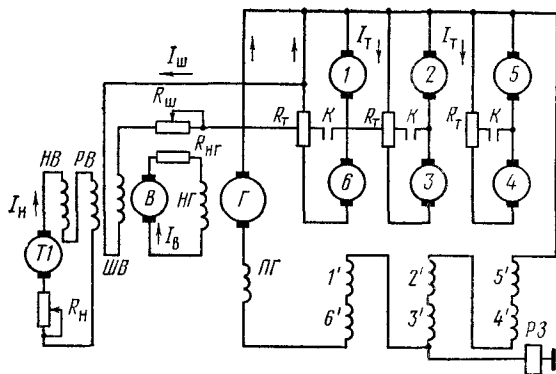
Использование тормозных характеристик при  $I_{\text{в}} = \text{const}$  и  $I_{\text{я}} = \text{const}$  вызывает определенное неудобство, так как с изменением скорости величина тормозного усилия значительно меняется. Для обеспечения устойчивого процесса торможения на спусках используются характеристики при  $I_{\text{в}} = \text{const}$  и  $B = \text{const}$ , хотя и они требуют вмешательства машиниста. На современных тепловозах (2ТЭ116, 2ТЭ121, ТЭП75) для облегчения управления и повышения точности поддержания заданной скорости используются САР скорости. Машинист задает требуемую скорость тормозным контроллером, а тормозное усилие устанавливается в зависимости от уклона.

#### 45. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Электродинамическое торможение впервые было применено в СССР в 1931 г. на тепловозах Коломенского завода серий О<sup>эл</sup> 6 и О<sup>эл</sup> 7. Оно использовалось для подтормаживания поезда на больших уклонах и перед применением колодочного тормоза. Во время торможения якоря электродвигателей подсоединялись к тормозным резисторам, а обмотки возбуждения — к аккумуляторной батарее. Переход из тягового режима в тормозной и управление осуществлялись контроллером, при помощи которого на низших позициях электродвигатели отключались от генератора, а на высших производилось регулирование тока возбуждения двигателей.

Рис. 160. Принципиальная схема электродинамического торможения тепловоза ТЭЗ:

$\Gamma$  — тяговый генератор; 1—6 — тяговые электродвигатели;  $B$  — возбудитель;  $T1$  — тахогенератор;  $H\Gamma$  — обмотка возбуждения возбудителя генератора;  $ШВ$  — обмотка параллельного возбуждения возбудителя;  $НВ$  — независимая обмотка возбуждения возбудителя;  $PВ$  — регулировочная обмотка;  $ПГ$  — пусковая обмотка;  $R_T$  — тормозные резисторы;  $PЗ$  — реле заземления



Схемы реостатного торможения можно разделить на три группы:

1) схемы с тяговыми электродвигателями последовательного возбуждения с питанием их обмоток возбуждения от тягового генератора или специального возбудителя;

2) схемы, обеспечивающие торможение до полной остановки поезда. В них тяговые двигатели в зоне ограничения по возбуждению работают в режиме противовключения;

3) схемы с тяговыми двигателями смешанного возбуждения.

При разработке электрической схемы реостатного торможения необходимо выполнять следующие требования: 1) минимальные изменения в электрической схеме; 2) использование серийного тепловозного оборудования; 3) простота схемы и минимальное количество коммутационной аппаратуры; 4) стабильность и устойчивость тормозных характеристик. Во ВНИТИ была проведена большая работа по выбору принципиальной электрической схемы электродинамического торможения применительно к тепловозу ТЭЗ, в результате которой была оборудована секция тепловоза ТЭЗ-0001 по схеме первой группы (рис. 160).

Каждая пара последовательно включенных тяговых электродвигателей присоединяется к отдельному нерегулируемому резистору. Такое соединение дает наиболее простую схему тяговых цепей, а также благоприятное распределение нагрузок между тяговыми электродвигателями в тормозном режиме, но требует большого количества коммутационной аппаратуры. Обмотки возбуждения тяговых электродвигателей соединены между собой последовательно и получают питание от тягового генератора, который работает в зоне больших токов и малых напряжений, т. е. в неустойчивой зоне, так как при незначительном возбуждении будет велико влияние остаточного магнетизма. В результате тормозные характеристики могут быть нестабильными. Чтобы избежать этого, пусковая обмотка тягового генератора используется как противокомпаундная. В этом случае результирующая м. д. с. тягового генератора будет результатом двух больших направленных друг против друга м. д. с., на которые остаточный магнетизм будет влиять гораздо меньше, уменьшится также влияние остаточного магнетизма возбудителя, так как он будет работать при большем токе и большем напряжении.

Без пусковой обмотки тяговый генератор работает при  $I_{в\text{тд}max} = I_{\Gamma} = 1000 \text{ А}$  с  $E_{\Gamma max} = 48 \text{ В}$  и при  $I_{в\text{тд}min} = 0,25 I_{в\text{тд}max} = 250 \text{ А}$  с  $E_{\Gamma min} = 12 \text{ В}$ . При номинальной частоте вращения вала дизеля  $n_d = 850 \text{ об/мин}$  ток возбуждения генератора  $I_{в} = 2,6 \div 0,65 \text{ А}$ . Диапазон регулирования тока тягового генератора в этом случае  $I_{\Gamma max} / I_{\Gamma min} = 4$ .

При включении пусковой обмотки в качестве противокомпаундной максимальная э. д. с. тягового генератора увеличивается до 480 В, а сила тока

возбуждения генератора до 27—30 А. Но диапазон регулирования тока генератора уменьшается до  $I_{\text{гmax}}/I_{\text{гmin}} = 2$ , т. е. сокращается зона торможения. Чтобы этого не произошло, регулировочную и независимую обмотки возбуждения возбудителя соединяют последовательно и они получают питание от тахогенератора  $TI$ , т. е. дополнительно вводится пропорциональная зависимость тока возбуждения тягового генератора от частоты вращения вала дизеля.

Так как тормозные резисторы нерегулируемые, то изменять тормозное усилие возможно только регулированием тяговых электродвигателей, т. е. э. д. с. тягового генератора. Электродвижущая сила тягового генератора регулируется: изменением возбуждения при  $n_g = \text{const}$ ; изменением  $n_g$  при постоянном возбуждении. Для выполнения первого варианта необходим специальный тормозной контроллер или переделка существующего. И то и другое нежелательно. Второй вариант, принятый на тепловозе ТЭЗ-0001, легок с точки зрения выполнения, но имеет следующие недостатки; дизель работает на всех позициях, а не на одной экономичной; на низших позициях ухудшается вентиляция тяговых электродвигателей, работающих в тормозном режиме при больших токах.

Для тепловоза ТЭП10 разработана схема электрического торможения (рис. 161), которую можно отнести ко 2-му варианту. При торможении ток  $I_T$ , вырабатываемый тяговыми электродвигателями, протекает через тормозные резисторы  $R_T$ , далее разветвляется в резистор  $R'$  и в цепь якоря генератора, включающую также обмотки тяговых электродвигателей  $ОВД$ . Генератор работает в двигательном режиме, передавая часть тормозной энергии на дизель, частота вращения вала которого постоянна и соответствует 13-й позиции контроллера машиниста. Мощность, передаваемая от генератора, составляет лишь часть мощности, развиваемой дизелем на холостом ходу, поэтому сохраняется некоторая подача топлива в цилиндры, что необходимо для устойчивого поддержания частоты вращения вала дизеля.

Режим силовой цепи поддерживается путем регулирования тока возбуждения тяговых двигателей при помощи генератора, э. д. с. которого под действием схемы возбуждения может изменяться в широких пределах и менять свой знак. После сборки тормозной схемы генератор кратковременно работает в генераторном режиме, возбуждая тяговые электродвигатели, а затем переходит в двигательный режим. При высоких скоростях движения электродвигатели имеют небольшой ток возбуждения, поэтому ток  $I' = I_T - I_g$  и э. д. с. генератора  $E_g = I'R'$  будут максимальными, при снижении скорости движения разность токов  $I_T - I_g$  и э. д. с. генератора уменьшаются.

При определенной скорости движения токи  $I_T$  и  $I_g$  сравниваются, э. д. с. генератора становится равной нулю, после чего генератор переходит в генераторный режим. При этом меняет направление ток  $I'$ . По мере снижения скоро-

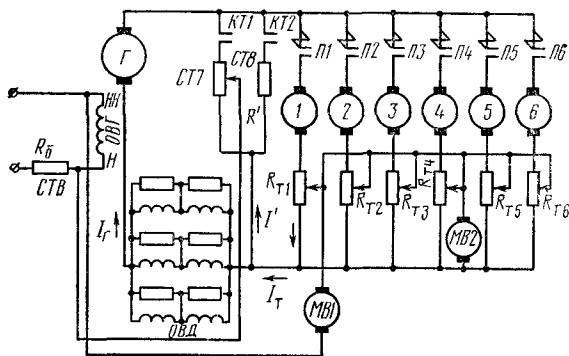
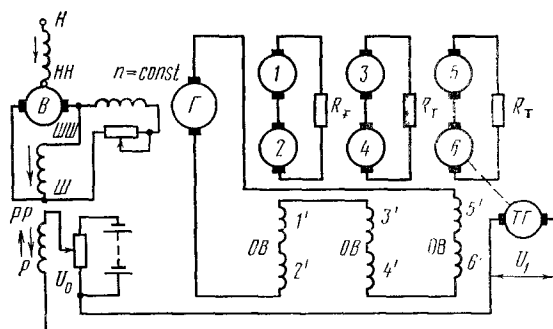


Рис. 161. Принципиальная схема реостатного торможения тепловоза ТЭП10:

$G$  — генератор; 1, 6 — электродвигатели;  $ОВД$  — обмотки возбуждения двигателей;  $R_{T1}-R_{T6}$  — тормозные резисторы;  $MB1$  и  $MB2$  — электродвигатели вентиляторов;  $KT1$  и  $KT2$  — контакторы для тормозного режима;  $CT7-CT8$  — стабилизирующие резисторы

Рис. 162. Принципиальная схема электрического торможения с узлом автоматического поддержания заданной скорости поезда на спусках:

$\Gamma$  — тяговый генератор; 1—6 — электродвигатели; 1'—6' — обмотки возбуждения электродвигателей;  $R_T$  — тормозной резистор;  $B$  — возбудитель;  $TГ$  — тахогенератор



сти тепловоза э. д. с. генератора увеличивается, частично компенсируя падение э. д. с. электродвигателей. Тем самым предотвращается значительное уменьшение тормозного тока и тормозного усилия. Защита от перегрузки осуществляется реле максимального тока, включенного в цепь 2-го тягового электродвигателя. Оно срабатывает при силе тока более 700 А. Реле заземления защищает тяговые машины от перекрытий на коллекторе как в тяговом, так и в тормозном режиме.

Реле перехода тормозное служит для переключения с электрического на полностью пневматическое торможение непосредственно перед остановкой локомотива ( $\approx 10 \div 20$  км/ч). Тем самым предотвращается опасность длительного протекания тормозного тока через неподвижные тяговые электродвигатели, а также несколько увеличивается эффективность торможения. Для контроля тормозного тока установлен амперметр. Кроме обычных защит, действующих на систему возбуждения в тяговом режиме, во время торможения дополнительно действуют защиты: при нарушении вентиляции тормозных блоков; при достижении максимального тормозного тока; при превышении максимальной частоты вращения вала дизеля. Срабатывание любой из защит приводит к автоматическому переходу на пневматическое торможение. Одновременно частота вращения вала дизеля снижается до 400 об/мин.

Электрическое торможение не работает, если: собрана аварийная схема возбуждения; отключен один из тяговых электродвигателей; отключено реле заземления. Реализация такой схемы связана со значительными усложнениями ее, а значение поглощаемой дизелем мощности невелико. Такие схемы применения не нашли.

Многие схемы реостатного торможения имеют узел, обеспечивающий автоматическое поддержание заданной скорости на спусках (рис. 162). Тормозное усилие регулируется специальным контроллером, каждой позиции которого соответствует определенное сопротивление в цепи независимого возбуждения возбудителя. Заданная скорость на спусках автоматически поддерживается при помощи регулировочной обмотки и обратной связи. Магнитодвижущая сила регулировочной обмотки  $P-PP$  определяется алгебраической суммой напряжений уставки  $U_0$  и тахогенератора  $U_1$ , которая пропорциональна скорости поезда. В зависимости от требуемой скорости напряжение  $U_0$  устанавливается машинистом при помощи переключателя.

При езде с заданной скоростью напряжение  $U_1 = U_0$  и по регулировочной обмотке ток не проходит, а напряжение возбудителя определяется м. д. с. независимой и параллельной обмоток. Если скорость увеличится (возрос уклон), то напряжение тахогенератора  $U_1$  будет больше, чем  $U_0$ , и по регулировочной обмотке пройдет ток, который создаст м. д. с., согласно действующую с м. д. с. независимой и параллельной обмоток, и тем самым тормозное усилие возрастает. Увеличение тормозного усилия будет происходить до тех пор, пока не восстановится заданная машинистом скорость. Если скорость уменьшится

по сравнению с заданной, то м. д. с. регулировочной обмотки будет направлена противоположно двум другим м. д. с. и тормозное усилие будет уменьшаться до восстановления заданной скорости движения поезда.

На тепловозах 2ТЭ116М, ТЭП70, V-300 и тепловозах ближайшей перспективы 2ТЭ121 и ТЭП75, имеющих передачу переменного-постоянного тока, также применяется реостатное торможение. Электрическое торможение предусматривается на всех магистральных перспективных тепловозах.

Якорь каждого электродвигателя включается на отдельный тормозной резистор (рис. 163). В качестве возбудителя используется тяговый синхронный генератор *СГ*, к которому через выпрямительную установку *ВУ* со стороны постоянного тока подсоединяются обмотки возбуждения электродвигателей, соединенных последовательно. Так как цепь обмоток возбуждения имеет малое сопротивление, то для устойчивой работы генератора в цепь обмоток возбуждения включаются балластные резисторы (тепловоз V-300). Кроме того, балластные резисторы снижают постоянную времени цепи, что повышает устойчивость работы системы регулирования электрического тормоза. Для охлаждения тормозных резисторов используются два мотор-вентилятора с электродвигателями, имеющими последовательное возбуждение. Двигатели получают питание от тормозных резисторов. Каждый мотор-вентилятор включен на часть тормозного резистора, секции этих резисторов включены параллельно-уравнительными соединениями для выравнивания нагрузки тормозных резисторов.

Перевод тяговой схемы из тягового режима в тормозной осуществляется тормозным переключателем *ТП* в обесточенном состоянии. Питание обмотки возбуждения тягового генератора, как и в тяговом режиме, происходит от возбудителя *СВ* через управляемый выпрямитель *УВВ*. Это дает возможность плавно регулировать возбуждение тяговых электродвигателей в требуемых пределах.

В режиме электрического тормоза на тепловозах V-300 дизель работает на 11-й позиции контроллера. Для уменьшения расхода топлива частота вращения должна быть меньшей, но достаточной, чтобы обеспечить вентиляцию тяговых двигателей.

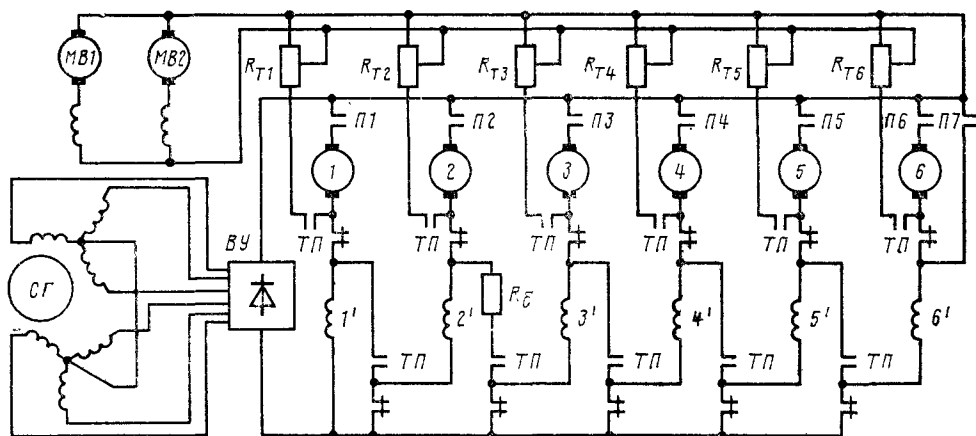
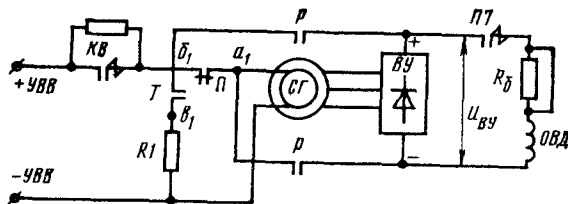


Рис. 163. Принципиальная схема тяговой цепи при реостатном торможении для тепловозов с передачей переменного-постоянного тока:

*СГ* — синхронный генератор; *ВУ* — выпрямительная установка; 1—6 — якоря электродвигателей; *R<sub>Т1</sub>*—*R<sub>Т6</sub>* — тормозные резисторы; *ТП* — тормозной переключатель; *П1*—*П7* — силовые контакторы; *R<sub>Б</sub>* — балластный резистор; *МВ1*, *МВ2* — электродвигатели вентиляторов; 1'—6' — обмотки возбуждения

Рис. 164. Принципиальная схема реостатного торможения без балластного резистора в цепи обмоток возбуждения тяговых электродвигателей:

СГ—тяговый синхронный генератор; УВВ—зажимы управляемого выпрямителя возбуждения; КВ, П7—контакты контактора возбуждения генератора и возбуждения электродвигателей; ВУ—выпрямительная установка; р—контакты реле Р; П, Т—контакты тормозного переключателя; R1, R6—резисторы; ОВД—обмотки возбуждения тяговых электродвигателей



На тепловозах 2ТЭ116М, ТЭП70, ТЭП75 и 2ТЭ121 используются схемы электрического торможения, исключаящие балластные резисторы, которые повышают эффективность электрического тормоза. На балластном резисторе, включенном в цепь обмоток возбуждения электродвигателей, выделяется тепло, на образование которого затрачивается до 15% мощности дизеля.

При исключении балластного резистора из цепи возбуждения электродвигателей схема оборудуется устройством реализации жесткой обратной связи и размагничивания синхронного генератора. В этом случае непосредственно включается выпрямленное напряжение генератора ( $U_{вг}$ ) в цепь его возбуждения (рис. 164). Схема применена на тепловозах 2ТЭ116 М и 2ТЭ121. При торможении цепь возбуждения генератора размыкается контактами тормозного переключателя П (точки  $a_1, b_1$ ), а контактами Т параллельно управляемому выпрямителю УВВ подключается резистор R1, реле Р также получает питание. Замыкающие контакты реле Р подключают выпрямленное напряжение генератора к собственной обмотке возбуждения, следовательно, вводят выходное напряжение генератора в цепь его возбуждения.

Действие остаточного напряжения генератора вызывает протекание размагничивающего тока через обмотку возбуждения по цепи тока  $b_1$  — резистор R1 — обмотка возбуждения — точка  $a_1$ . В результате остаточное напряжение генератора снижается до значения, обеспечивающего возможность регулирования напряжения при максимальной скорости входа в торможение. В процессе торможения ток в обмотке возбуждения генератора определяется разностью напряжений управляемого выпрямителя и генератора. Перевод схемы в тяговый режим сопровождается исключением напряжения генератора из его цепи возбуждения при помощи тормозного переключателя и реле Р. При этом точки  $a_1$ — $b_1$  замыкаются, точки  $b_1$ — $a_1$  размыкаются, отключая резистор R1 от управляемого выпрямителя.

На тепловозах 2ТЭ116М в режиме электрического тормоза тяговый генератор работает на 13-м положении контроллера машиниста при токах больше 500 А с тем, чтобы обеспечить подачу достаточного количества воздуха в тяговые электродвигатели для охлаждения их. При токах меньше 500 А работа генератора происходит на 11-м положении контроллера. Этим обеспечивается устойчивая работа асинхронных электроприводов (минимальное напряжение генератора достигается при пониженной частоте питания).

Тяговую цепь от замыкания на землю и кругового огня на тяговых электродвигателях защищает реле заземления. Защита балластного и тормозных резисторов от перегрузки производится максимальными реле, настраиваемыми на токи срабатывания  $(1, 2—1,25)I_n$ . Срабатывание защитных реле приводит к отключению электрического тормоза и замене его пневматическим. Защита по минимальному току мотор-вентиляторов осуществляется двумя реле, включенными на падение напряжения на обмотках главных и добавочных полюсов электродвигателей вентиляторов, отключая электрический тормоз при срабатывании.

Для получения требуемых тормозных характеристик служит система автоматического регулирования. Функциональная схема САР электрического тормоза представлена на рис. 165. Электрический тормоз работает в следующих режимах: служебного подтормаживания на уклонах с автоматическим поддержанием  $v = \text{const}$ ; служебного остановочного торможения с заданной тормозной силой по одной из характеристик  $B_\psi = f(v)$ ; экстренного торможения по максимально допустимым значениям  $I_{\text{я}}, I_{\text{в}}, I_{\text{я}} \cdot v$ .

В начале торможения при всех режимах включается ступень предварительного торможения ПТ, которая необходима для поддержания сцепных устройств поезда в сжатом состоянии. Для обеспечения тормозных режимов в системе регулирования имеются следующие каналы: регулирования тока якоря  $I_{\text{я}}$ ; два канала регулирования тока возбуждения  $I_{\text{в}}$ ; регулирования тормозной силы  $B_\psi$ ; ограничения по коммутации тяговых электродвигателей  $I_{\text{я}} v = \text{const}$ ; регулирования скорости  $v$ . В схеме вырабатываются следующие сигналы уставок.

*По току якоря и току возбуждения:* сигнал уставки, снимаемый с потенциометра:  $R_{\text{тmax}}$ , соответствующий максимальным токам  $I_{\text{я}}$  и  $I_{\text{в}}$ ; сигнал уставки, снимаемый с потенциометра  $R_{\text{т}}$  при срабатывании защиты от юза и соответствующий меньшим токам  $I_{\text{я}}$  и  $I_{\text{в}}$ ; сигнал уставки, снимаемый с потенциометра  $R_{\text{пт}}$  и действующий в начале торможения; сигнал уставки переменного значения, вводимый при работе канала регулирования скорости с выхода усилителя УС1. Первые два сигнала вводятся в канал  $I_{\text{я}}$  и первый канал  $I_{\text{в}}$ , третий и четвертый — во второй канал  $I_{\text{в}}$ .

