



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования**

**«Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»**

**Кафедра «Системного анализа и  
ЛОГИСТИКИ»**

# **Транспортная энергетика**

**Преподаватель: доцент кафедры  
к.в.н., доцент *Уголков Сергей Вячеславович*  
8-921-325-18-12**

**Санкт-Петербург**

**5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ  
УСТАНОВКИ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА**

# Учебные вопросы

**5. Энергетические установки  
железнодорожного транспорта**

**5.1. Особенности энергетических  
установок тепловозов**

**5.2. Энергетические установки  
электровозов**

**5.2.1. Системы электроснабжения  
железных дорог**

**5.2.2. Тяговые трансформаторы**

*Движение поездов на железнодорожном транспорте осуществляется с помощью тягового подвижного состава - локомотивов.*

В зависимости от способа выработки механической энергии, обеспечивающей движение состава, различают **автономные** и **неавтономные** локомотивы.

**Автономные** это такие локомотивы, в которых первичная энергия вырабатывается в результате сжигания топлива на самом локомотиве.

Если первичная (электрическая) энергия подводится к локомотиву от внешних источников, то такие локомотивы называются **неавтономными**.



# АВТОНОМНЫЕ



# НЕАВТОНОМНЫЕ





Локомотивы с двигателями внутреннего сгорания (дизелями) называют **тепловозами**, с газотурбинными установками **газотурбовозами**. Если в качестве двигателя используется карбюраторные двигатели небольшой мощности, то **мотовозами** и **автомотрисы**.

*Все они относятся к автономным локомотивам. В зависимости от типа тепловозного двигателя КПД автономных локомотивов достигает 29-31%.*



# ТЕПЛОВОЗЫ МАГИСТРАЛЬНЫЕ





# ТЕПЛОВОЗЫ МАНЕВРОВЫЕ





# Магистральный газотурбовоз

# ГТ1

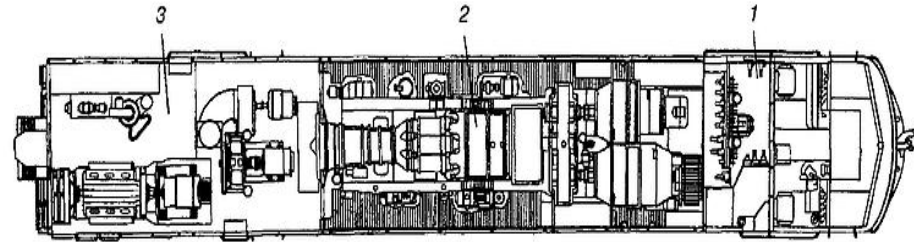
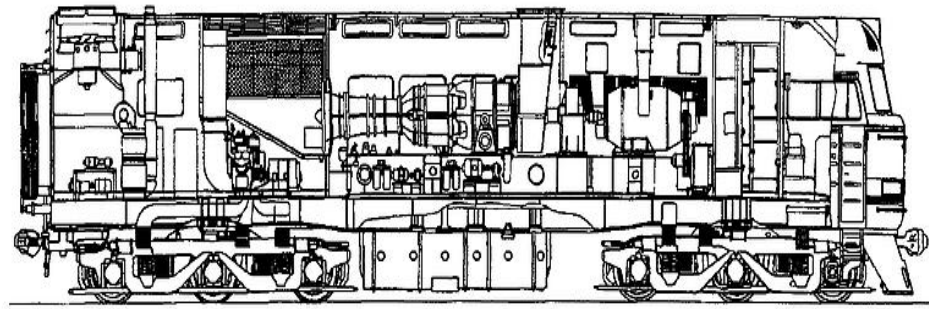


Рис. 5.25. Размещение оборудования на газотурбовозе ГТ-01 (общий вид и план) 1 – отсек с кабиной машиниста и высоковольтной камерой, 2 – отсек для газотурбинного двигателя, редуктора и тяговых генераторов постоянного тока, 3 – отсек для вспомогательного оборудования