*По тормозной силе* — сигнал уставки, снимаемый с потенциометра  $R_{\text{тс}}$  и изменяемый ступенчато при помощи переключателя на 12 позиций на тор-

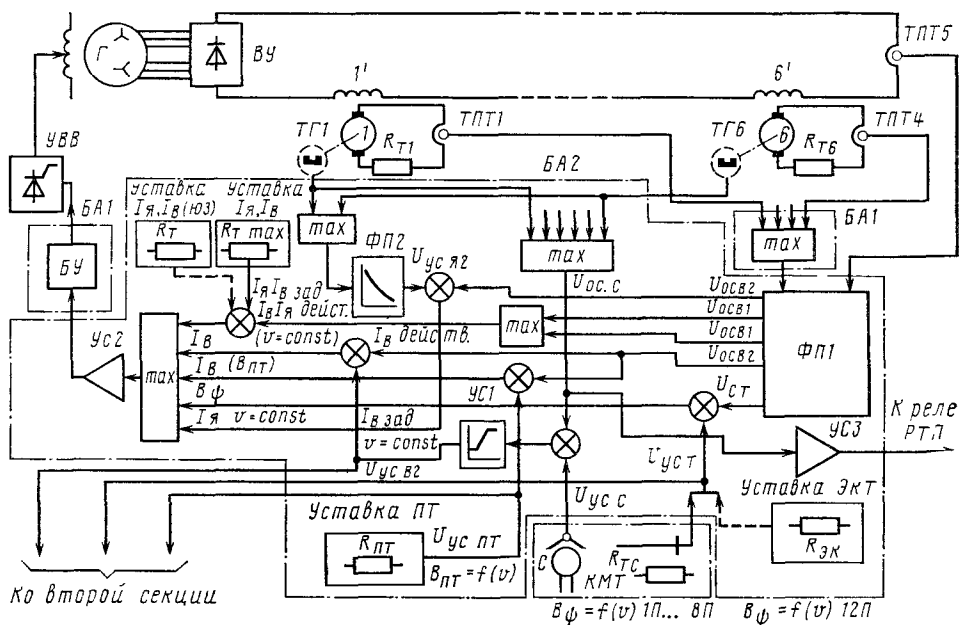


Рис. 165. Функциональная схема САР электрического тормоза:

Г — тяговый генератор; ВУ — выпрямительная установка; 1—6 — якоря тяговых электродвигателей; 1'—6' — обмотки возбуждения электродвигателей;  $R_{\text{т}}, R_{\text{тс}}$  — тормозные резисторы; ТГ1—ТГ6 — тахогенераторы; ТПТ1—ТПТ5 — трансформаторы постоянного тока; КМТ — тормозной контроллер машиниста; ЭКТ — экстренное торможение; УС1—УС3 — усилители; ПТ — предварительное торможение; С — сельсин; ФП1, ФП2 — функциональные преобразователи; max — блок выделения максимального значения; УВВ — управляемый выпрямитель возбуждения; БУ — блок управления; БА1 — блок управления тягового режима; БА2 — блок управления тормозного режима

мозном контроллере КМТ. Этот сигнал определяет характеристики  $B_\Phi = f(v)$ ; сигнал уставки, снимаемый с потенциометра  $R_{\text{ЭК}}$ ; этот сигнал действует при экстренном торможении, при этом ограничение по тормозной силе сдвигается на уровень 12П, обеспечивая торможение по предельным характеристикам.

*Ограничение по коммутации электродвигателей:* сигнал уставки, снимаемый с выхода преобразователя ФП2, представляющий величину, обратно пропорциональную скорости движения.

*По скорости движения:* плавно изменяемый сигнал уставки, снимаемый с сельсина с тормозного контроллера КМТ.

Сигналами обратной связи являются: сигнал по току якоря электродвигателей  $U_{\text{ос.я1}}$  и  $U_{\text{ос.я2}}$ , сигнал по току возбуждения двигателей  $U_{\text{ос.в1}}$  и  $U_{\text{ос.в2}}$ , сигнал по тормозной силе  $U_{\text{с.т}}$ , сигнал по скорости движения  $U_{\text{ос.с}}$ . Сигналы уставок и сигналы обратной связи сравниваются в узлах сравнения и, если разность сигналов достаточная, происходит отпирание соответствующего канала регулирования.

Датчиками тока якоря электродвигателей являются трансформаторы постоянного тока ТПТ1—ТПТ4, датчиком тока возбуждения — трансформатор ТПТ5, включенный в цепь обмоток возбуждения электродвигателей. Из узла выделения максимального тока (узел «тах») якоря электродвигателей и тока от ТПТ5 поступает сигнал в функциональный преобразователь ФП1, представляющий собой диодно-потенциометрическую схему формирования сигналов по току якоря, току возбуждения и тормозной силе. Эти сигналы снимаются с выхода ФП1 в виде падений напряжений.

Сигнал по тормозной силе  $U_{\text{с.т}}$  является суммой сигналов по  $I_{\text{я}}$  и  $I_{\text{в}}$ . На каждой оси колесной пары установлены тахогенераторы ТГ1—ТГ6, измеряющие скорость движения тепловоза. Выходные сигналы тахогенераторов вводятся в систему регулирования посредством двух элементов «тах», выделяющих максимальные сигналы.

В канале регулирования скорости на вход элемента «тах» подаются все шесть сигналов от тахогенераторов, в канал ограничения по коммутации электродвигателей вводятся сигналы от первого и шестого тахогенераторов. Тормозной режим поддерживается воздействием сигнала рассогласования (разность между сигналом обратной связи и уставки) по регулируемым величинам на блок управления БУ устройства БА1, изменяющего угол включения тиристоров в цепи возбуждения тягового генератора. Тем самым требуемым образом регулируется ток возбуждения тягового генератора и электродвигателей. Максимальное открытие тиристоров — при нулевом токе управления, закрытое состояние тиристоров — при наибольшем токе управления.

Схемой устройства БА2 предусмотрено, что каждый из каналов  $I_{\text{я}}$ ;  $I_{\text{в}}$ ;  $I_{\text{я}}v = \text{const}$ ;  $B_\Phi$  вступают в работу при превышении сигнала обратной связи над сигналом уставки, этим обеспечивается требуемая последовательность работы каналов регулирования.

Рассмотрим, например, работу системы регулирования в режиме поддержания скорости движения. Для этого тормозным контроллером задается уставка по каналу  $v$ . Если скорость движения превышает заданную, то сигнал обратной связи становится больше сигнала уставки и на выходе усилителя УС1 появляется максимальный сигнал. Торможение будет происходить по предельным характеристикам. При выравнивании скоростей сигналы обратной связи и уставки примерно равны, сигнал на выходе УС1 начинает уменьшаться.

После уменьшения этого сигнала до значения сигнала обратной связи  $U_{\text{ос.в2}}$  откроется второй канал регулирования тока  $I_{\text{в}}$ , при этом будет поддерживаться значение тока возбуждения тяговых электродвигателей такое, при

котором тормозная сила является достаточной для поддержания заданной скорости. Остальные каналы закрыты.

Система регулирования обеспечивает устойчивость поддержания режима торможения при небольших проскальзываниях (юз) отдельных колесных пар тепловоза. Для этого используют индивидуальные датчики скоростей колесных пар и токов якорей электродвигателей и логических элементов выделения максимального сигнала «тах». При этом ток возбуждения электродвигателей остается примерно неизменным и режим работы неюзующих тяговых электродвигателей не изменяется, что способствует прекращению юза. При значительных проскальзываниях колесных пар срабатывает противоюзная защита и снижает тормозную силу всех колесных пар путем введения уменьшенной уставки по каналам регулирования  $I_a$  и  $I_b$ .

Для замещения электрического тормоза пневматическим при низких скоростях движения используется усилитель  $УСЗ$  и реле  $РТП$ , представляющие собой узел перехода на пневматическое торможение. На вход  $УСЗ$  подается сигнал по скорости с узла «тах». При снижении скорости движения примерно до 30 км/ч реле  $РТП$  отпадает и включает электрический тормоз, при этом происходит включение пневматического тормоза.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОВЗОВ И ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДОВ С ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

---

### 46. ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ТЕПЛОВЗОВ И ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДОВ

Электрическое оборудование тепловозов и дизель-поездов с гидравлической передачей предназначено для пуска дизелей и привода агрегатов, их дистанционного и автоматического управления и защиты от аварийных режимов работы, а также для управления тепловозами «по системе многих единиц». Значительная часть его унифицирована с оборудованием тепловозов с электрической передачей (см. гл. 5).

Из электрооборудования, отражающего специфику в управлении и защите тепловозов и дизель-поездов с гидропередачей, можно отметить электро-стартер типа ЭС2 для пуска дизелей, таходатчики типа ДТЭ2 или Д2-3 для формирования сигнала по скорости движения, подаваемого в блоки автоматики гидропередачи и сигнализации боксования, электропневматическая блокировка реверса, корректирующий реостат в цепи тахогенератора, механически связанный с валом контроллера машиниста. Описание этих устройств приведено в литературе [10], а взаимодействие их можно уяснить из рассматриваемых ниже электрических схем основных узлов отечественных тепловозов и дизель-поездов с гидропередачей.

В последние годы в электрооборудовании новых отечественных тепловозов с гидропередачей (тепловозы ТГ16, ТГМ6 и дизель-поездах ДР) наметилась тенденция к широкому применению прогрессивных бесконтактных элементов и систем. Работа отдельных узлов схемы электрических соединений с применением этих элементов рассмотрена в главах 6 и 7.

Электрическая схема тепловозов с гидропередачей и дизель-поездов ДР условно может быть разделена на ряд основных узлов и цепей: узел возбуждения и регулирования напряжения вспомогательного генератора; узел заряда аккумуляторной батареи; цепи управления пуском дизелей; цепи управления и блокировки реверса; цепи трогания тепловоза; система автоматического управления гидропередачи; узлы автоматической защиты и контроля дизеля и гидропередачи.

Схемы электрических соединений тепловозов с гидропередачей разных серий различны как по применяемому электрооборудованию, так и по техническому исполнению. Различие схем электрических соединений наблюдается не только в тепловозах разных серий, но и в тепловозах одной серии. Например, в тепловозах ТГ102 имеются пять вариантов принципиальных схем электрических соединений, в тепловозах ТГМ3 — пять, в дизель-поездах ДР1 и ДР1П — два. Привести описание всех схем невозможно.

Ниже кратко рассмотрены лишь особенности некоторых принципиальных схем тепловозов с унифицированной гидропередачей типа УГП.

*Узел вспомогательного генератора* обеспечивает заряд аккумуляторной батареи и питание цепей управления и освещения при работающем дизеле. Он объединяет ряд самостоятельных узлов и цепей: узел заряда аккумуляторной батареи, цепи возбуждения и регулирования напряжения вспомогательного генератора.

На большинстве тепловозов с гидropередачей узел заряда аккумуляторной батареи аналогичен такому же узлу на тепловозах с электропередачей (см. гл. IV).

**Цепи управления пуском дизеля.** Пуск дизелей на всех тепловозах и дизель-поездах ДР электрический.

В управлении пуском дизелей тепловозов как с электрической, так и с гидравлической передачей выработаны общие принципы.

1. При установке на одной секции тепловоза двух дизелей или при двухсекционном исполнении пуск дизелей производится последовательно во времени, начиная с ведомой секции или второго дизеля.

2. Перед пуском дизелей прокачивают масло в их системе. На большинстве тепловозов организация пусковых цепей начинается автоматически при достижении определенного давления масла или через определенную уставку времени. Давление масла в системе дизеля перед его пуском должно быть не ниже 0,5 МПа, а температура его не ниже  $+40^{\circ}\text{C}$ .

3. Предварительно включают топливоподкачивающий насос. Давление топлива в топливном коллекторе перед пуском должно быть не ниже 2 МПа.

4. Перед пуском производится ряд подготовительных операций: замыкаются кнопки, выключатели, блокирующие педали и т. д.

На многих тепловозах пуск дизелей автоматизирован. Под автоматизацией пуска понимается автоматическое выполнение следующих операций: сбор цепей после кратковременного нажатия ( $\sim 2$  с) кнопки «Пуск дизеля», контроль правильности сборки цепей и разрешающего положения аппаратов защиты дизеля и разборка пусковых цепей после завершения пуска. Автоматическим операциям предшествуют подготовительные операции, указанные выше и выполняемые машинистом.

Рассмотрим последовательность включения аппаратов при пуске дизелей М756 на дизель-поездах ДР1А (рис. 166). Для пуска дизеля должны быть включены последовательно: выключатель батареи  $B_{KB1}$ , нижний палец контроллера машиниста  $KM$ , замкнутый в нулевом положении, тумблеры «Приборы» и «Топливный насос 1 дизеля». При этом получают питание катушка вентиля остановки дизеля  $ВДД$ , приборы и электродвигатель топливного насоса  $ЭНТ$ . По проводу 1А получают питание остальные цепи пуска.

При нажатии кнопки «Пуск 1» собираются цепи аппаратов пуска первого дизеля в следующем порядке:

а) питания устройства звукового сигнала пуска дизеля  $СПД$ ;

б) питания катушки контактора маслопрокачивающего насоса  $KMH$ , который своими силовыми контактами обеспечивает питание электродвигателя маслопрокачивающего насоса  $ЭНМ$ , а замыкающими контактами шунтирует кнопку «Пуск 1» и размыкающими контактами отключает регулятор напряжения  $PgH$  стартера-генератора от аккумуляторной батареи;

в) питания катушки контактора  $KД$  при условии, что давление масла достигает 0,5 МПа (контакт реле  $PДМ1$  замкнут), температура масла не ниже  $+40^{\circ}\text{C}$  (контакт датчика  $ДТ6$  ( $40^{\circ}\text{C}$ ) замкнут и уровень охлаждающей воды в установленных пределах (контакт реле уровня воды  $PУВ$  замкнут);

г) питания катушки реле времени  $PВД$  через замыкающий контакт  $KД$ . Силовые контакты  $KД$  подключают обмотки стартера-генератора  $СТг$  на напряжение батареи  $АБ$ ; при этом вал дизеля приводится во вращение и произойдет пуск дизеля. С увеличением частоты вращения вала дизеля давление масла достигает 2,2 МПа и реле  $PДМ2$  включает реле пуска дизеля  $PПД$ , которое своими размыкающими контактами размыкает цепи контакторов  $KД$ ,  $KНМ$  и реле  $PВД$ , а замыкающими контактами восстановит цепи регулятора  $PgH$  и контактора генератора  $KГ$ .

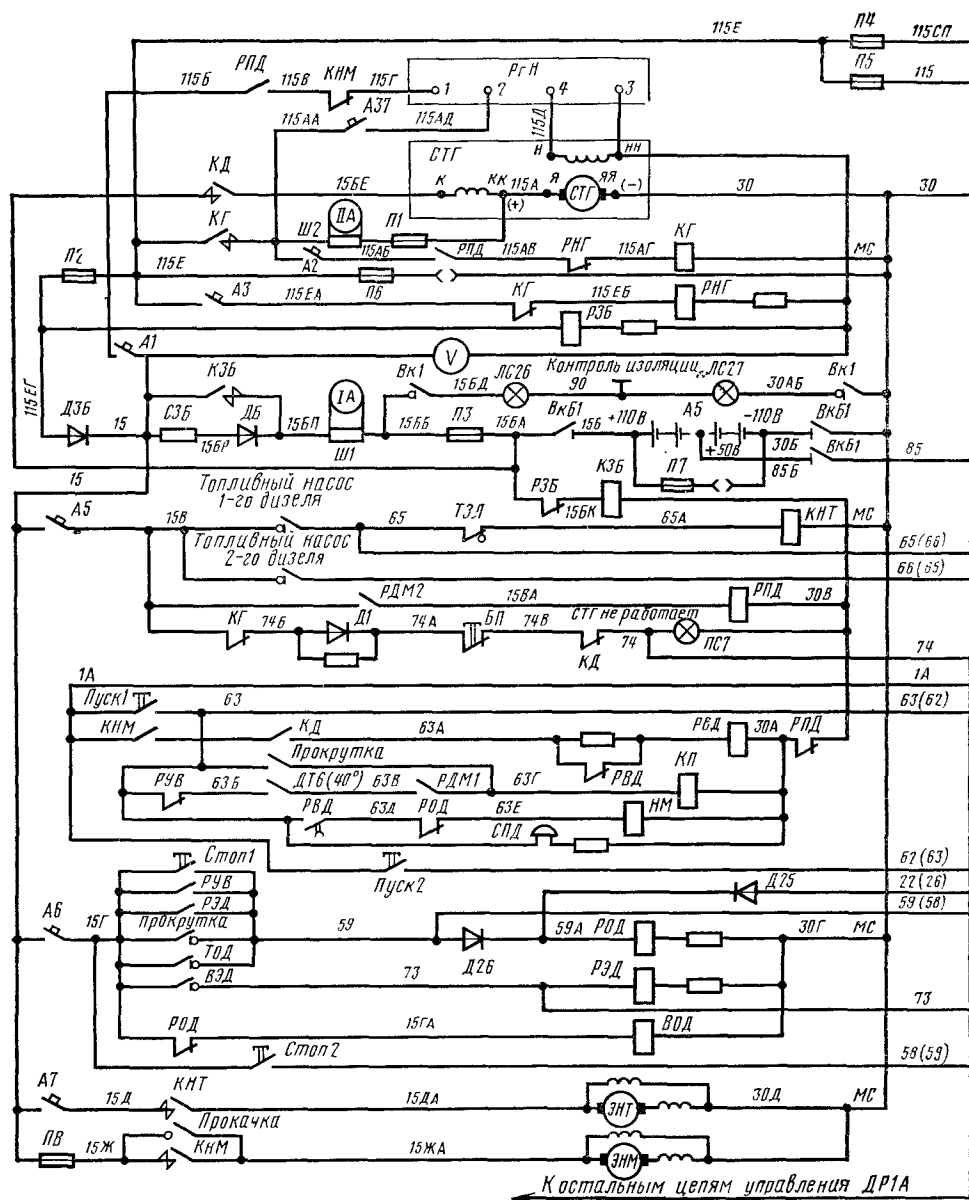


Рис. 166. Схема пуска дизеля и заряда аккумуляторной батареи дизель-поезда ДР1А

Схема пуска дизелей предусматривает ручное управление прокачкой масла и прокруткой вала дизеля при помощи соответствующих тумблеров и размыкание пусковых цепей через 5 с, если пуск не произошел, посредством контактов реле времени *РВД* в цепи катушки контактора *КНМ*.

**Цепи управления и блокирования реверса.** Реверсивный механизм выполняется в виде механических муфт, посредством которых достигается требуемое соединение ведущих и ведомых звеньев гидropередачи. В реверсе широко применяются шлицевые, зубчатые, фрикционные и кулачковые муфты. В большинстве типов реверсивного механизма привод пневматический, а его управление электропневматическое.

Система управления и блокирования реверсивного механизма тепловозов и дизель-поездов с гидропередачей должна удовлетворять основным требованиям.

1. Переключение механизма реверса на новое направление движения не должно быть возможным в условиях, когда: тепловоз находится в движении; заполнены маслом полностью либо частично гидравлические аппараты передачи; давление воздуха в резервуаре управления, питающего сервоцилиндры привода реверсивного механизма, ниже необходимого расчетного значения; частота вращения вала дизеля выше частоты вращения соответствующей нулевой позиции контроллера.

2. Механизм реверса при движении тепловоза должен удовлетворять следующим условиям: переключающие муфты полностью зацеплены, а в случае неполного зацепления тепловоз не может быть приведен в движение; положение реверсивного механизма не должно самопроизвольно изменяться, а также исключается возможность изменения положения муфты машинистом.

3. Для облегчения обслуживания и эксплуатации тепловозов с гидропередачей необходимо иметь: надежную сигнализацию положения реверса; устройство для быстрой ликвидации возникающего в ряде случаев при переключении положения «зуб в зуб»; приспособление, дающее возможность дублировать дистанционное управление в случае выхода из строя либо других специфических обстоятельств. Аналогичным требованиям должен удовлетворять также и режимный механизм гидропередачи маневровых тепловозов.

Эти требования выполняются посредством постановки на тепловозе большого количества вспомогательных и блокирующих механических, пневматических, гидравлических и электрических устройств, причем на разных сериях тепловозов их количество и комбинации различны.

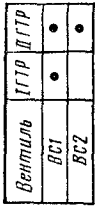
Рассмотрим управление реверс-режимом гидропередачи УГП, наиболее распространенной на тепловозах и дизель-поездах. Переключение реверс-режима гидропередачи производится двумя подвижными муфтами переднего и заднего хода, каждая из которых, перемещаясь в ту или другую сторону от нейтрального положения, включает один из режимов работы гидропередачи — маневровый или поездной. С подвижными муфтами механически связаны переключающие их пневматические сервоцилиндры и специальные контактные барабаны, обеспечивающие контроль переключения реверс-режима (включение муфты возможно только при нейтральном положении другой подвижной муфты).

В системе управления реверс-режимом гидропередачи УГП имеются особенности, обусловленные типом гидропередачи и техническим исполнением системы управления. Гидропередачи УГП750, имеющие гидромуфту, в электрической схеме не имеют цепей доворота, так как он осуществляется за счет действия воздуха, находящегося в гидромуфте. В гидропередачах УГП750/2Т, не имеющих гидромуфты, доворот осуществляется посредством кратковременного наполнения гидротрансформатора, для управления которым в электрическую схему вводится узел доворота. Особенности в принципиальной схеме системы управления реверс-режимом объясняются также и назначением ее для управления одним или двумя тепловозами.

Последовательность операций и срабатывания аппаратов при переключении реверс-режима тепловоза ТГМЗБ с одиночным управлением можно проследить по рис. 167. Процесс переключения реверса или режима гидропередачи УГП 750/2Т выполняют в следующем порядке.

1. Освобождают шток поршня включенного сервоцилиндра от фиксатора путем подачи в него воздуха.

2. Переключают электропневматические вентили, в результате чего включается муфта другого направления движения или другой режим работы под



213

действием давления воздуха в рабочей полости сервоцилиндра, связанного с этой муфтой.

3. Фиксируют шток поршня включенного сервоцилиндра.

Для переключения подвижных муфт реверс-режима необходимо, нажав кнопку *КБР* блокирования реверс-режима, перевести рукоятку реверс-режима *ПКР* в выбранное положение, например, из положения «Поездной вперед» в положение «Поездной назад».

При этом происходят следующие операции.

1. Включается вентиль блокирования реверс-режима *ВБР* через кнопку *КБР*. Воздух от вентиля *ВБР* поступает через блокировочный клапан, пропускающий воздух только при неподвижном состоянии тепловоза к фиксаторам положения сервоцилиндров.

2. Фиксаторы положения сервоцилиндров, поднявшись, расфиксируют штоки, а их конечные выключатели произведут последующие переключения в схеме.

3. Размыкающие контакты *КФВ*, *КФН* разорвут цепь питания катушки реле *РД* и ламп сигнализации *Л1* и *Л4*. Размыкающий контакт *РД* отключает цепь питания катушек вентилях гидropередачи *BC1* и *BC2*, а замыкающий контакт подготавливает цепь питания узла поворота.

4. Замыкающие контакты *КФВ\*\** и *КФН\*\** создадут цепь питания катушки вентиля фиксации рукоятки *ВФР*. Вентиль *ВФР* пропускает воздух в цилиндр блокирования реверса, рукоятка разблокируется и ее можно перевести в выбранное положение.

5. При переводе рукоятки *ПКР* получит питание катушка соответствующего электропневматического вентиля реверс-режима, который, включившись, откроет доступ воздуха из воздушной магистрали в соответствующую полость сервоцилиндра и тем самым включит муфту на выбранный ход и повернет контактный барабан.

6. Во включенном положении муфта заблокируется фиксатором сервоцилиндра, контакты которого *КФН\** и *КФВ\** замкнут цепь питания катушки реле *РД* и ламп сигнализации. Реле *РД* своими контактами коммутирует цепи питания вентилях гидropередачи и узла доворота.

Питание соответствующей лампы сигнализации включения реверса происходит через контакт *КПН* или *КПВ* контактного барабана. Процесс заканчивается замыканием контактами *КФН\*\** и *КФВ\*\** цепи катушки вентиля фиксации рукоятки *ВФР* и тем самым ее блокированием.

При реверсировании двух тепловозов ТГМЗБ или дизель-поезда ДР1 срабатывание аппаратов происходит в аналогичной последовательности через межтепловозное соединение.

В систему переключения реверс-режима гидropередачи УГП750/2Т, как отмечено выше, введен блок реле гидродоворота. Назначение его — обеспечить автоматическое импульсное включение электрогидравлического вентиля первого гидротрансформатора *BC1* для доворота подвижных муфт до включаемого положения при их возможном попадании «зуб в зуб» во время переключения реверс-режима. Блок реле гидродоворота тепловоза ТГМЗБ выполнен на полупроводниковых приборах по схеме мультивибратора.

Электрическая схема блока реле гидродоворота РВД (см. рис. 167) обеспечивает два временно устойчивых состояния, в одном из которых открыт транзистор *T1*, а в другом — транзистор *T2*. В каждом из состояний схема может находиться лишь время, определяемое постоянными времени цепей: *C8* и *KЭ1*; *C9* и *KЭ2*.

Блок реле доворота работает следующим образом. При включении питания (75 В, постоянный ток) на зажимы плюс и минус заряжается конденсатор *KЭ2*. Включение блока производится подачей  $\pm 75$  В на зажим *21*, при этом

транзистор  $T1$  открыт, транзистор  $T2$  закрыт и катушка реле  $P$  обесточена. Конденсатор  $KЭ1$  заряжается через открытый транзистор  $T2$ , а конденсатор  $KЭ2$  заряжается через резисторы  $CЭ$  и  $R_{к1}$ .

По мере разряда конденсатора  $KЭ2$  положительный потенциал на базе транзистора  $T2$  снижается до нуля и транзистор  $T2$  открывается. При этом транзистор  $T1$  закрывается, включается реле  $P$  и своими замыкающими контактами замыкает цепь питания электрогидравлического вентиля гидротрансформатора первой ступени  $BC1$ . Продолжительность этого состояния определяется временем разряда конденсатора  $KЭ1$  через резисторы  $C8$  и  $R_{к2}$ . Одновременно с этим происходит заряд конденсатора  $KЭ2$ . В момент завершения разряда конденсатора  $KЭ1$  открывается транзистор  $T1$ , а  $T2$  закрывается. Реле  $P$  отключается, в результате чего первый гидротрансформатор опорожняется в течение разряда конденсатора  $KЭ2$ .

Импульсный режим работы блока продолжается до прекращения подачи питания на зажим  $21$ . Импульсное включение реле  $P$  на  $1,5$  с через каждые  $3$  с обеспечивается выбором элементов схемы и настройкой посредством переменных резисторов  $C8$  и  $C9$ . Тумблер  $TВ1$  используется для отключения блока при проверке мегаомметром сопротивления изоляции электрических цепей тепловоза во избежание пробоя транзисторов.

**Цепи трогания тепловозов и дизель-поездов.** Для трогания тепловоза с места включается кнопка «Управление гидропередачей» (см. рис. 167) и переводится рукоятка контроллера в 1-ю позицию. Предварительно убеждаются по сигнальным лампам о включении реверс-режима в выбранном направлении движения и положении переключателя  $ПкА$ . Нормальное положение его — «Автоматика». Цепь трогания тепловоза собирается на питание электрогидравлического вентиля первого гидротрансформатора  $BC1$ : от кнопки «Управление общим  $KУ$ »; предохранитель  $П$ , замыкающий контакт реле  $РД$ , контакт контроллера  $КМ$ , размыкающий контакт реле  $РПрС$ , кнопка «Управление гидропередачей»  $КГ$ , контакт  $ПкА$ , зажим  $8/2$ , катушка вентиля  $BC1$ .

Трогание и разгон тепловозов и дизель-поездов происходят на гидротрансформаторе первой ступени скорости. Переход с одной ступени скорости на другую производится системой автоматического управления САУ гидропередачи.

**Устройства и цепи автоматической защиты.** Устройства защиты: 1) позволяют в определенной последовательности выполнять коммутацию аппаратов и машин, необходимую для осуществления заданного режима работы; 2) поддерживают на заданном уровне или изменяют по заданной программе в рабочем режиме некоторые параметры машин автоматически; 3) обеспечивают защиту элементов энергетической цепи и локомотивной бригады от аварийных и опасных режимов работы.

Защитные функции выполняются контактами коммутационных аппаратов и аппаратов автоматики (контакты реле времени, концевых выключателей, реле и т. д.). Функции второй группы осуществляются регуляторами (регулятор напряжения ВГ, автоматики гидропередачи).

К третьей группе относятся специальные аппараты, включаемые в защищаемую ими цепь (автоматические выключатели, плавкие предохранители). В большинстве случаев защитными аппаратами являются специальные реле, реагирующие на изменение контролируемой величины (давления, температуры, уровня и т. д.) и воздействующие на катушки коммутационных аппаратов.

Элементы и системы автоматической защиты энергетической цепи при превышении допустимых пределов некоторых параметров воздействуют на режим ее работы, снимая с нее нагрузку или полностью ее выключая. Если кратковременному отклонению контролируемой величины от допустимых пределов

не сопутствует аварийный режим, то во многих случаях отключение элементов энергетической цепи является нежелательным и поэтому ограничиваются звуковой или световой сигнализацией. В этом случае эффективность устранения ненормального режима зависит от опыта машиниста и условий его работы. Более эффективным является воздействие защитного аппарата на соответствующую цепь в направлении уменьшения контролируемых величин до допустимого предела.

Эти общие принципы автоматической защиты, кстати сказать, общие как при гидропередаче, так и при электропередаче, широко представлены в технической реализации на тепловозах и дизель-поездах ДР.

#### 47. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СТУПЕНЕЙ ГИДРОПЕРЕДАЧИ

Система автоматического управления (САУ) гидропередачи предназначена для автоматического переключения ступеней скорости в расчетных точках тяговой характеристики тепловоза. САУ гидропередачи должна обеспечивать реализацию высоких тяговых и экономических свойств тепловоза в зоне переключения смежных ступеней скорости при работе дизеля на всех режимах мощности и изменяющихся условиях движения. Практически это требование определяется мерой использования касательной мощности тепловоза в зоне переключения.

Тяговые и экономические свойства тепловоза зависят как от особенностей энергетической установки, так и от выбора моментов переключения ступеней, представляемых на тяговой характеристике в виде графика переключения ступеней скорости. Расчетный график переключения может быть реализован только при высокой точности и устойчивости системы автоматического управления гидропередачи.

Все существующие САУ гидропередачи по физической природе чувствительных элементов могут быть разделены на три группы: механические, гидравлические и электрические. В механических и гидравлических САУ чувствительным элементом является соответственно центробежный измеритель и масляный шестеренный или центробежный насос. В известных электрических САУ в качестве чувствительного элемента применяется, как правило, тахогенератор. Электрические САУ в сравнении с механическими и гидравлическими обладают рядом положительных качеств: быстродействием, возможностью реализации устойчивого расчетного графика переключения ступеней скорости, простотой монтажа и настройки.

Независимо от физической природы элементов САУ могут быть сформулированы общие принципы автоматизации гидропередачи тепловоза. САУ гидропередачи в структурном отношении представляет собой замкнутую систему, состоящую из цепи звеньев направленного действия (см. гл. 1), где гидропередача является объектом регулирования. Гидропередача входит в энергетическую цепь тепловоза. В этой цепи воздействие дизеля на САУ гидропередачи следует рассматривать как корректирующее воздействие. Основным внешним воздействием на САУ является сопротивление движению поезда.

Процесс переключения ступеней скорости по своей природе нелинейный. В САУ эта нелинейность выполняется релейным элементом (рис. 168), в качестве которого используется двухпозиционное реле. Управляющий сигнал  $U$ , который представляет собой сигнал по скорости движения  $v$  (регулируемая величина), изменяемый по позициям контроллера корректирующим воздействием со стороны дизеля  $n_{кор}$ , воспринимается реле, на выходе которого реализуется скачком регулирующее воздействие  $\delta(U)$ . В распределительном элементе — клапане переключения или золотниковой коробке поднимается уровень энергии регулирующего воздействия до  $\Delta(U)$  и направляется на переключение ступеней скорости гидропередачи.

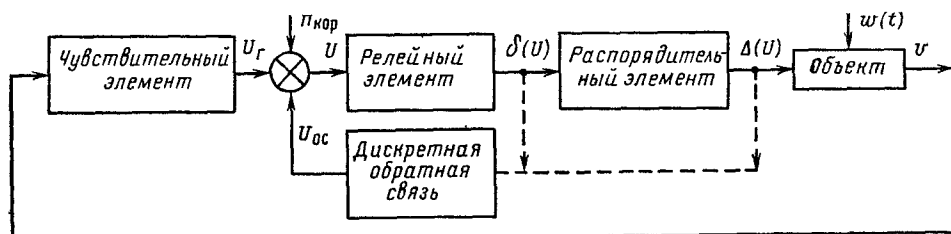


Рис. 168. Функциональная схема САУ гидропередачи тепловоза

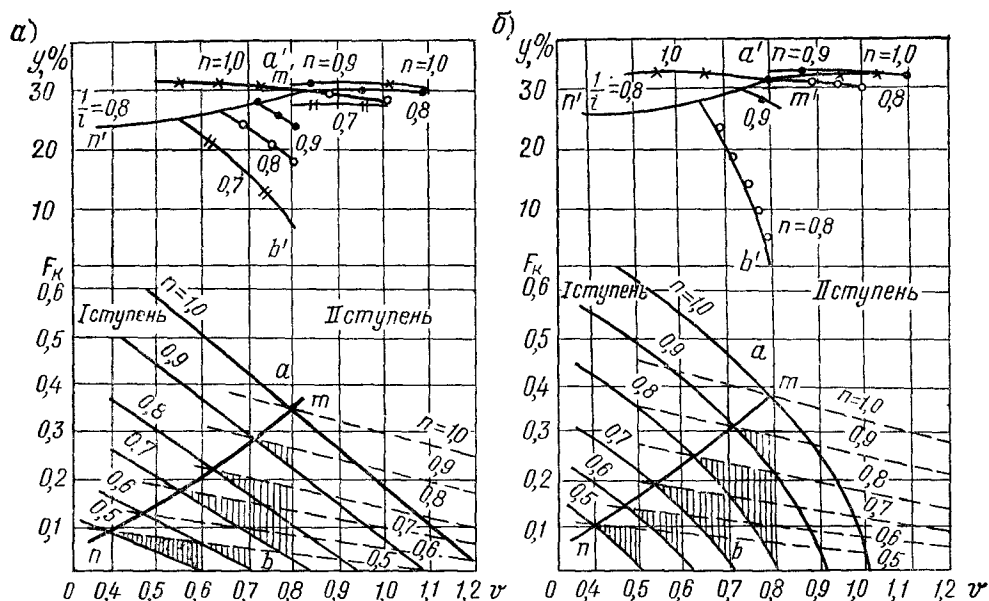


Рис. 169. Тяговые и экономические характеристики тепловоза с гидропередачей:  
 а — из некомплексных гидротрансформаторов; б — из комплексных гидротрансформаторов (параметры в относительных единицах)

Переход с одной ступени скорости на другую происходит при определенном передаточном отношении гидротрансформаторов  $(1/i)_r$ , соответствующем допустимому техническими условиями оптимальному значению к. п. д. гидротрансформаторов  $\eta_r$ . С уменьшением мощности дизеля это значение  $(1/i)_r$  будет смещаться в сторону меньших скоростей движения. Смещение точек переключения, определяемых одним и тем же значением  $(1/i)_r$  при различных режимах мощности дизеля, достигается введением в САУ гидропередачи специального корректирующего устройства. В зависимости от физической природы основных элементов САУ корректирующее устройство может быть выполнено в виде сопротивления, пружины, масляного насоса или пневматического устройства, изменяющих свои параметры с изменением режима работы дизеля.

Таким образом, по способу реализации управляющего сигнала все САУ могут быть разделены на две основные группы:

1) двухкоординатные САУ, обеспечивающие переключение ступеней скорости по закону, выражаемому уравнением квадратичной параболы:

$$\left(\frac{1}{i}\right)_r^2 = \text{idem} \text{ или } \left(\frac{1}{i}\right)_r = \text{idem}. \quad (72)$$

Как показано, в таких САУ основной сигнал — скорость движения тепловоза — подвергается коррекции со стороны дизеля. Иногда такие САУ неправильно называют двухимпульсными;

2) однокоординатные САУ, производящие переключения при одном и том же значении скорости движения. Закон переключения таких САУ выражается уравнением

$$v_n = \text{idem} \quad (73)$$

Целесообразность применения САУ той или иной группы применительно к различным типам гидротрансформаторов и системам регулирования дизеля можно проследить на тягово-экономических характеристиках тепловоза

Графики переключения ступеней скорости (рис. 169), выражаемые законом  $1/i = 0,8 = \text{idem}$ , представлены на тяговых характеристиках кривыми  $m-n$ , а на экономических характеристиках — кривыми  $m'-n'$ . На графике видно, что для обоих типов гидротрансформаторов при всережимном регулировании дизеля двухкоординатные САУ обеспечивают плавное изменение силы тяги и к. п. д. тепловоза при работе дизеля на всех режимах мощности. Отклонение точек переключения от кривых  $m-n$  и  $m'-n'$  приводит к нарушению плавности кривых силы тяги в стыке смежных ступеней скорости и ухудшению тяговых и экономических свойств тепловоза в зоне переключения.

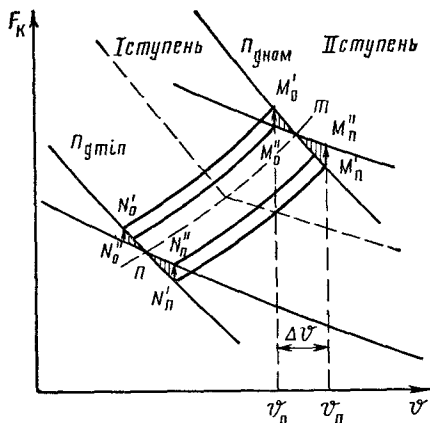


Рис. 170. График переключения ступеней скорости гидропередачи с учетом коэффициента возврата

к работе по закону  $v_n = idem$ , обусловило переключение скорости только при частоте вращения вала дизеля  $n_d \geq 1200$  об/мин. В итоге автоматизация гидропередачи способствует повышению тяговых и экономических свойств тепловоза в зоне переключения только при построении двухкоординатной САУ; реагирующей на скорость движения тепловоза с коррекцией со стороны дизеля.

Рассмотренные графики переключения ступеней скорости раскрывают принципиальные особенности САУ. Эти графики построены в предположении безынерционности элементов САУ и не отражают влияния ее основных параметров на качества переходного процесса в ней. Практически в замкнутой электрической САУ инерционным звеном является гидропередача. Ее инерционность определяется постоянной времени, характеризующей длительность процесса переключения. Поясним кратко физический смысл основных параметров САУ.

Ступени скорости многоциркуляционной гидропередачи переключаются путем наполнения и опорожнения смежных гидроаппаратов. Если процессы наполнения и опорожнения смежных гидроаппаратов не совмещены и растянуты во времени, то в переходном процессе САУ будет иметь место значительное уменьшение передаваемого вращающего момента, а значит, и снижение силы тяги и скорости движения тепловоза. Под *постоянной времени гидропередачи* понимается длительность перехода от одного установившегося значения вращающего момента на выходном валу гидропередачи до нового установившегося значения его при работе на смежных ступенях скорости. Уменьшение постоянной времени гидропередачи может быть достигнуто совершенствованием системы слива и наполнения гидроаппаратов, а также выбором рационального их совмещения.

Инерционность гидропередачи обуславливает то, что прямое (с низшей ступени на высшую) и обратное (с высшей ступени на низшую) переключения практически не могут быть осуществлены в одной точке. Прямое и обратное переключения, как правило, устанавливаются соответственно справа и слева от точки пересечения кривых силы тяги в точках; характеризуемых значениями скорости движения  $v_n$  и  $v_0$  (рис. 170). График переключения ступеней скорости при  $(1/t)_r = idem$  выражается линиями  $M_n - N_n$  (прямой переход) и  $M_0 - N_0$  (обратный переход). Заштрихованные области характеризуют недоиспользование касательной мощности тепловоза в зоне переключения.

Отношение «пороговых» значений скорости движения, соответствующих включению и отключению релейного элемента; определяет второй основной параметр САУ — коэффициент возврата  $k_B$ :

$$k_B = \frac{v_0}{v_n} = 1 - \frac{\Delta v}{v_n}, \quad (74)$$

где  $v_n$  — пороговая скорость движения тепловоза в момент прямого переключения (включение реле);  
 $v_0$  — пороговая скорость движения тепловоза в момент обратного переключения (отключение реле);  
 $\Delta v$  — уменьшение скорости движения в процессе переключения, допустимое по настройке САУ.

Для однокоординатных САУ; производящих переключения по  $v_n = 0,8 = idem$ ; графики переключения ступеней скорости обозначены на рис. 169 прямыми  $a-b$  и  $a'-b'$ . Очевидно, что при всережимной системе регулирования дизеля независимо от типа применяемых гидротрансформаторов переключение ступеней скорости по графику  $v_n = idem$  сопровождается значительным снижением силы тяги и к. п. д. тепловоза при работе на режимах частичной мощности. Заштрихованные площади характеризуют меру недоиспользования касательной мощности тепловоза на каждом режиме его работы. Ступенчатость кривых силы тяги и к. п. д. в зоне переключения увеличивается при уменьшении мощности дизеля. Переключения ступеней скорости не происходит для некомплексных гидротрансформаторов при  $n_d < 0,67$  и для комплексных гидротрансформаторов при  $n_d < 0,8$ .

Эти результаты подтверждаются опытом эксплуатации тепловозов ТГ102 с гидропередачей типа Л60, состоящей из комплексных гидротрансформаторов. Устранение в САУ этих тепловозов корректора; т. е. приведение этой САУ

Значение  $k_b$  может изменяться в пределах  $0 < k_b < 1$ . При эксплуатации тепловозов с гидропередачей изменение коэффициента возврата САУ является единственным эффективным способом влияния на тягово-экономические свойства гидропередачи. Весьма важно определить оптимальное значение  $k_b$ , необходимое для правильной настройки САУ. Экономически целесообразно стремиться к более высокому значению  $k_b$ . Однако при высоком значении  $k_b$  увеличивается вероятность возникновения автоколебаний системы; так называемая «звонковая» ее работа, что практически недопустимо, так как приводит к недоиспользованию касательной мощности тепловоза и снижению экономичности его работы. Оптимальное значение  $k_b$  может быть определено расчетом с учетом условий работы тепловоза.

Одним из возможных способов улучшения качества переходных процессов САУ является введение в ее структуру положительной обратной связи (см. рис. 168). В электрической САУ такая связь должна быть дискретной, действующей только в процессе переключения. Простейшим средством дискретной положительной обратной связи в электрической САУ является реле времени и управляемое им сопротивление в цепи катушки измерительного реле. Примером такой электрической САУ является система автоматики тепловоза ТГМЗ (см. п. 48).

Действие положительной обратной связи заключается в том, что входная величина реле (ток в его катушке) в момент включения увеличивается и отпадение реле в переходном процессе задерживается на время включения положительной обратной связи. При этом коэффициент возврата реле уменьшается. Очевидно, что при наличии дискретной положительной обратной связи возможные автоколебания подавляются уменьшением их частоты. С изменением внешних воздействий система переходит в устойчивый режим работы.

В итоге оптимальные качества переходного процесса САУ гидропередачи; выражаемые его длительностью и формой, а также тягово-экономическими свойствами тепловоза в зоне переключения, могут быть достигнуты тремя способами: уменьшением постоянной времени гидропередачи; точным определением оптимальных значений параметров САУ, необходимых для ее настройки; введением в САУ дискретной положительной обратной связи.

#### 48. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОПЕРЕДАЧЕЙ

На отечественных тепловозах и дизель-поездах с гидропередачей получили преимущественное применение электрические системы автоматического управления (САУ).

Основным элементом электрической САУ наряду с тахогенератором является измерительный элемент (реле и измерительная схема). Качествами этого элемента определяются такие достоинства всей САУ, как точность и стабильность переключений и их устойчивость, а также простота настройки. Промежуточные элементы, выполняющие функции релейных усилителей, должны обеспечивать быстрое действие, стабильность и необходимую меру повышения уровня энергии передаваемого управляющего воздействия.

По способу реализации релейных элементов электрические САУ можно разделить на три группы: релейно-контактные САУ, релейным элементом в которых является контактное электромагнитное реле; смешанные САУ; в которых часть электрических элементов являются контактными; а другая часть — бесконтактными; бесконтактные САУ; построенные на бесконтактных магнитных и полупроводниковых приборах.

**Релейно-контактные САУ.** Такие САУ впервые применены на тепловозах ТГМЗ; ТГ100, ТГ102 с отечественными гидропередачами. САУ этих тепловозов принципиально одинаковы. Они отличаются только типами элементов.

Датчиком скорости движения тепловоза (рис. 171) является тахогенератор ТГ; якорь которого приводится во вращение от выходного вала гидропередачи. В цепь обмотки возбуждения тахогенератора включен последовательно корректирующий реостат  $R_k$ , сопротивление которого определяется положением вала контроллера. Следовательно, управляющий сигнал на переключение ступеней скорости определяется соотношением двух координат: частоты вращения выходного вала гидропередачи (скорости движения тепловоза) и частоты вращения вала дизеля.

На напряжение тахогенератора включено измерительное реле РС. При определенном напряжении тахогенератора реле РС включается и своими контактами производит коммутацию электропневматических вентилей ВП1 и ВП2, т. е. осуществляет переключение ступеней скорости гидропередачи.

Параллельно катушке вентилей ВП1 включена катушка электромагнитного реле времени РВ. При трогании тепловоза с места одновременно с включением вентилей ВП1 срабатывает реле времени РВ и своим замыкающим контактом шунтирует резистор С2П в цепи катушки измерительного реле РС. При включении реле РС обесточивается катушка реле времени РВ, а через 3—5 с размыкаются его замыкающие контакты и в цепь об-

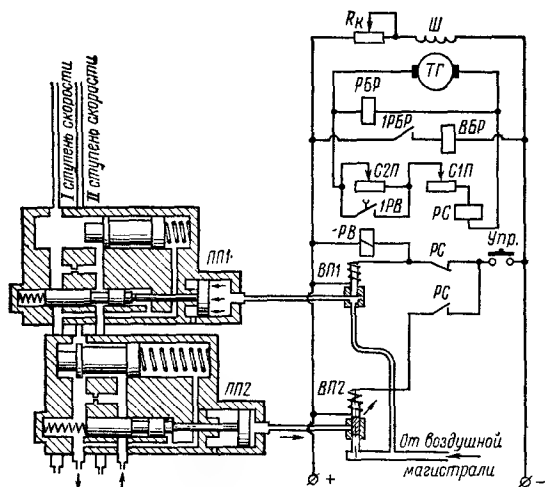


Рис. 171. Электрическая релейно-контактная САУ гидропередачи тепловоза ТГМЗ:

ПП1 и ПП2 — распределительная коробка с клапаном включения первой и второй ступеней

Смешанной системой автоматики с применением кремниевых стабилизаторов являются САУ УГП изготовления Калужского машиностроительного завода. Она выполняется в двух вариантах: на два перехода для гидропередачи УГП 750-1200 и на один переход для гидропередачи УГП 750/2Т. Оба варианта САУ построены одинаково как по принципу работы, так и по элементам технического исполнения.

Рассмотрим принцип работы САУ УГП 750/2Т тепловозов ТГМЗБ (см. рис. 167). Датчик скорости *D*, кинематически связанный с выходным валом гидропередачи, создает напряжение, пропорциональное скорости движения. Напряжение датчика после выпрямителя и сглаживающего фильтра подается на корректирующий реостат, с переменного участка которого снимается напряжение, пропорциональное скорости движения и частоте вращения вала дизеля. На это напряжение включен кремниевый стабилизатор *СТ* (Д814), последовательно с которым включена катушка реле *РБС*. При определенной скорости движения, устанавливаемой по характеристике переключения для соответствующего режима работы дизеля, напряжение, снимаемое с реостата *РР*, достигает напряжения пробоя стабилизатора *СТ*. Он переходит в состояние «пробоя», при котором в катушке реле *РБС* протекает ток.

Реле *РБС* (поляризованное реле типа РПС 11/7) включается, производя через промежуточное реле *РП* соответствующие переключения электрогидравлических вентилей, управляющих наполнением гидроаппаратов. При снижении напряжения датчика *Д*; подаваемого на стабилизатор и катушку реле *РБС*, до установленного, стабилизатор запирается и реле *РБС* отключается, производя обратный переход. Коэффициент возврата регулируется резистором в цепи катушки реле *РБС*, включаемым размыкающим контактом реле *РП* при его срабатывании.

На тепловозах ТГМ3А и ТГМ3Б, работающих по системе двух единиц, управление процессом переключения ступеней скорости обеих гидропередач производится САУ ведущего тепловоза. В схемах тепловозов и дизель-поездов предусмотрен переход на ручное переключение ступеней в случае выхода из строя системы автоматики.