# ГАЗОТУРБОВОЗЫ







# ДИЗЕЛЬ ПОЕЗДА





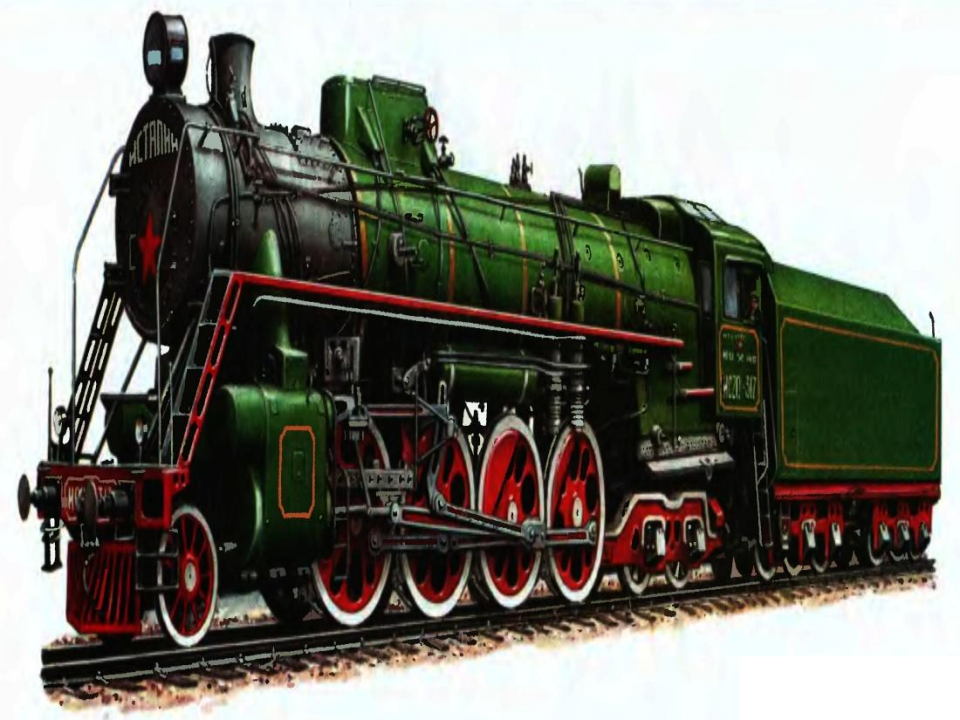
# МОТОВОЗЫ











# ПАРОВОЗЫ





Неавтономные локомотивы, к которым подводится электрическая энергия, называют **электровозами**. К неавтономным также относят **моторные вагоны** (например, пригородные электропоезда).

В отличие от автономного подвижного состава в них осуществляется лишь преобразование электрической энергии в механическую энергию движения поезда. Энергию неавтономный подвижной состав получает от электростанций через тяговые подстанции и контактную сеть.





# ЭЛЕКТРОВОЗЫ







# МОТОРВАГОНЫ







МЕТРОВАГОНЫ



# МОТОВАГОНЫ МЕТРО



© Artfemy, Lebedev

**Учебный вопрос 5.1**  
**ОСОБЕННОСТИ**  
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ**  
**УСТАНОВОК ТЕПЛОВЗОВ**



Силовая энергетическая установка (дизель) тепловоза передает механическую энергию вращения коленчатого вала ведущим колесам через передачу. Под словом **"передача"** понимают совокупность особых устройств, которые и осуществляют передачу мощности от дизеля к движущим колесам тепловоза. Главное назначение передачи сохранить неизменным режим работы дизеля: в любых режимах вращающий момент дизеля остается неизменным, в то время как на вращающихся колесах момент изменяется в соответствии с **тяговой характеристикой**.

**Тяговая характеристика тепловоза** - это зависимость силы тяги от скорости движения.

При трогании с места тепловоз должен развивать максимальную силу тяги  $F_{max}$  для преодоления силы инерции массы поезда. Но при этом сила тяги не должна быть чрезмерно большой, чтобы не допустить проскальзывание колес (буксование), что может привести к остановке поезда. *В то же время при разгоне скорость тепловоза не должна превышать так называемую конструкционную скорость. Иначе возможны сход поезда с рельсов или повреждение отдельных частей механизма.*

*Для наилучшего использования мощности двигателя тепловоза стремятся к тому, чтобы в любом режиме движения развиваемая мощность была близка к максимальной. А это значит, что зависимость силы тяги от скорости должна представлять собой линию равной мощности, т.е. иметь форму гиперболы.*



Сила сопротивления движению поезда зависит от многих факторов, основные из которых - это наклон пути и величина скорости состава. При равенстве силы тяги и силы сопротивления поезд будет двигаться с установившейся, т.е. равномерной (равновесной) скоростью. На рис. 5.1 точки пересечения тяговой характеристики (1) тепловоза с кривыми (2,3,4) сопротивления движению соответствуют движению состава с равновесной скоростью. Так, если кривая 2 соответствует силе сопротивления движению поезда по горизонтальному участку, то скорость  $V_A$  - скорость движения, соответствующая режиму тяговой характеристики. С увеличением крутизны подъема (кривые 3,4) скорость движения локомотива снижается ( $V_C < V_B$ ), сила тяги возрастает, но двигатель продолжает работать с постоянной мощностью, т.е. в наиболее выгодном режиме.