**Бесконтактные САУ.** В электрических САУ бесконтактные магнитные и полупроводниковые элементы применяются в различных сочетаниях, образуя вариации схем бесконтактной САУ. По принципу образования основного измерительного элемента бесконтактные САУ могут быть разделены на три основные группы: бесконтактные САУ на полупроводниковых приборах; бесконтактные САУ на бесконтактных магнитных реле (БМР); комбинированные бесконтактные САУ, в которых, как правило, БМР используется для образования требуемой релейной характеристики; а полупроводниковые приборы — для усиления управляющего воздействия. Бесконтактные САУ не получили пока широкого применения в серийных тепловозах. Опытные разработки таких систем описаны в литературе [6].

# ГЛАВА 11

## НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ТЕПЛОВОЗОВ

---

### 49. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ И СИСТЕМ

Если отказы независимы и происходят в случайные моменты времени и среднее значение числа отказов одинаково для равных по длительности периодов работы, то *вероятность безотказной работы* устройства определяется экспоненциальной зависимостью

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  — *интенсивность отказов*;

$e$  — основание натуральных логарифмов ( $e = 2,7182$ );

$t$  — время работы, для которого определяется надежность.

Выражение  $P(t)$  представляет собой вероятность того, что устройство с интенсивностью отказов  $\lambda$  не откажет в течение времени  $t$ . При предварительной оценке надежности устройства удобно пользоваться обратной величиной, называемой *средней наработкой на отказ*  $T_0 = 1/\lambda$ .

При определении надежности устройства обычно требуется найти вероятность безотказной работы в течение интересующего отрезка времени, длительность которого всегда много меньше средней наработки на отказ. Система, состоящая из  $n$  одинаковых элементов, у каждого из которых средняя наработка на отказ  $T_0$ , будет иметь среднюю наработку на отказ  $T_0/n$ , если отказ любого из этих элементов вызывает отказ системы (последовательное соединение). Это замечание относится и к неоднотипным элементам, если под  $T_{0i}$  понимать среднее значение наработок на отказ неоднотипных элементов.

Для оценки надежности сложной системы (тепловоз или его узлы) в первую очередь необходимо установить, каким образом отдельные узлы влияют на безотказность системы в целом. Обычно считают, что система отказывает при отказе хотя бы одного входящего в нее элемента и отказы отдельных элементов независимы. В этом случае  $P(t)$  нерезервированной системы с учетом только внезапных отказов при условии, что все элементы работают одновременно, может быть определена по выражению

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) \dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t),$$

где  $n$  — число элементов, составляющих систему;

$p_i(t)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Таким образом, надежность любой системы определяется произведением вероятностей безотказной работы входящих в нее элементов  $p_1(t) \dots p_n(t)$ . Для оценки надежности системы в целом без разбивки ее на звенья или смысловые блоки можно использовать суммарную интенсивность отказов системы  $\Lambda$ , равную сумме интенсивностей отказов входящих в нее элементов:  $\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$  или с учетом количества элементов ( $N_i$ ), имеющих одинаковую  $\lambda$ ,

$$\Lambda = N_1 \lambda_1 + N_2 \lambda_2 + \dots + N_n \lambda_n.$$

Обычно локомотивная система объединяет несколько групп аналогичных элементов. Для любых элементов интенсивность отказов, а следовательно, и надежность зависят от режимов работы и времени. На первом этапе расчета при определении надежности только с учетом внезапных отказов, когда еще не известны режимы работы, можно предположить, что все элементы системы работают в номинальном режиме, т. е. интенсивность отказов у них постоянна.

В результате замены и ремонта элементов аппарата восстанавливается и приходит в такое состояние, когда вероятность возникновения износового отказа незначительна. Система с правильно выбранным периодом профилактики практически не стареет и, несмотря на то что остается некоторая интенсивность внезапных отказов, в общем весьма надежна.

В сложных системах, состоящих из множества элементов, соединенных различным способом, в процессе эксплуатации некоторые элементы работают непрерывно, другие — только в определенные промежутки времени, третьи — выполняют лишь короткие операции включения или выключения. Следовательно, в течение заданного промежутка времени лишь у части элементов время работы совпадает с временем работы системы, другие же работают более короткое время. Поэтому для расчета наработки заданной системы рассматривается только время, в течение которого элемент включен. Такой подход возможен, если допустить, что в течение периодов, когда элементы не включены в работу системы, интенсивность их отказов равна нулю.

С точки зрения надежности наиболее распространена схема последовательного соединения элемента. В этом случае при расчете используется правило произведения надежностей

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t_i),$$

где  $p_i(t_i)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента, который включается на  $t_i$  из общего времени работы системы  $t$ .

Для расчетов может быть использован так называемый *коэффициент занятости*, равный отношению работы элемента ко времени работы системы  $d_i = t_i/t$ . Практический смысл этого коэффициента состоит в том, что для элемента с известной интенсивностью отказов  $\lambda_i$  интенсивность отказов в системе с учетом времени работы составит  $\lambda = \lambda_i d_i$ . Такой же подход может быть использован по отношению к отдельным узлам системы.

Другим фактором, который следует учитывать при анализе надежности системы, является уровень рабочей нагрузки, с которой элементы работают в системе, так как он в значительной мере определяет ожидаемую интенсивность отказов. Интенсивность отказов элементов существенно меняется даже при небольших изменениях рабочей нагрузки, действующей на них.

Элементы проектируются так, чтобы они могли выдержать номинальные нагрузки. При эксплуатации элементов в условиях номинальных нагрузок наблюдается определенная закономерность интенсивности их внезапных отказов. Эта интенсивность называется *номинальной интенсивностью внезапных отказов* элементов и является исходной величиной для определения действительной интенсивности внезапных отказов реального элемента (с учетом времени работы и рабочей нагрузки).

Для реального элемента или системы в настоящее время учитываются три основных воздействия окружающей среды; механические, тепловые и рабочие нагрузки. Влияние механических воздействий учитывается коэффициентом  $k_\lambda$ , величина которого определяется местом установки аппаратуры и может быть принята равной для: лабораторий и благоустроенных помещений — 1;

стационарных наземных установок — 10; железнодорожного подвижного состава — 30.

Номинальная интенсивность внезапных отказов должна быть увеличена в  $k_\lambda$  раз в зависимости от места установки аппарата в эксплуатации. Другие виды нагрузок и внешних воздействий учитываются при определении показателей надежности конкретных машин и аппаратов (см. ниже).

Существенное сокращение интенсивности внезапных отказов достигается в том случае, когда элементы работают при нагрузках ниже номинальных. Номинальному режиму соответствует температура  $80^\circ\text{C}$  и 100% рабочей нагрузки. Если расчетные параметры элемента отличаются от номинальных, можно определить увеличение  $\lambda$  для выбранных параметров и получить отношение  $\lambda_p/\lambda_0$ , на которое и следует умножить интенсивность отказов рассматриваемого элемента.

Высокая надежность может быть заложена при проектировании элементов и систем. Для этого необходимо стремиться к уменьшению температуры элементов при работе и применять элементы с повышенными номинальными параметрами, что равносильно снижению рабочих нагрузок. Увеличение стоимости изготовления изделия в любом случае окупается за счет сокращения эксплуатационных расходов.

Чтобы определить реальную интенсивность отказов элементов, необходимо хорошо представлять ожидаемые уровни нагрузок, при которых элементы будут работать, рассчитать электрические и тепловые параметры с учетом переходных режимов. Правильное выявление нагрузок, воздействующих на отдельные элементы, приводит к значительному повышению точности расчета надежности.

## 50. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ

**Надежность электрических машин.** Вероятность безотказной работы электрической машины можно представить как произведение вероятностей безотказной работы ее отдельных узлов. Выделим для рассмотрения основные части машин: обмотки, щеточный аппарат, подшипниковые узлы. Тогда

$$P = p_1 p_2 p_3,$$

где  $p_1, p_2, p_3$  — вероятность безотказной работы соответственно обмоток, щеточного аппарата, подшипниковых узлов.

Значение  $p_1$  может быть вычислено, если известны срок службы изоляции или интенсивность ее отказов. Срок службы изоляции определяется в основном ее перегревом во время работы

$$t_x = t_0 e^{-\frac{B}{273 + \Delta\theta}} = t_0 e^{-\alpha \Delta\theta_x},$$

где  $t_0$  — нормальный срок службы изоляции при температуре не выше допускаемой классом изоляции (для промышленных машин принимается равным 100 000 ч);

$\Delta\theta_x$  — перегрев машины;

$\alpha$  — коэффициент, зависящий от класса изоляции и имеющий следующие значения:

| Класс изоляции                        | У     | А     | Е     | В     | Ф     | Н     |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha, 1/^\circ\text{C}$            | 0,057 | 0,032 | 0,058 | 0,073 | 0,083 | 0,085 |
| Допустимый перегрев, $^\circ\text{C}$ | 90    | 105   | 120   | 130   | 155   | 180   |

Температура перегрева электрической машины зависит от ее мощности и температуры окружающей среды. В свою очередь коэффициент теплоотдачи от нагретых частей машины к охлаждающему воздуху является функцией ее скорости и может быть вычислен по выражению

$$\mu = \mu_0 (1 + \eta/\bar{V}),$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий степень участия поверхности двигателя в охлаждении ( $\eta = 0,4 \div 0,8$ );

$V$  — скорость воздуха, охлаждающего машину (может быть определена по подаче вентилятора);

$\mu_0$  — коэффициент теплоотдачи ( $\text{Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) поверхности машины воздуху ( $\mu_0 = 14,2$  для металлических поверхностей машины,  $\mu_0 = 13,3$  для покрытых лаком поверхностей катушек, шин, якоря).

Потери мощности в электрической машине определяются расчетным путем [1], причем учитываются все виды потерь энергии. Значение мощности потерь определяет приращение температуры обмотки электрической машины, так как

$$\Delta\theta_x = \frac{R_{\text{пот}}}{R_0} = \frac{P_{\text{пот}}}{\mu S},$$

где  $S$  — поверхность машины, охлаждаемая воздухом от вентилятора.

Подставив значение  $P_{\text{пот}}$  и  $\mu$ , получим ожидаемый перегрев машины

$$\Delta\theta_x = \theta_x - \theta_{\text{кр}} = c_p P_{\text{пот}},$$

откуда определится срок службы изоляции с учетом перегревов

$$t_x = t_0 \exp \{-\alpha [\Delta\theta_x - \Delta\theta_{\text{max}}]\}$$

и, следовательно,

$$\lambda_{1x} = \lambda_0 \exp [-\alpha (c_p P_{\text{пот}} - \Delta\theta_{\text{max}})].$$

Значение  $\lambda_0$  соответствует выбранному сроку службы изоляции либо определяется из таблицы, содержащей интенсивности отказов. Вероятность  $p_1 = e^{-\lambda_{1x} t}$ .

Вероятность безотказной работы щеточного аппарата определяется с учетом вибрации щетки на коллекторе машины и износа ее с нарушением контакта. Если на поверхности коллектора или колец имеются неровности, могут возникать разрывы цепи тока вследствие отхода щеток. Если масса щетки совместно с приведенной к ней массой пружин щеткодержателя равна  $m$ , собственная частота колебаний щетки

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}},$$

где  $c$  — жесткость пружин щеткодержателя.

Необходимо, чтобы частота воздействия на щетку

$$f_x = \frac{z}{T_{\text{об}}} = zn'$$

не совпадала с собственной частотой колебания щетки  $f_0$  ( $z$  — число неровностей по окружности коллектора, которое может быть принято равным числу коллекторных пластин;  $n'$  — частота вращения, об/с). Это условие должно соблюдаться во всем диапазоне рабочих скоростей машины от  $n_{\text{min}}$  до  $n_{\text{max}}$  и при допустимых пределах износа щетки, выражающегося в уменьшении ее массы ( $\Delta m_m$ ). При износе щетки по высоте на  $\Delta h$  меняется усилие нажатия на

| Щетки                  | Марка  | Плотность тока, А/см² | Окружная скорость, м/с | Удельное нажатие, кПа |
|------------------------|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Угольно-графитные      | T2, T6 | 6                     | 10                     | 19,6+20,5             |
| Графитные              | Г1     | 7                     | 12                     |                       |
|                        | Г3     | 10—11                 | 25                     | 19,6+20,5             |
|                        | 611M   | 10—11                 | 40                     |                       |
| Электрографитированные | ЭГ2    | 10                    | 45                     | 19,6+20,5             |
|                        | ЭГ4    | 12                    | 40                     | 14,7+19,6             |
|                        | ЭГ8    | 10                    | 40                     | 19,6+39,2             |
|                        | ЭГ14   | 10+11                 | 40                     | 19,6+39,2             |
|                        | ЭГ61   | 10+12                 | 40                     | 19,6+20,5             |
|                        | ЭГ74   | 10+15                 | 50                     | 17,1+20,5             |
| Медно-графитные        | M1     | 15                    | 25                     |                       |
|                        | M3     | 12                    | 20                     |                       |
|                        | M6     | 15                    | 25                     | 14,7+20,5             |
|                        | M20    | 12                    | 20                     |                       |

щетку:  $F_R = F_{R0} - c\Delta h$ . Износ щетки связан с рядом других величин, характеризующих конструкцию и условия работы машины

$$S_{\text{щ}}\Delta h = kP_{\text{max}}2\pi R_R V^2 T.$$

Здесь  $P_{\text{max}}$  — нажатие на щетку;  
 $R_R$  — радиус коллектора или кольца;  
 $T$  — время работы;  
 $V$  — окружная скорость коллектора.

Здесь могут быть приняты постоянными все величины, кроме  $T$ ,  $P$  и  $V$ . Тогда максимальный износ щетки определяется в основном произведением  $P_1 V_1^2 T_1 = P_2 V_2^2 T_2$  или, переходя к интенсивности отказов, можно записать

$$\lambda_{2x} = \lambda_{20} \frac{P_x V_x^2}{P_0 V_0^2}.$$

Интенсивность отказа щетки  $\lambda_{20}$  может быть принята для тепловозных машин  $5,5 \cdot 10^{-6}$  1/ч. Параметры  $P_0$  и  $V_0$  выбираются в зависимости от марки щеток (табл. 21).

Вероятность  $p_3$  определяется при выборе подшипника по коэффициенту работоспособности [11]  $c = Q(nh)^{0,3}$ .

Здесь  $Q = Q_{\text{эв}} k_B k_K k_T$ , а

$$Q_{\text{эв}} = \sqrt[3,33]{\alpha_1 + \beta_1 Q_1^{3,33} + \alpha_2 \beta_2 Q_2^{3,33} + \dots},$$

где  $\alpha_1$  — доля продолжительности работы с частотой вращения  $n_1$ ;

$Q_i$  — нагрузка, соответствующая  $n_i$ ;

$\beta_i$  — отношение частоты вращения при соответствующем режиме к максимальной частоте вращения  $n_{\text{max}}$ ;

$k_B, k_K, k_T$  — коэффициенты соответственно безопасности, кинематический и температурный.

Выбранному по коэффициенту работоспособности подшипнику соответствует интенсивность отказов  $\lambda_0$ . При изменении режимов работы  $\lambda_x = \lambda_0 \sqrt{\frac{Q_x n_x^{0,3}}{Q_1 n_1^{0,3}}}$ , а ожидаемая вероятность безотказной работы  $p_3 = e^{-\lambda_3 x^t}$ .

Общая для электрической машины вероятность безотказной работы

$$p = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) t} = p_1 p_2 p_3.$$

**Надежность электромеханических реле.** Вероятность безотказной работы электромеханического реле  $p = p_k p_m p_{об} = p_{вв} p_{п}$ , где  $p_k, p_m, p_{об}$  — суммарная вероятность безотказной работы по внезапным и параметрическим отказам соответственно контактов реле, механической части и обмотки реле. Вероятность безотказной работы механической части  $p_m = p_{мв} p_{мп}$  ( $p_{мв}$  — надежность по внезапным отказам;  $p_{мп}$  — надежность параметрическая). Надежность по внезапным отказам

$$p_{мв} = e^{-(\lambda + \lambda' + \lambda_m t)},$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов контактов и обмотки реле,  $\lambda = n\lambda_k + \lambda_{об}$  ( $n$  — число контактов);

$\lambda'$  — интенсивность отказов контактов и обмотки реле, определяемая переходными явлениями в процессе включения и выключения  $\lambda' = n\lambda'_k + \lambda'_{об}$ ;

$\lambda_m$  — интенсивность отказов механической части реле. Для тепловозных реле  $\lambda_m$  может быть принята  $(0,01 + 1,0) \cdot 10^{-8}$  1/цикл в зависимости от назначения реле.

Ориентировочно  $\lambda = (0,3 \div 100) \cdot 10^{-6}$ ;  $\lambda' = (0,03 \div 0,8) \cdot 10^{-6}$  для электромагнитных малогабаритных реле, а  $\lambda = (0,1 \div 80) \cdot 10^{-6}$ ;  $\lambda' = (0,02 \div + 0,8) \cdot 10^{-6}$  для тех же реле нормального исполнения.

Значения  $\lambda$  и  $\lambda'$  приведены при нормальных условиях ( $t = 20^\circ \text{C}$ ) и отсутствии ускорений.

Надежность работы реле в отношении параметрических отказов определяется по формулам: при срабатывании

$$p_{ср} = \frac{1}{\Delta_{ср} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^I e^{-\frac{(I - I_{ср})^2}{2\Delta_{ср}^2}} dI;$$

при отпадании

$$p_{отп} = 1 - \frac{1}{\Delta_{отп} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{отп}} e^{-\frac{(I - I_{отп})^2}{2\Delta_{отп}^2}} dI.$$

Результирующая параметрическая надежность реле  $p = p_{ср} + p_{отп}$ . Для каждого типа реле значения коэффициентов изменчивости  $\Delta_{ср}/I$  и  $\Delta_{отп}/I_{отп}$  изменяются в относительно узких пределах: 5 — 8; 14 — 16 для реле малогабаритных и соответственно 5,0 — 9,0; 11 — 15 для реле нормального исполнения.

По значениям  $I_{ср}$  и  $I_{отп}$  и коэффициенту изменчивости можно определить  $\Delta_{ср}$  и  $\Delta_{отп}$ , необходимые для расчета надежности при срабатывании и отпадании. Значения  $I_p$  и  $I_0$  определяются при замкнутой и разомкнутой цепях катушки. Значения  $I_{ср}$  и  $I_{отп}$  меняются в зависимости от внешних воздействий: температуры  $\theta$ , влажности  $z$ , ускорений и вибраций  $\alpha$ . Поправки на влияние внешних воздействий

$$\frac{\Delta I_{ср}}{I_{ср}} = f(\theta) = \frac{\partial \left( \frac{\Delta I_{ср}}{I_{ср}} \right)}{\partial \theta} \Delta \theta; \quad \frac{\Delta I_{отп}}{I_{отп}} = f(\theta) = \frac{\partial \left( \frac{\Delta I_{отп}}{I_{отп}} \right)}{\partial \theta} \Delta \theta$$

и т. д. могут быть приняты по табл. 22.

Результирующие значения с учетом влияния различных факторов имеют вид:

$$I_{ср} = I_{ср,0} \sqrt{1 + 2\sum \left( \frac{\Delta I_{ср}}{I_{ср}} \right)^2}; \quad I_{отп} = I_{отп,0} \sqrt{1 + 2\sum \left( \frac{\Delta I_{отп}}{I_{отп}} \right)^2}.$$

| Реле                   | Поправки                 |                           |                     |                      |                          |                           |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|
|                        | Температура, % на 1°С    |                           | Влажность % на 1%   |                      | Ускорения, % на 1 м/с²   |                           |
|                        | $A_{\theta_{\text{ср}}}$ | $A_{\theta_{\text{отп}}}$ | $A_{z_{\text{ср}}}$ | $A_{z_{\text{отп}}}$ | $A_{\alpha_{\text{ср}}}$ | $A_{\alpha_{\text{отп}}}$ |
| Малогабаритные         | 0,1+0,5                  | 0,6+0,7                   | $9 \cdot 10^{-2}$   | $5 \cdot 10^{-2}$    | 0,35—1,2                 | 0,15—0,9                  |
| Нормального исполнения | 0,3+0,7                  | 0,9+1,1                   | $9 \cdot 10^{-2}$   | $5 \cdot 10^{-2}$    | 1,5—2,5                  | 1,5—2,5                   |
| Герметизированные      | 0,1+0,2                  | 0,1+0,2                   | —                   | —                    | 0,9—1,2                  | 0,15—0,9                  |

Следует учесть и изменения  $\Delta_{\text{ср}}$  и  $\Delta_{\text{отп}}$ , которые при учете внешних воздействий составляют:  $\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\Sigma \Delta_{i_{\text{ср}}}^2}$ ;  $\Delta_{\text{отп}} = \sqrt{\Sigma \Delta_{i_{\text{отп}}}^2}$ , а также изменения  $I_{\text{ср}}$  и  $I_{\text{отп}}$  в зависимости от времени работы и числа циклов срабатывания и отпадания  $N$ .

Изменения  $\Delta I_{\text{ср}}/I_{\text{ср}}$  и  $\Delta I_{\text{отп}}/I_{\text{отп}}$  от числа циклов  $N$  обусловлены явлениями износа в местах контактов и в опорах; эти изменения подчиняются зависимостям:

$$\frac{\Delta I_{\text{ср}}}{I_{\text{ср}}} = k_1 N = k_1 f T; \quad \frac{\Delta I_{\text{отп}}}{I_{\text{отп}}} = k_2 N = k_2 f T$$

Значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  принимаются равными  $k_1 = (0,005 + 0,003)10^{-6}$ ;  $k_2 = (0,01 + 0,05)10^{-6}$ .

**Надежность полупроводниковых приборов.** Надежность по внезапным отказам при непрерывном режиме работы  $P_a = e^{-\lambda t}$ . Значения  $\lambda = \lambda_0$  при номинальном режиме (когда рассеиваемая прибором мощность  $P_x = P_n$ ) и нормальных условиях работы ( $\theta = 20^\circ \text{C}$ ) равны:

для германиевых диодов и триодов  $\lambda_0 = (1,5 - 3,0)10^{-6} \text{ 1/ч}$ ;

для кремниевых диодов и триодов  $\lambda_0 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ .

При других режимах и условиях работы

$$\lambda = \lambda_0 e^{-\alpha[(\theta_x - \theta_n) + R_{\theta\Sigma}(U_{px} I_{px} k_1 + U_{0x} I_{0x} k_2) + \gamma(U_{0x} - U_{00})]},$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий температуру нагрева прибора (для германиевых приборов  $\alpha = (0,025 + 0,03)1^\circ \text{C}$ , для кремниевых —  $\alpha = 0,01 \text{ 1}^\circ \text{C}$ );

$\gamma$  — коэффициент, учитывающий приложенное к прибору напряжение ( $U_{00}$  — номинальное;  $U_{0x}$  — действительное); для германиевых приборов  $\gamma = 1,25/U_{00}$ ; для кремниевых  $\gamma = 0,008/U_{00}$ ;

$R_{\theta\Sigma}$  — тепловое сопротивление прибора (принимается по его паспорту), ориентировочно для кремниевых приборов можно принять  $R_{\theta\Sigma} = 60 + (160 - 0,1P_x)$ , где  $P_x$  — мощность, выделяемая в приборе, для германиевых  $R_{\theta\Sigma} = 30 + (160 - 0,1P_x)$ ;

$\left. \begin{matrix} U_{px}, I_{px} \\ U_{0x}, I_{0x} \end{matrix} \right\}$  — соответственно токи и напряжения под нагрузкой и при снятой нагрузке.

Коэффициенты, характеризующие фактическое время работы прибора,

$$k_1 = \frac{t_1}{t_1 + t_2}; \quad k_2 = \frac{t_2}{t_1 + t_2}.$$

## 51. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Свойства автоматизированной энергетической установки наиболее полно можно охарактеризовать ее параметрической надежностью. *Параметрической надежностью* (параметрическая вероятность безотказной работы) называется вероятность функционирования системы (элемента) с заданным значением выходного параметра, практически обычно — нахождение выходного параметра в зоне допуска. Для автоматической системы максимально возможная параметрическая надежность  $P_{\text{по}}$  является наиболее универсальной характеристикой, которая отражает структуру схемы, качество регулирования, качество настройки и регулировки системы, с ней тесно связаны такие экономические показатели, как эффективность установки и расход энергии.

Внезапные отказы элементов системы также приводят к параметрическому отказу — выходу параметра системы за пределы допуска. Поэтому общая надежность системы определяется двумя вероятностями: вероятностью нахождения выходного параметра системы в зоне допуска во время нормального функционирования  $P_{\text{н}}$  и вероятностью безотказной работы элементов системы  $P_{\text{в}}$ , т. е.  $P = P_{\text{н}} P_{\text{в}}$ .

Рассмотрим возможности вычисления вероятности функционирования системы с выходным параметром, лежащим в зоне допуска, при отсутствии внезапных отказов — значение  $P_{\text{н}}$ . Текущее значение параметрической надежности  $P'_{\text{н}}$  складывается из вероятности действия системы в установившихся и динамических (переходных) режимах, т. е.  $P'_{\text{н}} = P_{\text{пс}} + P_{\text{пд}}$ .

Если при переходных режимах отклонения параметров элементов  $\Delta_{\text{д}}$  не превышают установленных допусков для установившегося режима  $\delta$ , слагаемое  $P_{\text{пд}}$  в уравнении отсутствует. Обычно условие  $\Delta_{\text{д}} < \delta$  не выполняется при переходных процессах, и за время работы системы  $P_{\text{н}} = f(P'_{\text{н}})$  значительно уменьшается, происходит снижение эффективности и топливной экономичности установки.

В общем случае зависимость  $P_{\text{н}} = f(P'_{\text{н}})$  может быть вычислена, как  $P_{\text{н}} = (1 - t)P_{\text{пс}} + tP_{\text{пд}}$ , где  $t$  — время функционирования при переходных процессах (в долях от единицы).

Увеличение времени переходных процессов сказывается на экономичности энергетической установки. В свою очередь

$$P_{\text{пд}} = f(T_0, \omega, I),$$

где  $T_0$  — постоянная времени САР;

$\omega$  — частота возникновения переходных процессов в системе;

$I$  — оценка качества переходного процесса.

Показатели системы можно улучшить, влияя на переходные процессы в системе. Наибольшее влияние на  $P_{\text{пд}}$  оказывают время переходных процессов, которое уменьшается с повышением быстродействия системы, и частота их возникновения.

Значение  $P_{\text{пс}}$  определяют по распределению ошибки системы, построенному с учетом отклонений, имеющих место при переходных режимах. Распределение ошибки системы, построенное по отклонениям в пределах допусков, используется для вычисления  $P_{\text{по}}$  и  $P_{\text{пс}}$ . Наиболее действенны для увеличения  $P_{\text{по}}$  мероприятия, направленные на уменьшение отклонений параметров элементов систем при переходных процессах. Практически влияние тех или иных факторов на  $P_{\text{н}}$  может быть вычислено для конкретной системы после определения параметров регулирования и режимов ее работы.

В общем случае параметрическая надежность САР зависит от трех факторов: отклонений параметров элементов системы, топологической структуры

системы, т. е. связей между элементами, и качества регулировочных работ, вероятности их правильного выполнения. Параметрическая надежность системы автоматического регулирования тепловоза

$$P_{\text{цс}} = P_c P_{\text{э}} P_{\text{нас}},$$

где  $P_c$  — «схемная» надежность, часть параметрической надежности, зависящая от схемы соединения элементов и влияния их друг на друга и на выходной параметр системы;

$P_{\text{э}}$  — параметрическая надежность элементов системы;

$P_{\text{нас}}$  — надежность настройки, вероятность выполнения настройки выходного параметра системы в соответствии с заданным на него допуском (зависит от класса точности приборов, применяемых при настройке, и методики ее проведения).

Как следует из уравнения, надежности САР тепловоза можно увеличить несколькими путями. Уменьшение количества элементов в системе дает положительный результат сразу по трем величинам — увеличивается вероятность безотказной работы по внезапным и параметрическим отказам, уменьшается количество связей в системе. Очевидно, что это один из самых перспективных путей.

Другой путь — совершенствование топологических связей системы. Изменением ее структуры можно добиваться значительных результатов. Можно ужесточать допуски на параметры элементов системы, применять компенсирующие элементы и цепи и т. д.

Если считать, что отклонения параметров элементов энергетической установки и САР в эксплуатации невелики и не превосходят установленных допусков, а это имеет место при отсутствии внезапных отказов, то отклонения параметров можно отождествить с их погрешностями. Отождествляя отклонения с погрешностями параметров, имеем право для их исследования и математического описания привлечь теорию погрешностей. Располагая отклонениями параметров элементов и используя теоремы теории погрешностей, возможно вычислить ожидаемое отклонение выходного параметра системы.

Однако использование теорем теории погрешностей для вычисления отклонения выходного параметра системы возможно лишь в случае наличия функциональных связей элементов системы, описанных алгебраическими уравнениями. Алгебраические уравнения для сложной системы, каковой является система, состоящая из энергетической установки и САР тепловоза, составить довольно трудно, приходится принимать большое количество допущений, снижающих точность окончательного результата. Ряд процессов и связей, существующих в реальной системе, алгебраическими уравнениями отобразить не удается.

Решение системы уравнений отклонений усложняется, если в уравнениях связей имеются функциональные зависимости в виде суммы или разности. В этом случае необходимо определять коэффициенты, являющиеся частными производными по рассматриваемому параметру, т. е. коэффициенты влияния, которые можно определить, располагая самыми подробными сведениями о системе, что при проектировании обычно невозможно. С другой стороны, известно, что для любого промежуточного звена системы  $x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$ , где  $x_{\text{вх}}$  и  $x_{\text{вых}}$  — соответственно входной и выходной параметры звена;  $k$  — коэффициент передачи звена (его коэффициент усиления).

Для нахождения зависимости между отклонениями входного и выходного параметров и коэффициента передачи звена воспользуемся уравнениями теории погрешности. Для относительного отклонения выходного сигнала звена имеем

$$\frac{\Delta x_{\text{вых}}}{x_{\text{вых}}} = \frac{\Delta x_{\text{вх}}}{x_{\text{вх}}} + \frac{\Delta k}{k}.$$

Из линейности полученного уравнения следует принцип независимости действия отдельных отклонений параметров на отклонение выходного параметра. При каскадном соединении элементов относительная погрешность параметра на входе каждого последующего элемента определяется отклонениями параметров (коэффициентов передачи) предыдущих элементов, т. е.

$$\frac{\Delta x_{\text{вых}}}{x_{\text{вых}}} = \frac{\Delta x_{\text{вх}}}{x_{\text{вх}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta k_i}{k_i},$$

где  $\frac{\Delta k_i}{k_i}$  — относительные отклонения параметров элементов, через которые проходит возмущающее воздействие — первичное отклонение одного из определяющих работу системы параметров.

Таким образом, относительная погрешность (отклонение) цепочки, состоящей из последовательно включенных элементов системы, определяется как сумма относительных погрешностей параметров элементов цепочки плюс относительное отклонение входного параметра. Входным воздействием может быть относительное отклонение параметра любого элемента рассматриваемой цепочки передачи сигнала. В уравнение отклонения попадают только параметры элементов, следующие по цепочке за элементом, в котором возникло отклонение параметра.

## 52. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОШИБКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ

По своему существу параметры элементов и их отклонения от номинала являются величинами случайными. Таким образом, и выходная величина системы и ее отклонение от номинала — величины случайные. Наиболее целесообразно и логично применять для их анализа математический аппарат теории вероятностей. Закон распределения случайной величины полностью ее характеризует. Из распределения погрешности выходной величины получаются исходные данные для расчета регулирующих и компенсирующих цепей, в частности, цепей регулятора мощности.

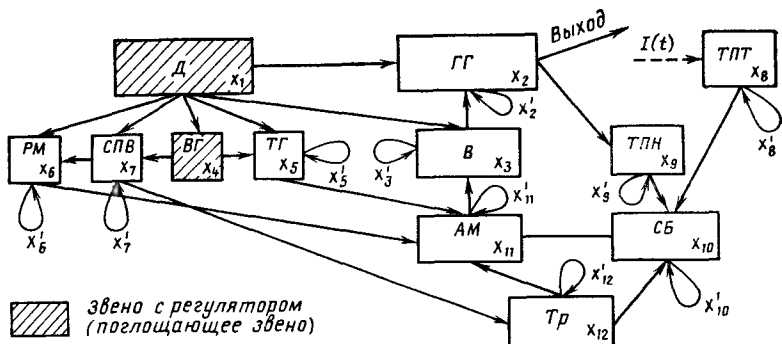
Потенциальная параметрическая надежность определяется наименьшими отклонениями параметров элементов системы, такими отклонениями могут считаться производственные допуски на элементы, так как именно они гарантируют максимум минимальных значений для отклонений параметров. Поэтому в дальнейшем при определении численных значений параметрической надежности приняты за исходные допуски на параметры элементов энергетической цепи и САР тепловозов. Этим же достигается некоторое единообразие в расчете систем различной топологической структуры.

Используем для получения закона распределения  $\Delta U_r/U_r$  свойства полюсного направленного графа системы, включающего рассматриваемые переменные, связи между ними и дающего возможность легко составить систему линейных алгебраических уравнений, связывающих отклонения параметров элементов с отклонением выходной величины. Вершинами графа являются элементы системы, ребрами — связи между ними.

Функциональная связь, существующая между переменными величинами на любой паре полюсов, выражается полюсными уравнениями. Для математического описания всей энергетической системы необходимо иметь систему полюсных уравнений или полюсный граф. Теория линейных графов дает возможность разработать общие формальные методы получения уравнений физической системы, не зависящие от ее сложности и физической природы.

При составлении направленного графа системы не накладываем никаких ограничений на физическую природу как самой системы, так и частей, ее об-

Рис. 172. Граф системы тепловоза 2ТЭ10Л. Условные обозначения вершин соответствуют схеме тепловоза



разующих. Необходимым условием ставим возможность измерения основных переменных и их физическую совместимость, т. е. переменные входят в одни и те же уравнения, описывающие функционирование системы.

Граф содержит информацию о структуре системы и определяет связь между переменными (отклонениями параметров), т. е. дает основу для записи уравнений, отражающих структурные особенности системы. Однозначное соответствие графа и системы доказано и носит название *изоморфизма графа и физической системы*.

Сущность полюсных уравнений заключена в следующем: если в одну из вершин графа сходится несколько направленных к ней ветвей, то сигнал вершины определяется суммой  $x_j = k_1x_1 + k_2x_2 + \dots + k_jx_j = \sum k_ix_i$ . При этом ветви, направленные от вершины, не оказывают влияния на значение сигнала.

Выбираем в качестве возмущающих сигналов вершин относительные отклонения основных параметров элементов системы, а в качестве коэффициентов передачи — соотношения между ними в реальной системе. Используя выявленные свойства относительных отклонений, получаем, что коэффициенты передачи между полюсами графа в линейных системах равны единице. Это свойство направленного графа, у которого в качестве сигналов вершин выбраны относительные отклонения параметров элементов, значительно упрощает функциональные зависимости уравнений погрешностей. Вывод о равенстве единицы коэффициента передачи справедлив и для коэффициента передачи петли, характеризующей преобразование сигнала вершины в самой вершине в собственную погрешность параметра элемента. На рис. 172 изображен граф одного из вариантов системы тепловоза 2ТЭ10Л. На графе отражены связи между вершинами (параметрами элементов системы), петли, входные и выходные величины. Интерес представляют поглощающие вершины графа. Поглощающую вершину образует параметр, значение которого регулируется собственным регулятором. Сигнал такой вершины не зависит от влияния остальных связанных с ним вершин, а определяется только погрешностями регулятора. К таким вершинам относятся частота вращения вала дизеля  $n_d$ , величина которой поддерживается на заданном уровне регулятором скорости вращения (на графе не показан), и напряжение вспомогательного генератора  $U_{вг}$ , поддерживаемое постоянным регулятором напряжения.

В графе отсутствуют вершины, соответствующие параметрам тяговых электродвигателей. Их место занимает входная величина — ток тяговых двигателей, он же ток тягового генератора. Ток  $I(t)$  отражает изменение сопротивления движению и скорости тепловоза. Эти связи при составлении полюсных уравнений не учитываются, так как являются для системы независимыми переменными, для которых определяется ошибка системы.

При изображении графа систем, имеющих возбудители с расщепленными полюсами, удобно представлять возбудитель в виде двух вершин, т. е. использовать тот же принцип, что и при его расчете. Порядок получения уравнений отклонений параметров элементов системы, дающий возможность упорядочить, четко спланировать и привести к единой методике все операции, следующий: рисуют направленный граф, соответствующий по конфигурации исходной системе тепловоза (см. рис. 172); выделяют переменные сигналы вершин графа (относительные отклонения параметров элементов) и производят их нумерацию; отмечают полюсы, обладающие поглощающими свойствами.

Составляют уравнения отклонений для каждого полюса графа. Так, для графа системы тепловоза 2ТЭ10Л имеем следующие полюсные уравнения:

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 + x_3 + x'_2; & x_3 &= x_1 + x_4 + x_{11} + x'_3; & x_{11} &= x_5 + x_{12} + x_{10} + x'_{11}; \\x_5 &= x_1 + x_4 + x'_5; & x_{12} &= x_7 + x'_{12}; & x_{10} &= x_8 + x_9 + x_{12} + x'_{10}; \\x_7 &= x_1 + x_4 + x'_7; & x_8 &= x_{12} + x'_8; & x_9 &= x_2 + x_{12} + x'_9; \\x_6 &= x_1 + x_7 + x'_6; & x_2 &= x_8 + x'_2 + x'_{11},\end{aligned}$$

где  $x_2$  — относительное отклонение выходного параметра вершины (элемента системы);

$x'_i$  — собственная относительная погрешность параметра вершины (элемента системы).

Выражая  $x_2$  через погрешности остальных элементов системы, получаем в результате подстановок  $x_2 = 0,5 (7x_1 + x'_2 + x'_3 + 6x_4 + x'_5 + 4x'_7 + x'_8 + x'_9 + x'_{10} + x'_{11})$ . Здесь использованы только уравнения, относящиеся к полюсам, составляющим энергетическую установку и систему регулирования дизель-генератора, без цепей РМ, для которых уравнение составляется отдельно.

При преобразовании полюсных уравнений графа следует иметь в виду, что в качестве переменных выступают относительные погрешности параметров, которые всегда учитываются по абсолютному значению без учета знака, стоящего перед ним.

Получив полюсные уравнения относительных погрешностей элементов и на их основании зависимость погрешности выходного параметра системы от погрешностей параметров элементов, можно без труда определить максимальное отклонение выходного параметра, используя принцип расчета «на наихудший случай». Для этого достаточно подставить максимальные значения отклонений параметров элементов системы.

Для однообразия в расчетах за возможные максимальные отклонения в установившихся режимах работы тепловозной системы принимаем допуски на параметры элементов. При учете переходных процессов отклонения параметров и выхода будут больше допусков. Закон распределения ошибки выходного параметра системы является суммой законов распределения погрешностей параметров элементов и по предельной теореме теории вероятностей при числе элементов системы более четырех характер его совпадает с нормальным законом распределения.

В рассматриваемом случае (система тепловоза 2ТЭ10Л) число элементов в системе, параметры которых определяют ее функционирование, достигает 12. Сомнений в том, что на выходе существует нормальный закон распределения, нет.

Установление характера закона распределения и его максимального отклонения при использовании правила «трех сигм» дает основание для графического построения закона. Сущность правила «трех сигм» заключается в утверждении, что максимальное отклонение случайной величины от ее матема-

тического ожидания не превышает  $3\sigma$  (для нормального закона вероятность большего отклонения не превышает 0,27%).

Имея максимальное отклонение случайной величины, полученное из уравнения отклонений по методу «наихудшего случая», определяют значение среднеквадратичного рассеивания  $\sigma$ , которое равно  $1/3$  полученного значения максимального отклонения. Максимальное значение плотности вероятности, соответствующее математическому ожиданию, определяется из равенства

$$f(x)_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}},$$

а промежуточные плотности вероятности  $f(x) = \varphi(\sigma)$  имеют следующие значения:

|                   |       |             |             |             |             |             |           |
|-------------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| $\varphi(\sigma)$ | $m_x$ | $0,5\sigma$ | $1,0\sigma$ | $1,5\sigma$ | $2,0\sigma$ | $2,5\sigma$ | $3\sigma$ |
| $f(x)^*$          | 1,0   | 0,88        | 0,60        | 0,325       | 0,125       | 0,04        | 0,00      |

\* Значения  $f(x)$  приведены в долях от  $f(x)_{\max}$ .

Специальной оговорки требует лишь условие неизменности для данного построения тока силовой цепи. На общность и точность результатов это условие ограничений не накладывает, влияя только на абсолютное отклонение напряжения, так как для тепловозного генератора  $U = f(I)$ .

Для построения закона распределения ошибки необходимо определить математическое ожидание выходной величины  $m_x$  или центр рассеивания отклонений. При рассмотрении тепловозной системы приходим к выводу, что существуют два центра рассеивания. Первый центр определяется параметрами настройки системы энергетической цепи и САР по мощности тягового генератора. Значительная часть элементов САР при функционировании поддерживает в заданных пределах установленную при настройке мощность тягового генератора и его внешнюю характеристику.

Отклонение параметров элементов, включенных в систему саморегулирования дизель-генератора, вызывает появление распределения с центром  $m_{x1} = P_e$ , равного установленной мощности тягового генератора тепловоза. Это распределение характеризуется в дальнейшем величиной  $\sigma_c$  — среднеквадратичным отклонением выходного параметра схемы, вычисляемым по уравнению.

Второй центр рассеивания определяется функционированием системы регулятора мощности, который теперь является обязательной принадлежностью САР тепловоза. Система РМ настраивается на поддержание полной мощности дизеля  $N_e$ , которая и определяет второй искомый центр рассеивания ошибки системы РМ. Это распределение характеризуется нами величиной  $\sigma_p$  — среднеквадратичным отклонением выходного параметра системы регулятора мощности, определяемого из полюсного уравнения графа для цепей регулятора мощности. Известно, что РМ поддерживает  $N_e$  постоянной за счет изменения возбуждения тягового генератора. Поэтому выходная ошибка напряжения (мощности) тягового генератора образуется за счет функционирования двух систем — схемы и регулятора, каждая из которых имеет свой центр рассеивания и распределение ошибки по нормальному закону.

По полученным полюсным уравнениям построены законы распределения ошибки  $f_c(x)$  схемы и  $f_p(x)$  регулятора мощности (рис. 173). Приходим к выводу, что закон распределения ошибки энергетической установки и САР является смесью двух нормальных законов распределения  $f_c(x)$  и  $f_p(x)$  со смешанными центрами рассеивания.

Действительно, площади под кривыми распределения погрешностей схемы и регулятора представляют собой два множества состояний системы, опре-

деляемых функционированием двух практически независимых систем с общей координатой выхода.

Используя определения алгебры множеств, можем рассматривать реальную область возможных отклонений выходного параметра энергетической системы как смесь двух множеств  $S_p$  и  $S_c$  множества состояний системы, обусловленных функционированием схемы и регулятора мощности соответственно. Множество состояний системы  $S_\Sigma$  состоит из всех элементов, входящих хотя бы в одно из исходных множеств, т. е.

$$S_c \cup S_p,$$

где  $S_c$  — множество состояний системы, определяемое топологическими особенностями схемы и флуктуацией параметров элементов;

$S_p$  — множество состояний системы, определяемое топологическими особенностями схемы РМ и флуктуацией параметров элементов, входящих в цепь РМ.

Множество  $S_\Sigma$ , получаемое как смесь множества  $S_c$  и  $S_p$ , включает в себя все возможные состояния системы, определяющиеся отклонениями выходного параметра. Для получения множества  $S_\Sigma$  и соответственно закона распределения плотности вероятности ошибки выходного параметра системы производим графическое суммирование ординат  $f_c(x)$  и  $f_p(x)$ . Такое действие правомочно, так как построены они в одном масштабе. В результате суммирования получили зависимость  $f_\Sigma(x)$  и соответственно множество состояний системы  $S_\Sigma$ . Часть множества  $S_\Sigma$  представляет собой пустое множество  $\Phi \subset S_\Sigma$ , так как некоторых состояний системы теоретически не может быть получено.

Первое пустое множество  $\Phi$  ограничено кривой  $f_c(x)$  и ординатой  $3(\sigma_c + \sigma_p)$  слева от центра рассеивания  $P_e$ . Отклонения, вызываемые погрешностью системы, за эту границу теоретически невозможны, так как в действие должна вступать система РМ. Попадание в  $\Phi 1$  возможно только при переходных процессах, когда имеют место значительные, но быстрозатухающие отклонения параметров, время действия которых меньше постоянной времени системы РМ. Область  $\Phi 1$  определяется, таким образом, характеристикой рассеивания  $\sigma_p$ . Уменьшение  $\sigma_p$  приводит к уменьшению энтропии системы.

Пустое множество  $\Phi 2$  образуется аналогичным образом, но расположено справа от  $N_e$ . Значение его небольшое, хотя, как и у  $\Phi 1$ , возрастает с уменьшением  $\sigma_p$ . Имеется желание отнести к пустым множествам и все состояния системы, у которых реализуемая мощность больше номинальной мощности дизеля — область, ограниченная  $f_\Sigma(x)$  и  $N_e$ . Однако практически это множество состояний к пустым множествам не относится.

Зона перегрузки дизеля существует реально, практически проявляется весьма своеобразно — перегрузка вызывает уменьшение частоты вращения

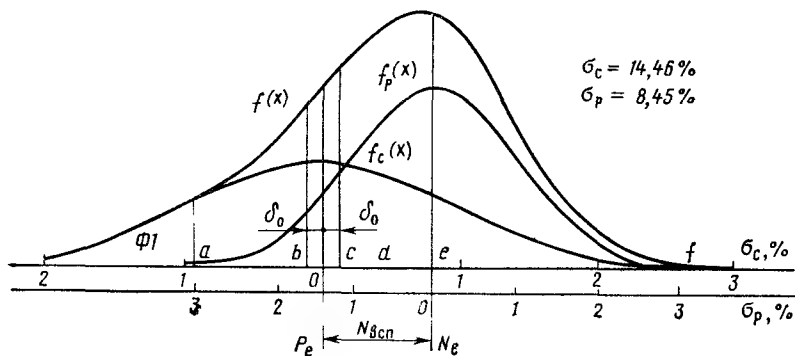


Рис. 173. Построение кривой закона распределения отклонений выходного параметра системы теплового двигателя 2ТЭ10Л

вала дизеля и как следствие снижение мощности. Таким образом, в зоне перегрузки дизель-генератор работает с пониженной мощностью и просадкой частоты вращения. Вероятность режима определяется по плотности вероятности  $f_{\Sigma}(x)$  обычным способом, практически — подсчетом площадей выбранного интервала погрешности.

Располагая кривой  $f_{\Sigma}(x)$  и множеством состояний системы, можно непосредственно из рис. 173 определить параметрическую надежность системы. Для этого на график  $f_{\Sigma}(x)$  наносится выбранная зона допуска, например  $\pm 1,5\%$ , образуя еще одно множество состояний системы — множество, соответствующее работе системы в зоне допуска  $S_{\delta}$ , с мощностью, равной номинальной. Здесь мы понимаем под номинальной мощностью работу

в зоне допуска. Вероятность того, что состояние системы соответствует множеству  $S_{\delta}$  и будет численной характеристикой параметрической надежности системы, практически может быть определена как отношение площадей  $S_{\delta}$  и  $S_{\Sigma}$ .

Таким же образом определяются и вероятности всех других режимов работы. Итак, приведенными приемами достигнута основная цель — получена кривая закона распределения ошибки тепловозной САР и определено возможное множество состояний системы. Для тепловозных САР значение параметрической надежности зависит от режима работы по внешней характеристике тягового генератора. Действительно, при рассмотрении возможных режимов работы энергетической установки, обусловленных наличием отклонений напряжения, что при постоянном  $I_{Г1}$  соответствует мощности, может быть выделено несколько режимов работы:

- 1) в заданном допуске, соответствующем номинальной мощности (участок  $b-c$  рис. 173);
- 2) с недогрузкой  $a-b$ ;
- 3) с перемещающей перегрузкой  $c-d$ , вызванной периодическим включением и отключением вспомогательной нагрузки;
- 4) с перегрузкой  $d-e-f$ .

Переменной величиной, зависящей от силы тока тягового генератора, является режим перегрузки. При работе установки в зоне больших токов возможно отклонение напряжения  $U_{Г1}$  на весь диапазон погрешности, в зоне малых токов диапазон изменения напряжения  $U_{Г1}$  в большую сторону ограни-

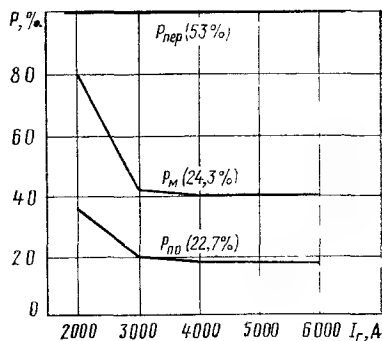


Рис. 174. График соотношения режимов работы энергетической установки тепловоза 2ТЭ10Л в зависимости от  $I_{Г1}$  (15-я позиция контроллера)

Таблица 23

| Серия<br>тепловозов | Параметр системы, % |            |          |       |           | Вспомогательная нагрузка<br>двигателя, % |       |
|---------------------|---------------------|------------|----------|-------|-----------|------------------------------------------|-------|
|                     | $\sigma_c$          | $\sigma_p$ | $P_{но}$ | $P_m$ | $P_{пер}$ |                                          |       |
|                     |                     |            |          |       |           | отключаемая                              | общая |
| ТЭЗ                 | 10,70               | 11,10      | 22,0     | 38,0  | 40,0      | 6,05                                     | 10,30 |
| ТЭ10                | 12,17               | 6,55       | 18,2     | 20,5  | 61,3      | 5,20                                     | 9,75  |
| 2ТЭ10Л              | 14,46               | 8,45       | 22,7     | 24,3  | 53,0      | 6,85                                     | 11,60 |
| ТЭ116               | 11,30               | 8,40       | 21,4     | 32,2  | 46,4      | 7,00                                     | 12,00 |

чен насыщением тягового генератора. Это в свою очередь приводит к уменьшению множества состояний работы с перегрузкой.

Рассматривая возможные режимы работы энергетической установки при выбранном токе, производим аналогичные вычисления вероятностей:  $P_n$  — работы в допуске;  $P_m$  — работы с недогрузкой и  $P_{пер}$  — работы с перегрузкой. Изменение их значения в зависимости от тока нагрузки тягового генератора (рис. 174) происходит вследствие уменьшения вероятности перегрузки энергетической установки. Показатели использования энергетических установок тепловозов приведены в табл. 23.

Приведенные вероятностные режимы работы являются универсальной характеристикой параметрической надежности энергетической установки, учитывающей параметрическую надежность элементов системы, схему их соединений, вид внешней характеристики тягового генератора и режимы работы тепловоза.

Увеличение  $P_{до}$  систем тепловозной автоматики можно добиться следующими путями:

1) ужесточением допусков на параметры элементов систем. Этот путь кажется наиболее реальным и в то же время необходимым. Однако он приведет к резкому увеличению стоимости аппаратуры, узлов и процессов регулировки, настройки и контроля;

2) уменьшением числа элементов в системе. Действительно, уменьшение числа параметров, влияющих на отклонение выходной величины системы, приведет к снижению этого отклонения. Такой вывод совпадает с имеющимся в теории надежности принципом «наискратчайшего пути», который утверждает, что система, имеющая меньшее количество элементов, как правило, будет обладать наибольшей точностью. В этом направлении имеется резерв повышения точности системы автоматического регулирования тепловозов;

3) вариацией коэффициентов влияния. Как было показано, на отклонение выходного параметра влияют не только отклонения параметров элементов, но и их корреляционные связи, т. е. структура (топология) системы.

В направлении разработки систем автоматического регулирования с оптимальной топологической структурой заключены значительные резервы повышения точности САР тепловозов. Увеличение точности систем автоматического регулирования этими путями должно сократить диапазон отклонений выходного параметра системы и тем самым уменьшить рабочий диапазон системы регулятора мощности.

## ГЛАВА 12

# ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛОВОЗОВ

---

### 53. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Технической диагностикой* называется отрасль науки и техники, охватывающая теорию технического диагностирования объекта, принципы построения и организации использования систем диагностирования. Техническая диагностика находится в стадии интенсивного развития, в ходе которого ее основные идеи получают воплощение в конкретных разработках, отвечающих современному уровню развития измерительной и вычислительной техники. Внимание к созданию и внедрению средств диагностирования тепловозов объясняется их существенной ролью в повышении эффективности использования локомотивов.

В становлении этого научного направления большое значение имеет ряд государственных и отраслевых стандартов, определяющих пути решения отдельных задач технической диагностики. В ГОСТ 20911—75 даны основные термины и определения технической диагностики, состав которых применительно к тепловозам дополнен ОСТ 24.040.49.—78.

Понимая под *диагностированием* процесс определения технического состояния объекта, задачи технической диагностики можно сформулировать следующим образом:

1. Проверка исправности и правильности функционирования объекта. Результатом таких проверок является заключение о степени изменения структуры объекта и его пригодности выполнять свои функции.

2. Проверка работоспособности объекта, заключающаяся в определении количественных показателей основных параметров, характеризующих качество его функционирования.

3. Поиск дефектов. Под *дефектом* понимается недопустимое количественное изменение параметров (характеристик) или структурных связей в объекте.

*Электроэнергетическая система тепловоза (ЭЭСТ)* — многоуровневая система, поэтому в зависимости от рассматриваемого уровня и решаемой задачи диагностики объектом диагностирования может быть как вся ЭЭСТ в целом, так и отдельные ее элементы: тяговые и вспомогательные машины, система автоматического регулирования тягового и вспомогательного генераторов и цепи управления тепловозом.

Объект диагностирования может находиться в конечном множестве состояний, которые можно разделить на два подмножества или класса состояний: класс состояний, при которых объект сохраняет свою работоспособность, и класс неработоспособных состояний, т. е. таких состояний, при которых возникшие дефекты приводят к отказу объекта. Следует отметить, что анализ работоспособных состояний объекта в ряде случаев позволяет установить характер изменения его работоспособности и предсказать момент перехода его в класс неработоспособных состояний, т. е. дает возможность решить задачу прогнозирования.

Действительное состояние объекта диагностирования можно определить, выполнив ряд операций, которые можно условно разделить на операции уп-

равления, измерения и постановки диагноза. В процессе установления диагноза участвует система *технического диагностирования (СТД)*, включающая в себя, кроме объекта, технические средства диагностирования и обслуживающий персонал.

В решении проблемы создания СТД тепловозов можно выделить задачи теоретического и прикладного характера. В круг основных задач, образующих *теорию технической диагностики*, можно отнести: исследование объекта диагностирования с целью установления связей между его элементами, выделения возможных состояний и т. д.; построение и изучение моделей объектов диагностирования; разработку и исследование алгоритмов диагностирования; разработку принципов и способов построения средств диагностирования; оценку эффективности СТД.

В основе теории технической диагностики лежат два фундаментальных физических принципа: принцип причинности и принцип унитарности. При неизменных внешних условиях всякое изменение диагностического параметра обусловлено изменением состояния объекта. Поэтому можно считать, что пространство диагностических параметров отображает пространство состояний и каждая его точка является образом точки пространства состояний. Для осуществимости диагноза необходимо, чтобы это отображение было взаимно однозначным, т. е. чтобы каждая точка пространства параметров была бы образом только одного состояния.

#### 54. МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Построение моделей объектов диагностирования является одним из основных этапов при разработке систем диагностирования, предусмотренных ГОСТ 20417—75. Модели объекта дают возможность определить его состояние, выбрать минимально необходимый набор диагностических параметров, построить алгоритм диагностирования и предъявить требования к объекту по уровню контролепригодности. При этом решается вопрос, какая часть программы диагностирования может быть осуществлена встроенными и внешними средствами диагностирования.

Модели ЭЭСТ очень разнообразны, что обусловлено рядом причин:

1) различием принципов преобразования выходных параметров элементов во времени (модели непрерывных и дискретных объектов). В ЭЭСТ непрерывными объектами являются энергетическая цепь, система регулирования тягового генератора, тяговые электрические машины и т.д. Дискретными объектами являются цепи управления тепловоза;

2) различием физических процессов и технического исполнения элементов ЭЭСТ (модели механических, электромагнитных и электромеханических элементов);

3) различием решаемых задач технической диагностики (модели объектов для проверки исправности работоспособности и для поиска дефектов);

4) различием способов построения моделей (модели на основе логического анализа, теоретических и экспериментальных исследований и т. д.).

При выборе и построении моделей необходимо, чтобы они отвечали основным требованиям, вытекающим из особенностей диагностирования технических объектов: модель должна быть обобщенной и в значительной мере абстрактной, чтобы ее можно было применять для широкого класса технических систем; модель должна охватывать возможно большее число состояний объекта и позволять определять дефекты при любой заданной глубине диагноза; модель должна быть представлена в форме, удобной для ее технической реализации и, в частности, для реализации на ЭВМ; модель должна позволять выби-

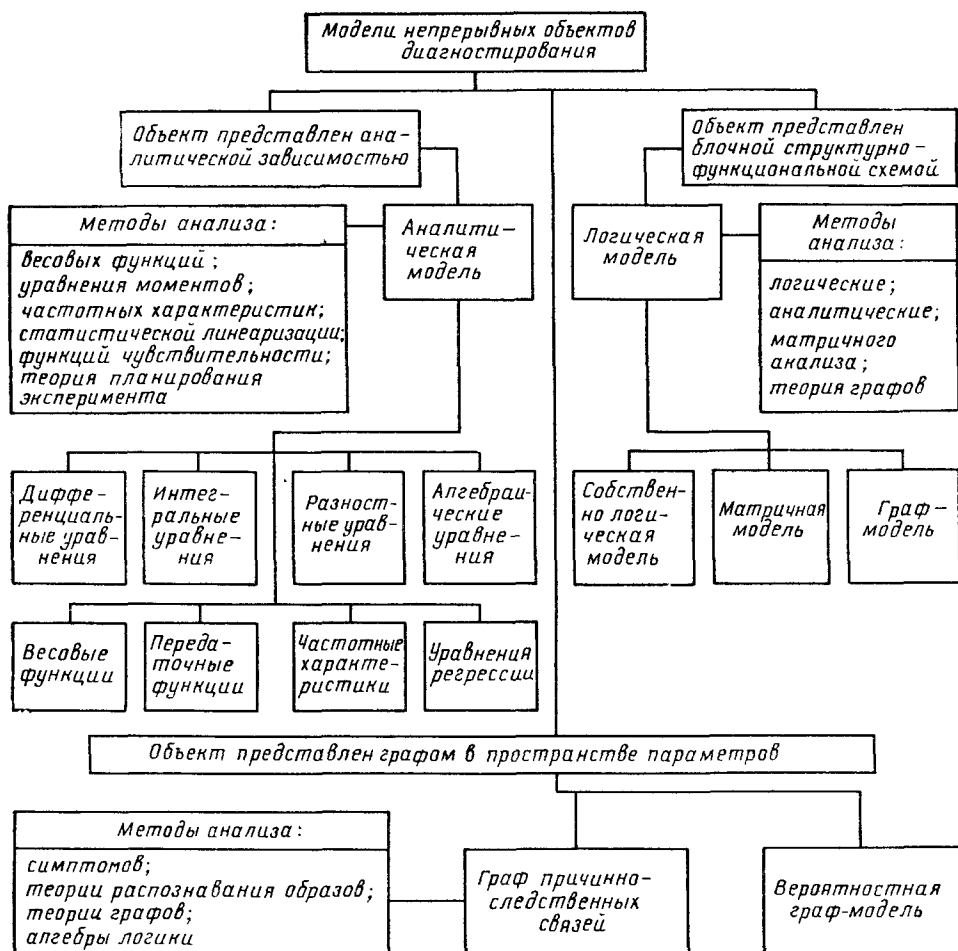


Рис. 175. Классификация моделей непрерывных объектов диагностирования

рать оптимальную совокупность диагностических параметров, отражающих существенные свойства объекта.

Большое разнообразие моделей затрудняет исчерпывающую классификацию. Построение частных классификационных схем моделей производится чаще всего в зависимости от объема информации, необходимой для определения конечного множества возможных технических состояний объекта. Наряду с этим признаком модели диагностируемых объектов можно условно разделить на группы зависимости от степени их абстрактности и характера связей, устанавливающих зависимость диагностических параметров от параметров состояний (рис. 175).

Выбор той или иной формы модели определяется характером и сложностью диагностируемого объекта, объемом имеющейся априорной информации, требуемой глубиной диагноза и техническими возможностями получения информации об объекте.

В ограниченном объеме одной главы невозможно привести диагностические модели всех элементов и ЭЭСТ в целом. В учебном пособии [25] при проектировании систем автоматики для оценки качества их функционирования ис-

пользуются модели в виде передаточных функций и частотных характеристик. Там же в гл. 9 изложен порядок построения логических моделей и методы их анализа. На примере замкнутой САР тягового генератора показаны возможности использования вероятностей граф-модели и графа причинно-следственных связей для контроля работоспособности и оценки параметрической надежности.

## 55. АЛГОРИТМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЭСТ

При создании СТД тепловозов особую актуальность приобретает разработка алгоритмов диагностирования. Процесс алгоритмирования неразрывно связан с анализом диагностической модели. Следовательно, определение последовательности выполнения измерительных и логических операций зависит от принятых принципов построения модели объекта и методов ее анализа. Не нарушая условий общности алгоритмирования решения основных задач диагностики, рассмотрим некоторые особенности построения алгоритмов диагностирования (ЭЭСТ).

В зависимости от способа формирования и содержания диагностической информации алгоритмы можно разделить на три класса:

1. Безусловно-прямые алгоритмы организуются для получения диагностической информации путем непосредственного измерения параметров по жесткой программе и сравнения их с допустимыми значениями. Такие алгоритмы реализуются при контроле работоспособности энергетической установки по выходным параметрам отдельных узлов, при проверке правильности функционирования и поиске неисправностей электрических систем управления.

2. Условно-косвенные алгоритмы обеспечивают получение диагностической информации в обобщенном виде посредством измерения параметров, вычисления показателей качества, функционально связанных с параметрами, и последующего сравнения показателей качества с допустимыми значениями. В этом случае осуществляется допусковой контроль по обобщенным показателям качества. К этому классу относятся также вычислительные алгоритмы, когда по косвенным параметрам технического состояния вычисляют диагностические параметры, а затем по ним осуществляют допусковой контроль объекта.

3. Комплексные алгоритмы строятся на измерении выходных параметров реальной и эталонной систем, вычислении и формировании по ним оценки показателя качества. Далее эта оценка сравнивается с контрольными допусками и принимается решение о способности реальной системы выполнять свое назначение.

Такое разделение алгоритмов диагностирования ЭЭСТ не противоречит разделению их на безусловные и условные [24]. Очевидно, что здесь содержание алгоритмов расширяется за счет использования показателей качества и их оценок, требующих более сложных логических и вычислительных операций. Иллюстрацией приведенной классификации могут служить примеры алгоритмов диагностирования тягового генератора по косвенным параметрам.

**1 Алгоритм определения среднего зазора главных полюсов тягового генератора.** 1. Для каждого типа генератора должна быть получена следующая априорная информация:

а) расчетом или опытным путем по выборке тепловозов устанавливается эталонная кривая намагничивания генератора  $E_r^3 = f(I_B^3)$  при  $I_B^3 = (0 - 0,02)I_{B\text{ ном}}$  и  $R_B = R_{B\text{ ном}}$ ;

б) вычисляется коэффициент крутизны прямолинейного участка эталонной кривой намагничивания  $k_i^3 = E_r^3/I_B^3$  при  $I_B^3 = (0 - 0,2)I_{B\text{ ном}}$ ;

в) эмпирически определяется средний зазор под полюсами (достовернее по выборке тепловозов)  $\delta_{\text{ср}}^3 = \sum_{i=1}^n \delta_i^3 / n$ , где  $n$  — количество главных полюсов;

г) вычисляется зависимость  $\delta_{\text{ср}}^3 = f(k_i^3)$  в диапазоне  $I_{\text{в}}^3 = (0 - 0,2) I_{\text{вном}}^3$  и  $R_{\text{в}} = R_{\text{вном}}$ .

2. На диагностируемом тяговом генераторе измерить параметры:  $U_{\text{г}}$ ,  $I_{\text{в}}$ ,  $R_{\text{в}}$ .

3. Вычислить  $E_{\text{г}} \cong 1,03 U_{\text{г}}$ .

4. В табличной или графической форме представить зависимость  $E_{\text{г}} = f(I_{\text{в}})$  при  $R_{\text{вном}}$ .

5. Вычислить коэффициент  $k_i^3 = E_{\text{г}} / I_{\text{в}}$  в диапазоне  $I_{\text{в}} = (0 - 0,2) I_{\text{вном}}$ .

6. Вычислить средний зазор под главными полюсами из соотношения  $\delta_{\text{ср}}^3 = (k_i^3 / k_i^3) \delta_{\text{ср}}^3$ .

II Алгоритм определения сопротивления и перегрева обмотки якоря тягового генератора. 1. Априори должна быть получена следующая информация:

а) расчетом или опытным путем устанавливаются эталонные зависимости:

$$\Phi_{\text{г}} = f(I_{\text{в}}) \text{ и } r_{\text{щк}} = f(I_{\text{г}}),$$

где  $\Phi_{\text{г}}$ ,  $I_{\text{в}}$ ,  $I_{\text{г}}$  — магнитный поток, ток возбуждения и ток тягового генератора;  $r_{\text{щк}}$  — сопротивление щеточно-коллекторного перехода.

Определить значение  $r_{\text{щк}}$  на практике трудно, поэтому можно сначала определить зависимость падения напряжения на щетках от плотности тока под ними, а потом вычислить  $r_{\text{щк}} = \Delta U_{\text{щ}} / I_{\text{гщ}}$ . Значение  $r_{\text{щк}}$  будет приближенным, так как  $\Delta U_{\text{щ}}$  зависит от частоты вращения якоря  $n_{\text{д-г}}$ , силы нажатия щеток и их твердости;

б) полученные зависимости  $f_1$  и  $f_2$  должны быть аппроксимированы в блоках нелинейности  $f_1$  и  $f_2$ , а сами блоки тарированы по температуре якоря (температуру  $t_{\text{я1}}$  измерить при помощи термометра, термопары или способом вольтметр-амперметр, при этом измерить сопротивление  $R_{\text{яг1}}$ ).

2. На диагностируемом генераторе измерить  $U_{\text{г}}$ ,  $I_{\text{г}}$ ,  $n_{\text{д-г}}$  и вычислить сопротивление якорной обмотки [4]:

$$R_{\text{яг2}} = C_{\text{ер}} n_{\text{д-г}} \frac{f(I_{\text{в}})}{I_{\text{г}}} - \frac{U_{\text{г}}}{I_{\text{г}}} - f_2(I_{\text{г}}).$$

3. Вычислить перегрев обмотки якоря

$$\tau = \frac{R_{\text{яг2}} - R_{\text{яг1}}}{R_{\text{яг1}}} (235 - t_{\text{я1}}) + (t_{\text{я1}} - t_0),$$

где  $t_0$  — температура окружающей среды.

4. Вычисленное значение  $\tau$  проверить метрологическими средствами (см. п. 1. б).

Методы построения алгоритмов диагностирования систем управления тепловозов изложены в учебных пособиях [21, 25]. Алгоритмы поиска неисправностей в цепях управления тепловозов 2ТЭ10Л и ТЭЗ приведены в [23].

Задача синтеза оптимальных алгоритмов диагностирования сводится к определению такой последовательности выполнения проверок, при которой обеспечивался бы экстремум выбранного критерия оптимизации. Выбор критерия оптимизации зависит от требований, предъявляемых к СТД, и условий, в которых проводится диагностирование. В случае если к СТД предъявляют жесткие требования по быстрдействию, в качестве такого критерия целесо-

образно выбрать минимум среднего времени поиска дефекта в объекте, определяемого соотношением

$$\tau_{\text{лп}} = \sum_{i=1}^n q_i \tau_{\text{лп}i},$$

где  $q_i$  — вероятность появления дефекта  $i$ -го функционального элемента;  
 $\tau_{\text{лп}i}$  — время, необходимое для локализации дефекта  $i$ -го функционального элемента;

$n$  — число функциональных элементов в системе.

Временные критерии требуют минимизации  $\tau_{\text{лп}}$ . При большом числе элементов в системе такая процедура оптимизации отличается большой трудоемкостью. Более простым по процедуре построения и вычисления является информационный критерий, требующий для каждой включаемой в алгоритм проверки максимизации величины

$$F_j = \frac{I(\pi_j)}{\tau_j},$$

где  $I(\pi_j)$  — информация, получаемая при выполнении проверки;

$\tau_j$  — время, необходимое для контроля  $j$ -го параметра.

В практике возможны случаи, когда вероятности появления дефектов  $q_i$  не определены, тогда синтез алгоритма диагностирования может быть осуществлен по минимаксному критерию. Такой критерий обеспечивает минимизацию времени локализации дефекта в элементе, требующем максимальных временных затрат, т. е.

$$T_{\text{лп}} = \min_j \{ \max_i \tau_{\text{лп}}^{(ij)} \},$$

где  $T_{\text{лп}}$  — наибольшее для данного алгоритма время локализации неисправности.

Минимаксный критерий можно использовать и в случае, если известны  $q_i$ . Тогда этот критерий обеспечивает минимизацию наибольших и наиболее вероятных временных затрат, связанных с локализацией одиночных дефектов. Этот критерий имеет вид

$$T_{\text{лп}} = \min_j \{ \max_i q_i \tau_{\text{лп}}^{(ij)} \}.$$

Процесс поиска оптимального алгоритма диагностирования является многошаговым и для его осуществления может быть привлечен аппарат динамического программирования.

## 56. СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЭСТ

Средства диагностирования ЭЭСТ многообразны по техническому исполнению. Разделение средств контроля и диагностирования тепловозов по основным классификационным признакам приведено на рис. 176. Описание классификационной схемы изложено в [23]. Кратко рассмотрим принципы организации и основные характеристики устройств автоматизированного локального и централизованного контроля и диагностирования ЭЭСТ.

**Средства контроля и диагностирования цепей управления.** Электрические цепи управления представляют собой комбинационные дискретные устройства. В теории дискретных устройств разработаны методы проверки их исправности, работоспособности и поиска дефектов. Релейно-контактные структуры приводятся к логическим сетям, на которых с использованием аппарата булевых функций, алгоритмов и методов построения проверяющих и диагностических тестов решаются задачи анализа, контроля и диагностики.

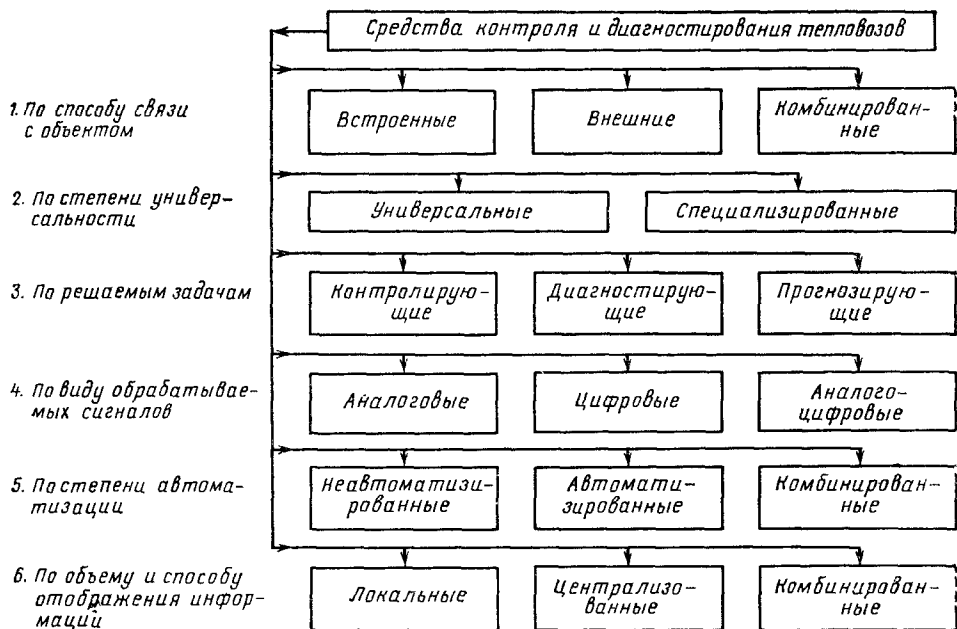


Рис. 176. Классификация средств контроля и диагностирования тепловозов

Известны практические реализации устройства для контроля и диагностирования цепей управления тепловозов. На тепловозе 2ТЭ116 установлено устройство схемного контроля цепей основных аппаратов управления. Основным недостатком этого устройства является низкая глубина поиска дефекта и вероятность ошибки в отображении информации.

В ЛИИЖТе разработано встроенное устройство для автоматизированного диагностирования цепей управления. Функциональная схема устройства изображена на рис. 177. Устройство предназначено для автоматического обнаружения неисправных элементов в цепях управления, контролируемых по бинарному параметру, т. е. по наличию или отсутствию потенциала в точках контроля. Устройство может быть выполнено на различных элементах, включая логические и интегральные. В описываемой реализации его применен шаговый коммутатор (ШИ1), управляемый блоком тактирования. Последовательно с шаговым коммутатором включен блок реле и блок видеиндикации (мнемосхема объекта), имеющий темное табло с нанесенной на нем схемой проверяемых цепей. При последовательном опросе контрольных точек неисправность в элементах цепи обнаруживается по загоранию соответствующей лампы, высвечивающей на табло участок проверяемой цепи.

Количество контролируемых точек определяется лишь принятой глубиной поиска дефекта. Количественно глубину поиска дефекта можно оценить отношением суммарной интенсивности отказов подмножества контролируемых элементов к суммарной интенсивности отказов всего множества элементов проверяемых цепей. Практически функции устройства можно расширить, если опорные контрольные точки автоматически проверять на поиск «земли». В этом случае устройство дополняется схемой прибора, разработанного в локомотивном депо Основа [22] (на рис. 177 показано штриховой линией).

Описанное устройство в опытном исполнении было проверено при длительной эксплуатации на тепловозе ТЭП60. Опытom установлено, что на эффектив-

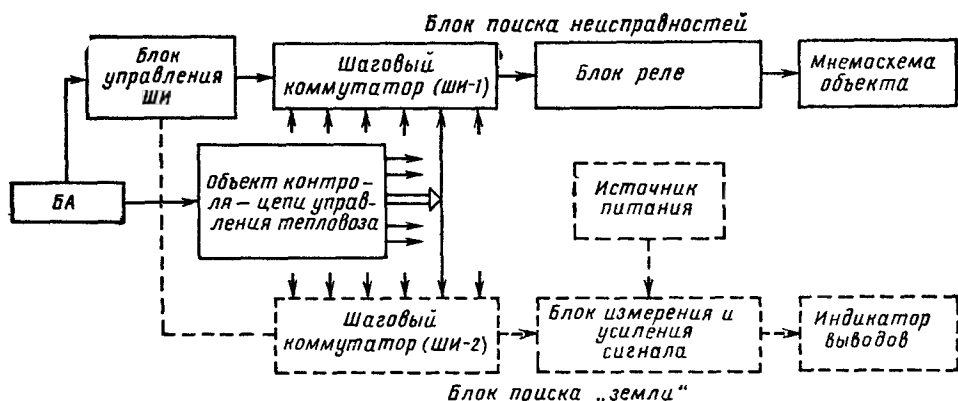


Рис. 177. Функциональная схема устройства автоматизированного поиска неисправностей в цепях управления

ную проверку всех основных цепей управления затрачивается меньше одной минуты.

**Средства контроля и диагностирования системы регулирования (САР) генератора.** САР генератора относится к классу непрерывных объектов контроля. Методами технической диагностики САР генератора решаются две задачи: проверка правильности функционирования и оценка ее работоспособности и поиск отказавших элементов.

В существующей практике эксплуатации тепловозов эти задачи решены не полностью. Проверка правильности функционирования и оценка работоспособности САР осуществляются по выходным параметрам: току и напряжению генератора, измеряемым посредством шкальных приборов. Низкий класс точности этих приборов (2,5 или 1,5), а также значительные погрешности отсчета по шкале с большой ценой деления обуславливают невысокую достоверность получаемой при таком контроле информации. И если работоспособность САР генератора снижается, то это обнаруживается только при уменьшении мощности генератора на 7—10% номинального значения. Причина параметрического отказа в узлах САР в эксплуатации не может быть обнаружена, так как в целом система к этому не приспособлена. В итоге несовершенство схемной реализации и пренебрежение требованиями контролепригодности САР генератора приводят к значительному недоиспользованию мощности тепловозов и снижению эффективности тепловозной тяги.

Одним из решений задачи технической диагностики САР генератора является предложенное ЛИИЖТом устройство автоматического контроля работоспособности и поиска неисправности САР тепловозов (рис. 178). Принцип действия устройства основан на контроле обобщенного показателя качества системы и автоматическом последовательном опросе всех контролируемых узлов системы при отклонении этого показателя за установленный допуск. За обобщенный показатель качества САР принята мощность генератора. Узлы системы также контролируются по обобщенному выходному параметру. Система сбора информации об этих сигналах состоит из датчиков Д1—Д7 и датчика мощности генератора ДМ. Блок функционального преобразования сигналов включает в себя шесть схем сравнения и логические элементы: шесть элементов *И*, четыре *ИЛИ* и один *ИЛИ*. Блок индикации отказов может быть выполнен на светодиодах или лампах.

При практической реализации схема устройства может быть легко трансформирована применительно к любой схеме САР генератора тепловоза.

**Централизованный контроль и управление тепловозами.** Этот вид контроля обеспечивает циклическую поочередную реализацию элементарных проверок, входящих в алгоритм контроля. Информация о состоянии объекта поступает от первичных преобразователей, преобразующих различные неэлектрические величины в электрические. Дальнейшие операции осуществляются с электрическими сигналами, приведенными к унифицированной норме по току 0—5 мА или по напряжению 0—10 В.

Централизованный контроль осуществляется машинами или устройствами централизованного контроля и управления, встраиваемыми в тепловоз. К числу основных функций, выполняемых МЦКУ, относятся аналого-цифровое преобразование измеряемых параметров и обнаружение их отклонений от заданных уровней с выдачей сигналов на позиционное управление и сигнализацию. Результаты аналого-цифрового преобразования используются для цифровой регистрации, измерения по вызову и ввода данных в ЭЦВМ.

МЦКУ типа «Дельта» была впервые применена на дизель-поездах ДР1.

Машина «Дельта» предназначена для централизованного контроля различных параметров энергетической установки локомотива и автоматического управления отдельными его агрегатами. МЦКУ выполняет следующие основные функции: контроль всех или отдельных параметров с автоматической световой и звуковой сигнализацией при отклонении контролируемого параметра от заданного значения; сбор и первичную обработку информации, полученной от

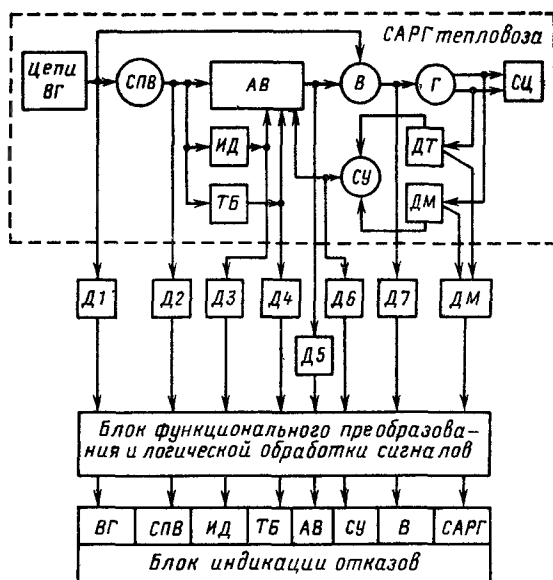


Рис. 178. Функциональная схема устройства автоматизированного контроля работоспособности и поиска дефектов САР генератора

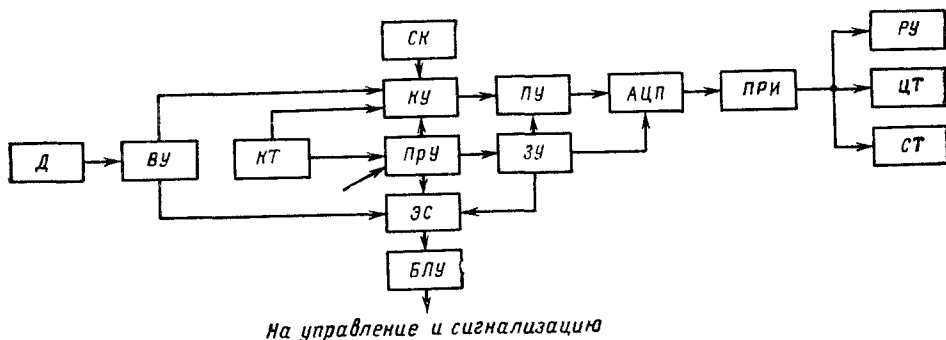


Рис. 179. Функциональная схема устройства централизованного контроля и управления тепловозов:

Д — датчики; ВУ — входное устройство; КУ — коммутирующее устройство; ПРУ — программное устройство; ЭС — элементы сравнения; БЛУ — блок логики управления; ПУ — преобразовательное устройство; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПРИ — устройство приема и распределения информации; СК — устройство самоконтроля; КТ — командное табло; ЦТ — цифровое табло; СТ — световое табло, РУ — регистрирующее устройство

датчиков с представлением адреса запроса или события; измерение контролируемого параметра по запросу машиниста с представлением результатов в виде цифровой индикации; автоматическое подключение контролируемого параметра для измерения и представления результата в виде цифровой индикации при отклонении с расшифровкой первой причины; автоматический и оперативный контроль исправности МЦКУ с указанием адреса неисправностей; автоматическое управление отдельными агрегатами локомотива.

Функциональная структура МЦКУ (рис. 179) состоит из функциональных блоков, выполняющих типовые операции. В МЦКУ предусмотрено выполнение контроля таких параметров, как температура, давление, частота вращения, ток, напряжение, уровень жидкости, освещенность. В зависимости от уровня этих параметров общее их количество достигает 32, из них с опросом на измерение 24; количество каналов сигнализации аварийной — 25 и предупредительной — 10. Время выполнения цикла по цифровому измерению всех параметров около 6 с. Погрешность измерения 1%. Выполненная в ЛИИЖТе оценка достоверности контроля с помощью МЦКУ приемлема для практики (около 97%).

В МЦКУ типа «Дельта» имеются основные недостатки:

1. Низкое быстродействие, что не соответствует основному назначению встроенной МЦКУ — обеспечение машиниста оперативной информацией, необходимой для ведения поезда.

2. Отсутствие регистрирующего устройства исключает возможность накопления информации о режимах работы и состоянии тепловоза на ЭЦВМ, а значит, и решение задачи анализа, диагностики и прогнозирования технического состояния тепловоза с помощью ЭЦВМ.

3. Неприемлемые для практики массо-габаритные показатели.

В создаваемом устройстве централизованного контроля и управления тепловозов (УЦКУТ) предусматривается устранение отмеченных недостатков. Применение микроэлектронной вычислительной техники дает возможность резко сократить объем и массу устройства и повысить его быстродействие, а, главное, расширить его функциональные возможности.

По сравнению с МЦКУ в УЦКУТ увеличено количество контролируемых параметров: аналоговых до 120 и дискретных до 64. Применение микропроцессоров позволяет по заложенным в них алгоритмам осуществлять автоматизированный поиск неисправностей в цепях управления и управление движением поезда по экономическому режиму. С помощью микропроцессоров (или микроЭВМ) представляется возможным производить предварительную обработку информации непосредственно на тепловозе и тем самым добиваться ее сжатия, а значит, и сокращения объема памяти во внешнем запоминающем устройстве (ВЗУ). Накопление информации в ВЗУ производится на магнитной ленте. Последующая обработка информации о техническом состоянии каждого тепловоза и ее накопление в стационарных ЭВМ послужат научной основой не только совершенствования учета выполненной работы каждым локомотивом и каждой локомотивной бригадой, но и, главное, поиска и обоснования новых принципов построения системы обслуживания и ремонта тепловозов. На решение этой проблемы направлены также работы по созданию *стационарной СТД* тепловозов. В структуре этой СТД предусматривается использовать стационарную ЭВМ, регламентирующую выполнение всех проверок по заложенным в ней программам, и вывод информации на носители информации ВЗУ.

Эффективность внешней и встроенной СТД определяется как объемом и достоверностью получаемой информации, так и мерой повышения эффективности использования тепловозов. Во многом эффективность СТД будет определяться приспособленностью тепловозов для выполнения в полном объеме операций контроля и диагностирования.

## ГЛАВА 13

# ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЗА

---

### 57. ПРОГРЕССИВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

На современных мощных грузовых тепловозах 2ТЭ10В и 2ТЭ116 нашли применение многие достижения отечественной техники в области тягового электромашиностроения и автоматизации тяговых и вспомогательных агрегатов. Высокий уровень развития бесконтактной электронной аппаратуры, микроэлектроники позволяет успешно решать задачи комплексной автоматизации современных тепловозов.

На Ворошиловградском и Коломенском заводах построены опытные тепловозы мощностью 2950 и 4420 кВт в секции с передачей переменного и переменного тока. Энергетические возможности создания таких локомотивов обеспечиваются освоением отечественной промышленностью четырехтактных тепловозных дизелей типа Д49 агрегатной мощностью до 2950 кВт и более при частоте вращения вала 1000 об/мин с расходом топлива 210 г/(кВт·ч) и высоким моторесурсом.

Широко развернуты работы по созданию и освоению тепловоза с передачей на переменном токе. Такого рода передача позволяет реализовать значительную мощность при существующих габаритах локомотивов и способствует повышению их эксплуатационной параметрической надежности. Первый элемент такой передачи — синхронный генератор освоен заводом «Электротяжмаш», начиная с тепловозов ТЭ109 и 2ТЭ116. Разрабатывается тяговый привод с асинхронным двигателем тепловозов ТЭ120. Основную трудность в применении на локомотивах асинхронных тяговых электродвигателей представляет создание системы их регулирования.

Естественная характеристика таких двигателей — жесткая, что не соответствует целям тяги. Академиком М. П. Костенко доказана возможность получения любого вида характеристики асинхронного двигателя при регулировании частоты и питающего напряжения в определенной закономерности. Исследованиями Проблемной лаборатории электрической тяги на переменном токе при ЛИИЖТе теоретически и практически доказана также и возможность изменять характеристику асинхронного двигателя за счет регулирования скольжения. Наиболее целесообразным, по-видимому, окажется комбинированное регулирование.

Положительные опыты регулируемого асинхронного тягового привода впервые были получены на тепловозе ВМЭ1А, оборудованном передачей переменного тока силами лаборатории ЛИИЖТа и депо Ленинград-Варшавский Октябрьской дороги. Эта передача выполнена со звеном постоянного тока. В качестве выпрямителей и инверторов использованы тиристоры. В этой передаче каждый асинхронный двигатель имеет собственный узел регулирования. Этим исключаются возможности неравномерной нагрузки двигателей. В отличие от ранее освоенных систем регулирования здесь использована четвертая координата состояния энергетической цепи — частота вращения тяговых электродвигателей.

Коллективы заводов «Электротяжмаш» и Ворошиловградского тепловозостроительного являются пионерами применения тяговых машин переменного тока на мощных тепловозах. Построен и подвергается всесторонним испытаниям тепловоз ТЭ120 с передачей на переменном токе мощностью 4420 кВт. В испытаниях и анализе их результатов активно участвуют авторы передачи — ученые ЛИИЖТа.

Переход на передачу переменного тока стал возможным благодаря способности асинхронного двигателя реализовать большую скорость движения тепловоза. Питание двигателей трехфазным переменным током усиливает их взаимную электрическую связь и при параллельном соединении в значительной мере исключает возможность боксования движущих осей локомотива. Это повышает использование сцепного веса тепловоза, а следовательно, позволяет уменьшить массу локомотива без снижения его тяговых свойств. Практически это обеспечивается меньшими размерами и меньшей массой машин переменного тока. Очень прост переход асинхронного двигателя в тормозной режим, что существенно важно особенно в пассажирском движении.

Значительные эксплуатационные и экономические преимущества обусловлены также уменьшением объема работ по осмотру и ремонту двигателей. В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором отсутствуют щетки и контактные кольца или коллектор, т. е. элементы, наиболее подверженные повреждению в тяговых двигателях постоянного тока. Уменьшение массы тяговых машин и габаритов тяговых двигателей позволяет усовершенствовать и экипажную часть тепловоза. Динамическое воздействие на путь уже при существующем выполнении ходовых частей тепловоза за счет свойств асинхронного двигателя уменьшается на ~ 50%.

В перспективе развития отечественного тепловозостроения значительное внимание уделяется и системе привода к движущим осям локомотива. Достоинства индивидуального привода, определяемые возможностью варьирования режима работы двигателей за счет изменения схемы их соединения, начиная с тепловоза ТЭЗ, не используются.

Широкие возможности регулирования напряжения генератора при неизменном режиме работы дизеля и регулирования режима тяговых электродвигателей воздействием на их возбуждение, где значительный интерес в передаче постоянного тока представляют системы с независимым возбуждением, позволяют осуществлять передачу с неизменной схемой соединения двигателей, что дает возможность полностью загрузить дизель в широком диапазоне тяговой нагрузки.

Анализируются и условия применения группового привода, имеющего ряд достоинств, как, например, уменьшение массы и стоимости комплекта тяговых электродвигателей.

Длительное время на тепловозах использовался только постоянный ток как в энергетической цепи, так и во всех вспомогательных цепях регулирования. Впервые машина переменного тока — синхронный генератор-возбудитель — появилась на тепловозе ТЭ10.

Индукционные свойства переменного тока позволяют использовать синхронный возбудитель не только по прямому назначению, но и как источник питания отдельных цепей пониженным напряжением через распределительный трансформатор. Это дает возможность применять в качестве датчиков сигналов регулирования генератора магнитные усилители ТПТ и ТПН, тахометрический и индукционный датчики.

Введение переменного тока позволило применять двигатели переменного тока для агрегатов собственных нужд и двигатели постоянного тока различного напряжения при питании через трансформатор и выпрямители.

## 58. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ЗАЩИТЫ

Широкое применение бесконтактных аппаратов на тепловозах переменного тока и полупроводниковой аппаратуры потребовали внедрения систем автоматического регулирования и защиты энергетических и вспомогательных агрегатов тепловоза, а также и контроля за их состоянием.

Все большее внимание уделяется состоянию всех элементов энергетической цепи при работе на переходных режимах. Для уменьшения влияния этих режимов на экономичность работы тепловоза совершенствуются аппараты регулирования частоты вращения вала и мощности дизеля, например, применением плавного, беспозиционного регулирования. Количество переходных процессов в системе дизеля можно уменьшить путем быстрого действия систем регулирования элементов энергетической цепи настолько, чтобы они протекали, не успевая оказать влияние на состояние дизеля. Весьма перспективна в этом отношении адаптивная система.

Наиболее резкие переходные режимы в электрических звеньях исключены современным функциональным и структурным построением силовой цепи, например отказом от изменений схемы соединения тяговых двигателей при работе тепловоза. Значительно смягчается или исключается полностью влияние процесса боксования на режим тягового генератора, а значит, и дизеля при применении комплексного противобоксовочного устройства, разработанного ВНИИЖТом. Одним из решений в этой системе является схема подачи сигнала регулирования генератора по току его нагрузки — от двигателя небоксующей оси.

Можно привести много практических усовершенствований, вносимых на основании тщательного анализа работы всей системы тепловоза и отдельных его элементов. На всех тепловозах с передачей переменного тока — от самых мощных до маневрового ТЭМ7 применена одинаковая система регулирования возбуждения тягового генератора: с комплексным селективным узлом, где формируется сигнал, передаваемый в блок управления возбуждением для программного управления включением и выключением тиристоров. Различия в схемах заключаются в числе однотипных элементов и в некотором разнообразии их расположения в схеме.

Для улучшения взаимозаменяемости и организации ремонта полупроводниковых аппаратов в условиях депо вводится комплектование элементов системы регулирования из готовых узлов по так называемой системе КУА (комплектное устройство автоматики). В каждой определенной схеме используется необходимое в ней количество элементов блока; блоки соединяются в соответствии со схемой. Неиспользованные в данной схеме элементы являются резервными. Блоки выполняются печатным способом, имеют малые габариты и массу. При неисправности блоки заменяют.

Сложностью функций элементов энергетической цепи современного мощного тепловоза и вспомогательных его агрегатов, а также и сложностью узлов автоматического регулирования обусловлена необходимость контроля за состоянием большого количества параметров и координат всего комплекса тепловоза. Для уменьшения психологической нагрузки машиниста тепловоза большое внимание уделяется комплектованию измерительных приборов и их размещению на пульте управления по принципу «Необходимо и достаточно».

Большое значение приобретают способы и средства диагностики состояния элементов энергетической цепи тепловоза, его вспомогательных агрегатов и аппаратуры. Работа в этой области направлена на формирование критериев состояния, разделения диагностики на оперативную — на тепловозе при его работе и на стационарную — в депо и на ремонтных заводах.

В этом направлении работают тепловозники многих вузов — Ленинградского, Харьковского, Белорусского, Омского и др. Разрабатываются оригинальные элементы и системы контроля и информации и анализируются возможности применения уже освоенных отечественной промышленностью информационно-измерительных систем (ИИС).

При очень большом количестве координат состояния энергетической цепи тепловоза и его вспомогательных агрегатов исследования направлены прежде всего на выбор координат, подлежащих постоянному (непрерывному), периодическому или единичному контролю. Определяются и функции централизованного и локального контроля.

## 59. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ТЕПЛОВОЗА

Современный уровень системы автоматики и многообразие ее элементов позволяют не только автоматизировать регулирование энергетической установки локомотива, но и управление им при ведении поезда.

Автоматизация управления движением хорошо освоена в метрополитене, а отдельных процессов управления на электровозах и электропоездах. В этих системах управления для передачи сигналов используются тяговая электрическая сеть и цепи путевых сигналов. В течение ряда лет проводятся работы по созданию «автомашиниста» для тепловоза, что значительно сложнее вследствие отсутствия сети энергоснабжения. Проблемой «автомашиниста» для тепловоза в основном занимаются в Ленинградском и Белорусском институтах железнодорожного транспорта.

Актуальность этой задачи определяется ростом грузооборота и интенсивностью пассажирских перевозок, повышением скорости движения.

Естественно стремление разгрузить машиниста от внутренних операций управления и тем самым создать условия для повышения его бдительности при

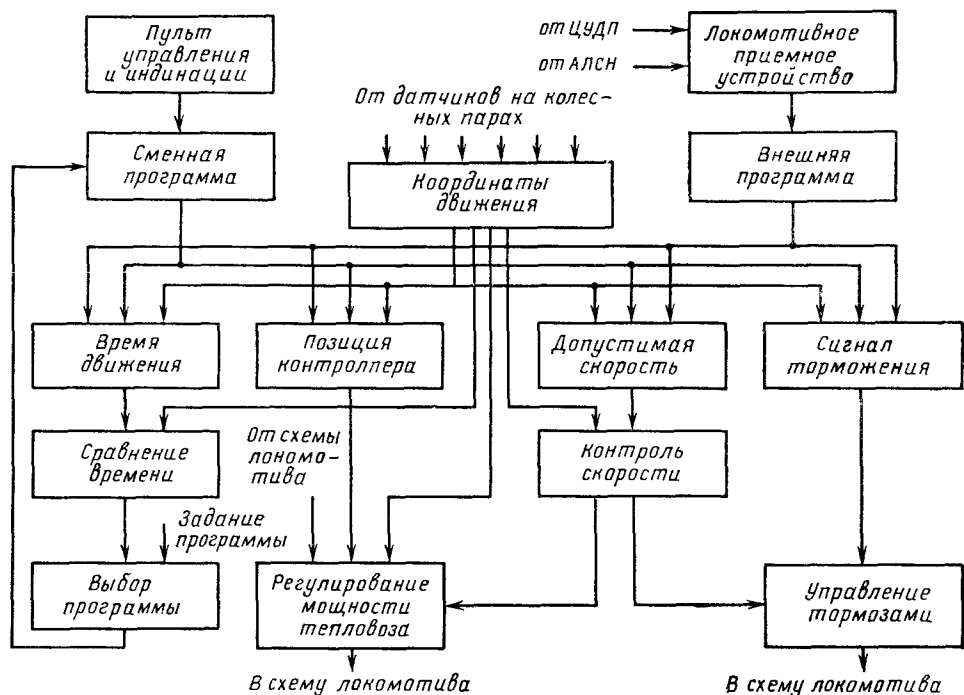


Рис. 180. Функциональная схема автоматического управления движением тепловоза

ведении поезда. При скорости 200 км/ч и более психологическая нагрузка машиниста значительно возрастает. В таких условиях автоматическое управление необходимо. Задача должна решаться с учетом минимального расхода топлива. В качестве примера практического выполнения системы автоматического управления для грузового тепловоза может быть рассмотрена система ЛИИЖТа, функциональная схема которой приведена на рис. 180.

Программа управления составляется применительно к тепловозу определенной серии для всех направлений обслуживаемых депо приписки таких тепловозов. Для каждого направления на основе тяговых расчетов при ориентации на выполнение графика движения при минимальном расходе топлива разрабатывается комплект программ для широкой градации веса состава. Каждая из таких программ устанавливается для требуемого направления, а в самой программе определяется вес поезда, заданный по поездным документам. Система поисковая, самонастраивающаяся; текущие координаты движения — скорости, пути и времени, поступающие от датчиков, сопоставляются с программными значениями, и при их расхождении система переключается на режим управления, устраняющий рассогласование с программой.

Система переключает цепи управления тепловозом, которые при ручном управлении переключаются при перемещении рукоятки контроллера. Система может быть выключена или включена в любой точке пути следования по усмотрению машиниста. Предусмотрена ее связь через локомотивное приемное устройство с АЛСН и центральным постом диспетчерского управления.

Поездные испытания подтверждают работоспособность системы и удовлетворительное выполнение программы с четким соблюдением графика движения при расходе топлива на 2—3% ниже установленных норм. Система полностью применима и для пассажирского движения и для любого типа локомотива.

Один из ее элементов — устройство для измерения скорости и пути, пройденного локомотивом, — приобрел и самостоятельное значение в элементарном скоростемере, разработанном в ЛИИЖТе.

Принцип системы «автоведения» поезда, разработанный в БИИЖТе, и техническое ее выполнение иные, но задачи те же — выполнение графика движения при оптимальных условиях.

Целесообразность применения той или иной системы может быть определена после длительной опытной эксплуатации. Результаты обобщения и анализа данных испытаний разных систем могут быть положены в основу разработки единой системы автоматического управления тепловозов различного назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. 2-е изд. М.; Энергия, 1977. 445 с.
2. Виноградов Н. В.; Горяинов Ф. А.; Сергеев П. С. Проектирование электрических машин. М.; Энергия, 1969. 632 с.
3. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. М., Наука, 1966. 327 с.
4. Проектирование тяговых электрических машин. Под ред. М. Д. Находкина. М., Транспорт, 1976. 432 с.
5. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины. Госэнергоиздат, 1957. 412 с.
6. Электрические машины и электрооборудование тепловозов/ Е. Я. Гаккель; К. И. Рудая и др. Под ред. Е. Я. Гаккель, 2-е изд.; перераб. и доп. М.; Транспорт, 1974. 296 с.
7. Лапин А. В.; Мельников В. И. Электрические машины. Асинхронные двигатели с К. З. ротором для устройств ж.-д. транспорта. ЛИИЖТ, 1975. 63 с.
8. Справочник по электроподвижному составу; тепловозам и дизель-поездам. Том II/ Под ред. Тищенко А. И. М.; Транспорт, 1976. с. 376.
9. Проектирование статических преобразователей. Энергия, М., 1974. 298 с.
10. Тепловозы ТГМ4 и ТГМ4А. 2-е изд. М.; Транспорт, 1980. 182 с.
11. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М.; Высшая школа, 1970, 270 с.
12. Гаккель Е. Я.; Рудая К. И. Проектирование и расчет электрических передач тепловоза. М.; Транспорт, 1972. 150 с.
13. Электропередача тепловозов на переменном-постоянном токе/ И. К. Колесников; Т. Ф. Кузнецов, В. И. Липовка и др. М.; Транспорт, 1978. 149 с.
14. Вилькевич Б. И. Автоматическое управление электрической передачей тепловозов. М.; Транспорт, 1978. 85 с.
15. Тепловоз 2ТЭ10В. Руководство по эксплуатации и обслуживанию. М., Транспорт, 1975. 432 с.
16. Тепловоз 2ТЭ116/ С. П. Филиппов, А. И. Гибалов и др. М.; Транспорт, 1977. 320 с.
17. Каганов И. Л. Промышленная электроника. М.; Высшая школа, 1968. 560 с.
18. Пушкарёв И. Ф. Бесконтактные электрические аппараты тепловозов. М., Транспорт, 1973. 96 с.
19. Шопен Л. В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. М., Энергия, 1976. 568 с.
20. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Изд. 3-е. Под ред. Н. И. Горюнова. М., Энергия, 1972. 568 с.
21. Пушкарёв И. Ф. Контроль и анализ технического состояния тепловозов. ЛИИЖТ, Л., 1977. 48 с.
22. Диагностика и регулировка тепловозов. М.; Транспорт, 1977. 222 с.
23. Бородин А. П. Проверка цепей управления тепловозов ТЭЗ и 2ТЭ10Л. М.; Транспорт, 1976. 72 с.
24. Мозгалевский А. В.; Гаскаров Д. В. Техническая диагностика. М., Высшая школа, 1975. 207 с.
25. Проектирование системы автоматического управления и защиты тепловозов. /Е. Я. Гаккель; И. Ф. Пушкарёв, В. В.; Стрекопытов, Ф. Ф. Сабуров/ изд. 2-е. М.; Транспорт, 1979. 200 с.

## АЛФАВИТНО-ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Автоматическое регулирование: генератора 9—18;  
дизеля 9; тяговых электродвигателей 19—22  
Алгоритмы 240, 241  
Амплитат 173, 174  
Аппараты коммутационные: контакторы 111—113;  
контроллер машиниста 114, 115; реверсоры 113—  
114  
Аппараты магнитные: бесконтактное тахометри-  
ческое устройство 172; индуктивный датчик 171;  
магнитные регуляторы 173, 174; трансформаторы  
постоянного тока и постоянного напряжения 170,  
171  
Аппараты шеточные 29, 32  
Арнольда постоянная, см. машинная постоянная

### Б

Батареи аккумуляторные кислотные 95  
— — щелочные 96, 97  
Блок тахометрический бесконтактный, см. устрой-  
ство тахометрическое

### В

Вентили полупроводниковые 15, 144—149  
— электропневматические 132  
Вентиляция генераторов 25—27  
Вероятность безотказной работы 221  
Влияние параметров обмоток на характеристики  
возбудителя 78—80  
Внешняя характеристика генератора 11  
Возбудители переменного тока 82—84  
Возбудители с расщепленными полюсами: расчет  
основной характеристики 75; схема возбуждения  
тепловоза ТЭ3 72, тепловозов ТЭ1, ТЭ2, ТЭМ2  
75  
Вольт-амперная характеристика 145  
Выпрямители однофазного тока 133  
— трехфазного тока 135  
— управляемые 136—139

### Г

Генератор синхронный: конструкция 37; параметры  
36; характеристика 39  
Генераторы вспомогательные 91  
— выпущенные 140  
Генераторы тяговые постоянного тока: вентиляция  
25; конструкция 27  
Граф системы тепловоза 2ТЭ10Л 230

### Д

Датчик индуктивный 171, 172  
Диагностика техническая 237  
Диаграмма управления тиристором — 145  
Дизель регулирования 9  
— характеристики 4, 9

### Е

Емкость аккумуляторов 98

### И

Изоморфизм графа 230  
Инверторы: классификация 141, 142; способы ре-  
гулирования напряжения 143, 144  
Интенсивность отказов 221  
Испытания тяговых машин на нагревание 64  
— — — пусковые 69  
— — — на холостом ходу 63

### К

Катушки синхронного генератора 38  
— тягового генератора 32, 34  
— — электродвигателя 41, 44  
— электрических аппаратов 103  
Коллекторы тягового генератора 28  
— — электродвигателя 42  
Коммутация инверторов 142  
Контакт 103  
Контакторы 111—113  
Контроллер машиниста 114, 115  
Контроль централизованный параметров теплово-  
за 245, 246  
Координата входа 6  
— выхода 6  
Кривая остывания 66  
Коэффициент возврата реле 117, 218  
— заполнения катушки 105  
— картера (воздушного зазора) 55

— кратности тока нагрузки 165  
— мощности выпрямителя 139  
— обратной связи 167  
— регулирования 48  
Коэффициент трансформации 133  
— утолщения 54

### М

Магнитные усилители, см. усилители магнитные  
Материалы изоляционные 103—105  
Машинная постоянная 51  
М. д. с. воздушного зазора 53  
— зубцов 56  
— полюсов 56  
Метод Иоффе 62  
— Потье 62  
Модуляция импульсная 24  
Мощность касательная 8

### Н

Надежность параметрическая 228  
— полупроводниковых приборов 227  
— электрических машин 223—225  
— электромеханических реле 226  
Напряжение переключения 153  
Наработка на отказ 221

### О

Обмотка задающая 180  
— намагничивающая 180  
— размагничивающая 180  
— статора синхронного генератора 38  
Обмотки якоря тягового генератора 29, 30  
— — электродвигателя 42  
Объект диагностирования 239

### П

Передача гидравлическая 3  
Передача механическая 3  
— электрическая 4  
Переключение ступеней гидропередачи 218  
Преобразователи статические тока и напряжения  
133  
Приборы полупроводниковые 14, 15  
Приводы реверсоров 114  
Принцип вертикального управления 141  
Ползунова-Уайта 23  
— Чиколева-Понселе 23  
Проверка коммутации 67  
Провода обмоточные 104  
Подвозбудитель 7, 83  
Полюсы синхронного генератора 38  
— тягового генератора 33, 34  
— — электродвигателя 41  
Постоянная времени гидропередачи 218  
Пуск дизеля бесстартерный 94

### Р

Расчет возбудителей: основная характеристика 75;  
с продольным расщеплением полюсов 80—82;  
с радиальным расщеплением полюсов 77—80  
Расчет полупроводникового реле 157—159  
Расчет тяговых машин: магнитная цепь машины  
53—56; магнитодвижущая сила полюсов 56—59;  
характеристика холостого хода 59; э. д. с. маши-  
ны 60—62  
Расчет элементов аппаратов: катушки реле и а-  
ппаратов 103—107; контактные соединения 108;  
магнитная система 108—111  
Реверсоры 113, 114  
Регулирование генератора 9, 10  
— дизеля 9  
— импульсное 23  
— каскадное 12  
— машинное 12  
— прерывистое 23  
— по отклонению возмущения 22  
— — — регулируемой величины 23  
— позиционное 23  
Регуляторы: мощности 126—129; напряжения 129—  
131; боксования 119—121  
Режим вибрационный 23  
— ключевой 151, 152  
— работы при испытаниях 66  
— торможения 195, 196  
Реле: временн 123; боксования 119—121; давления  
125; заземления 118; максимального тока 124; об-  
ратного тока; управления 125

Реле времени полупроводниковые 155—157  
— магнитные бесконтактные 168, 169  
— переходов бесконтактные 154  
Релейно-контактные САУ 219

## С

САУ гидропередачи двухкоординатные 217  
— — — — — однокоординатные 217  
Связь обратная 7  
Системы автоматического управления САУ бесконтактные 220  
— — — — — релейно-контактные 219  
— — — — — смешанные 220  
Селективная характеристика 187  
Средства контроля и диагностики 242—244  
Стабилитроны 15  
Стартер-генератор 92, 93  
Схема блока управления тиристорами (БУВ) 185  
— возбуждения генератора при передаче переменного-постоянного тока 183  
— защиты от боксования тепловоза ТЭМ7 187  
— селективного узла 185  
— регулирования синхронного генератора 17  
— реостатного торможения 202, 205  
— функциональная автоматического управления движением тепловоза 250  
— — САУ гидропередачи 216  
— — электрического тормоза 203  
— электрическая тепловоза ВМЭ1А-024 192, 193  
— энергетической цепи тепловоза 8  
— электродинамического торможения 203  
Схемы передачи на переменном токе 22  
— функциональные регулирования 6  
— — управления 6  
Схемы электрические: классификация 175, 176; силовая цепь 177—180; узел возбуждения генератора тепловоза 2ТЭ10В 180—182; узел возбуждения генератора тепловоза с передачей переменного-постоянного тока 182—188; цепи управления тепловоза 2ТЭ10В 189—191  
Схемы электрические тепловозов и дизель-поездов с гидравлической передачей: устройства и цепи автоматической защиты 215, 216; цепи управления и блокирования реверса 211—214; цепи управления пуском 210, 211; цепи трогания 215

## Т

Тахогенератор 85  
Технические данные вспомогательных генераторов 91  
— — — — — подвозбудителей 84  
— — — — — стартер-генераторов 92  
— — — — — тахогенераторов 86, 195  
— — — — — тяговых генераторов 26  
— — — — — электродвигателей вспомогательных 89  
Тиристоры 148, 149  
Ток удержания 145  
Топливные элементы, см. элементы топливные  
Торможение реостатное 201—207  
— электрическое: способы регулирования тормозного усилия 195, 196; схемы электрические 200—208; тормозные характеристики 197—200  
Трансформатор постоянного напряжения 165, 170, 171  
— — — — — тока 165, 170, 171

## У

Угол коммутации 138  
Узел возбуждения генератора тепловоза 2ТЭ10В 180—182  
— — — — — с передачей переменного-постоянного тока 182—188  
— — — — — коррекции 83

Усилитель двухкаскадный 152  
Усилитель магнитный; в релейном режиме 168—170; простой (без обратной связи) 163—165; с обратной связью 165—168  
Усилитель с самонасыщением 166  
— тиристорный 159  
— транзисторный 151—154  
Устройства дугогасящие 111  
Устройство бесконтактное тахометрическое 172, 173

## Х

Характеристика вольт-амперная, см. вольт-амперная характеристика  
— звена 6  
— магнитного усилителя 167  
— нагрузочная тяговых машин 62  
— объекта с регулятором 7  
— регулировочная 7  
— полупроводниковых вентилей 16  
— техническая амплитуды 174  
— — — — — асинхронных двигателей 89  
— — — — — вспомогательных генераторов 91  
— — — — — выпрямителей 134  
Характеристика техническая подвозбудителя 84  
— — — — — реле времени 157  
— — — — — синхронных генераторов 36  
— — — — — стартер-генераторов 92  
— — — — — тахогенераторов 85, 86  
— — — — — трансформаторов ТПГ и ТПН 170  
— — — — — тяговых генераторов 41  
Характеристика техническая тяговых электродвигателей 41  
— — — — — переменного тока 45  
— — — — — шеток 225  
— — — — — электродвигателей вспомогательных механизмов 89, 91  
Характеристика холостого хода 59  
Характеристики генератора 11, 16  
— — — — — дизеля 9, 11  
— — — — — тормозные тепловоза 197—199  
— — — — — тяговые и экономические тепловоза с гидропередачей 217

## Ц

Цепи управления тепловоза 2ТЭ10В 189  
— — — — — электрические тепловозов с гидропередачей и дизель-поездов: управления блокирования реверса 211—214; управления пуском 210; трогания 215; устройства и цепи автоматической защиты 215  
Цепь силовая тепловоза 2ТЭ10В 177—180

## Щ

Щетки синхронного генератора 38  
Щеткодержатели реактивные 32  
Щеткодержатель электродвигателя 43

## Э

Э. д. с. машины 60  
Электродвигатель тяговый асинхронный 45—47  
Электродвигатель тяговый постоянного тока: конструкция 40—42; параметры 41; схема обмотки якоря 43; схема соединения обмоток 43; характеристики 19, 44  
Электродвигатели вспомогательных механизмов 86  
Электролит 96  
Электромагнит тяговых 132  
Элементы топливные 101  
Энергетическая цепь тепловоза: автоматическое регулирование 7—22; классификация видов регулирования 22—23

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                     |     |                                                                                            |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Введение                                                                            | 3   | 29. Иверторы                                                                               | 141 |
| Глава 1                                                                             |     | 30. Полупроводниковые вентили                                                              | 144 |
| Автоматическое регулирование энергетической цепи                                    |     | 31. Классификация и основные параметры тиристоров                                          | 148 |
| 1. Общие положения                                                                  | 6   | Глава 7                                                                                    |     |
| 2. Автоматическое регулирование энергетической цепи тепловоза                       | 7   | Бесконтактные аппараты                                                                     |     |
| 3. Классификация видов регулирования энергетической цепи                            | 22  | 32. Полупроводниковые аппараты управления                                                  | 150 |
| Глава 2                                                                             |     | 33. Основы расчета бесконтактного полупроводникового реле                                  | 157 |
| Конструкция тяговых электрических машин                                             |     | 34. Полупроводниковые регуляторы                                                           | 159 |
| 4. Генераторы постоянного тока                                                      | 25  | 35. Основные характеристики магнитных усилителей                                           | 162 |
| 5. Синхронные генераторы                                                            | 35  | 36. Магнитные аппараты                                                                     | 170 |
| 6. Тяговые электродвигатели                                                         | 39  | Глава 8                                                                                    |     |
| Глава 3                                                                             |     | Схемы электрических соединений тепловозов с электрической передачей                        |     |
| Основы расчета и испытания тяговых машин                                            |     | 37. Классификация схем                                                                     | 175 |
| 7. Основные положения                                                               | 48  | 38. Силовая цепь                                                                           | 177 |
| 8. Машинная постоянная. Взаимосвязь основных параметров                             | 51  | 39. Схемы узлов возбуждения и регулирования генератора                                     | 180 |
| 9. Основы расчета тяговых машин                                                     | 52  | 40. Узлы цепей управления                                                                  | 188 |
| 10. Испытания тяговых машин                                                         | 62  | 41. Схема тепловоза ВМЭ1А-024                                                              | 192 |
| Глава 4                                                                             |     | Глава 9                                                                                    |     |
| Вспомогательные электрические машины и источники энергии                            |     | Электрическое торможение                                                                   |     |
| 11. Назначение машин                                                                | 71  | 42. Общие сведения                                                                         | 194 |
| 12. Возбудители с расщепленными полюсами                                            | 72  | 43. Способы регулирования тормозного усилия                                                | 195 |
| 13. Расчет и настройка возбудителей                                                 | 75  | 45. Схемы электрических соединений при торможении                                          | 200 |
| 14. Возбудители и подвозбудители в системах с магнитными и тиристорными усилителями | 82  | Глава 10                                                                                   |     |
| 15. Тахогенераторы                                                                  | 84  | Электрическое оборудование тепловозов и дизель-поездов с гидравлической передачей          |     |
| 16. Электродвигатели вспомогательных механизмов                                     | 86  | 46. Цепи управления и защиты тепловозов и дизель-поездов                                   | 209 |
| 17. Вспомогательные генераторы                                                      | 91  | 47. Автоматизация переключения ступеней гидропередачи                                      | 216 |
| 18. Устройства для пуска дизеля                                                     | 92  | 48. Электрические системы автоматического управления гидропередачей                        | 219 |
| 19. Аккумуляторные батареи                                                          | 95  | Глава 11                                                                                   |     |
| 20. Топливные элементы                                                              | 100 | Надежность энергетической цепи тепловозов                                                  |     |
| Глава 5                                                                             |     | 49. Определение показателей надежности узлов и систем                                      | 221 |
| Электрические аппараты                                                              |     | 50. Расчет надежности элементов систем                                                     | 223 |
| 21. Общие сведения                                                                  | 102 | 51. Параметрическая надежность автоматизированных систем                                   | 228 |
| 22. Основы расчета элементов электромеханических аппаратов                          | 103 | 52. Построение кривой закона распределения ошибки и определение параметрической надежности | 231 |
| 23. Коммутационные аппараты                                                         | 111 |                                                                                            | 255 |
| 24. Реле                                                                            | 115 |                                                                                            |     |
| 25. Регуляторы                                                                      | 126 |                                                                                            |     |
| 26. Прочее электрооборудование                                                      | 131 |                                                                                            |     |
| Глава 6                                                                             |     |                                                                                            |     |
| Статические преобразователи тока и напряжения                                       |     |                                                                                            |     |
| 27. Выпрямители                                                                     | 133 |                                                                                            |     |
| 28. Управляемые выпрямители                                                         | 136 |                                                                                            |     |

## Глава 12

### Основы технической диагностики тепловозов

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 53. Предмет и задачи технической диагностики     | 237 |
| 54. Модели объектов диагностирования             | 238 |
| 55. Алгоритмы технического диагностирования ЭЭСТ | 240 |
| 56. Средства технического диагностирования ЭЭСТ  | 242 |

## Глава 13

### Перспективы дальнейшего развития электрической передачи и автоматизации тепловоза

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 57. Прогрессивные виды электрической передачи         | 247 |
| 58. Развитие систем автоматики регулирования и защиты | 249 |
| 59. Автоматическое управление движением тепловоза     | 250 |
| Список литературы                                     | 252 |
| Алфавитно-предметный указатель                        | 253 |

ЕКАТЕРИНА ЯКОВЛЕВНА ГАККЕЛЬ  
КСЕНИЯ ИВАНОВНА РУДАЯ  
ИВАН ФИЛИППОВИЧ ПУШКАРЕВ  
АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛАПИН  
ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ СТРЕКОПЫТОВ  
МИХАИЛ АНДРЕЕВИЧ НИКУЛИН

### Электрические машины и электрооборудование тепловозов

Алфавитно-предметный указатель составила *Н. П. Киселева*

Редактор *Н. П. Киселева*  
Переплет художника *А. А. Медведева*  
Технический редактор *Л. Н. Широкогорова*  
Корректор *О. Г. Голоцукова*

ИБ № 1185

---

Сдано в набор 08.09.80. Подписано в печать 02.03.81. Т-05081.  
Формат 70×100<sup>1/16</sup>. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Высокая печать.  
Усл. печ. л. 20,8+0,65 вкл. Усл. кр.-отт. 21,45. Уч.-изд. л. 22,44+0,59 вкл. Тираж 14 000 экз.  
Заказ 2164. Цена 1 р. 20 к. Изд. № 1-1-1/1 № 9189  
Издательство «ТРАНСПОРТ», 107174, Москва, Басманный туп., 6а

---

Московская типография № 4 Союзполчграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
129041, Москва, Б. Переяславская л., 46