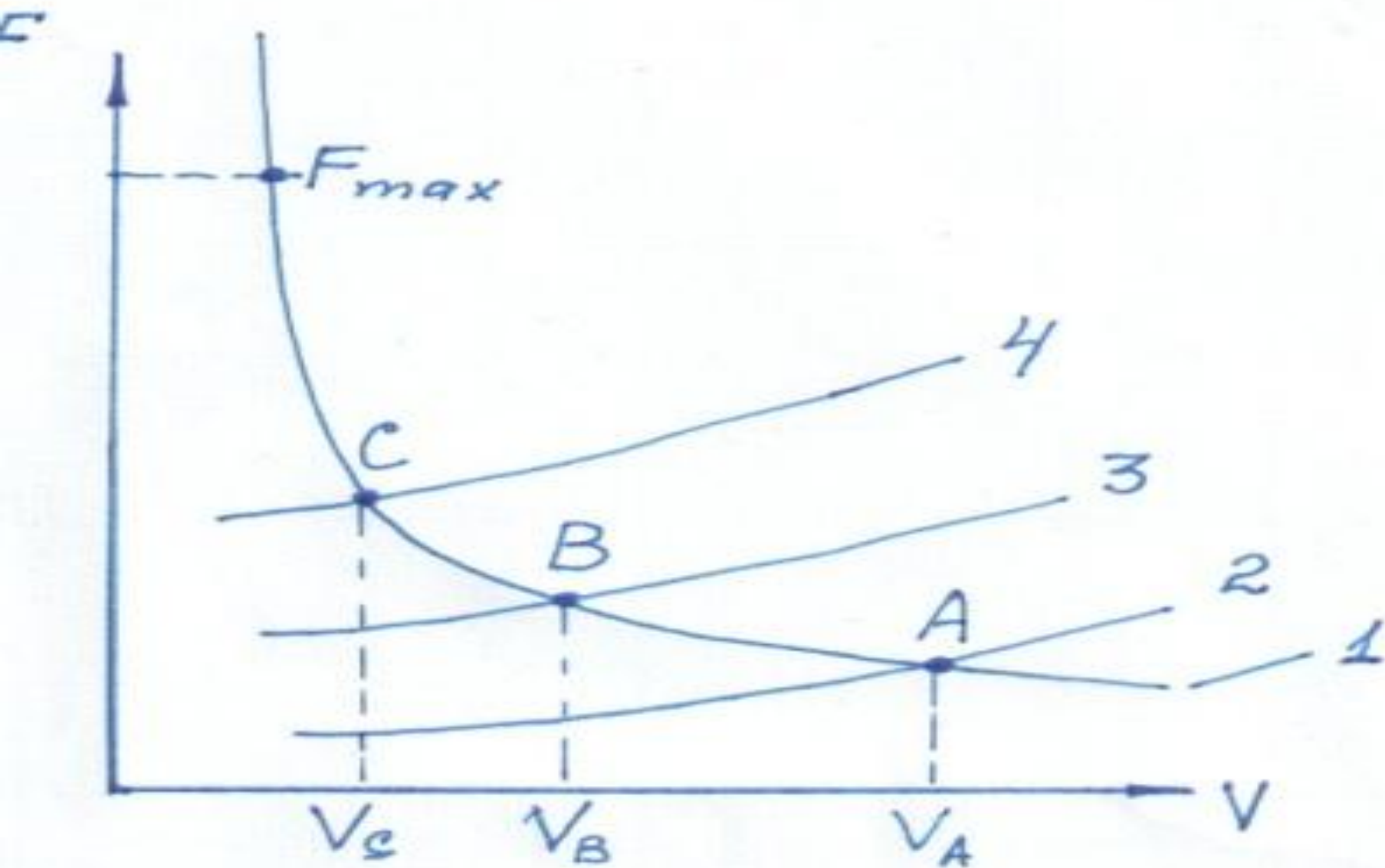


Рис.5.1. Тяговая характеристика (1) тепловоза и кривые сопротивления движению (2,3,4) при разных наклонах пути



На рисунке отмечена максимальная допустимая сила тяги  $F_{max}$ , о которой говорилось выше. При движении поезда на участке с небольшим спуском, скорость возрастает, сила тяги уменьшается, но мощность также остается постоянной. Если спуск крутой и продолжительный, то для ограничения скорости движения машинисту необходимо отключить тягу и применить торможение, чтобы не превысить максимально допустимую скорость.



Передачи в зависимости от состава устройств могут быть механическими, гидравлическими, электрическими. Не останавливаясь на их сравнительной характеристике, отметим только, что с увеличением мощности дизелей наиболее целесообразной с точки зрения конструктивной сложности является электрическая передача, которая и получила распространение на современных тепловозах. В настоящее время КПД электрической передачи тепловозов достигает 82-86% при работе на номинальной мощности.



*В качестве примера расположения силового оборудования тепловоза с электрической передачей на рис. 5.2 представлена схема тепловоза 2ТЭ10В.*

Тяговый генератор (1) приводится во вращение дизельной установкой (3). Вырабатываемая генератором (1) энергия приводит во вращение тяговые электродвигатели (4). Электродвигатель (2) топливоподкачивающего насоса обеспечивает подачу топлива в дизельную установку. Двухмашинный агрегат (6) является преобразователем рода тока, что необходимо для питания вспомогательного оборудования тепловоза. Аккумуляторные батареи (5) используются для запуска дизеля. Заряд аккумуляторных батарей после пуска дизеля осуществляется от вспомогательных генераторов.



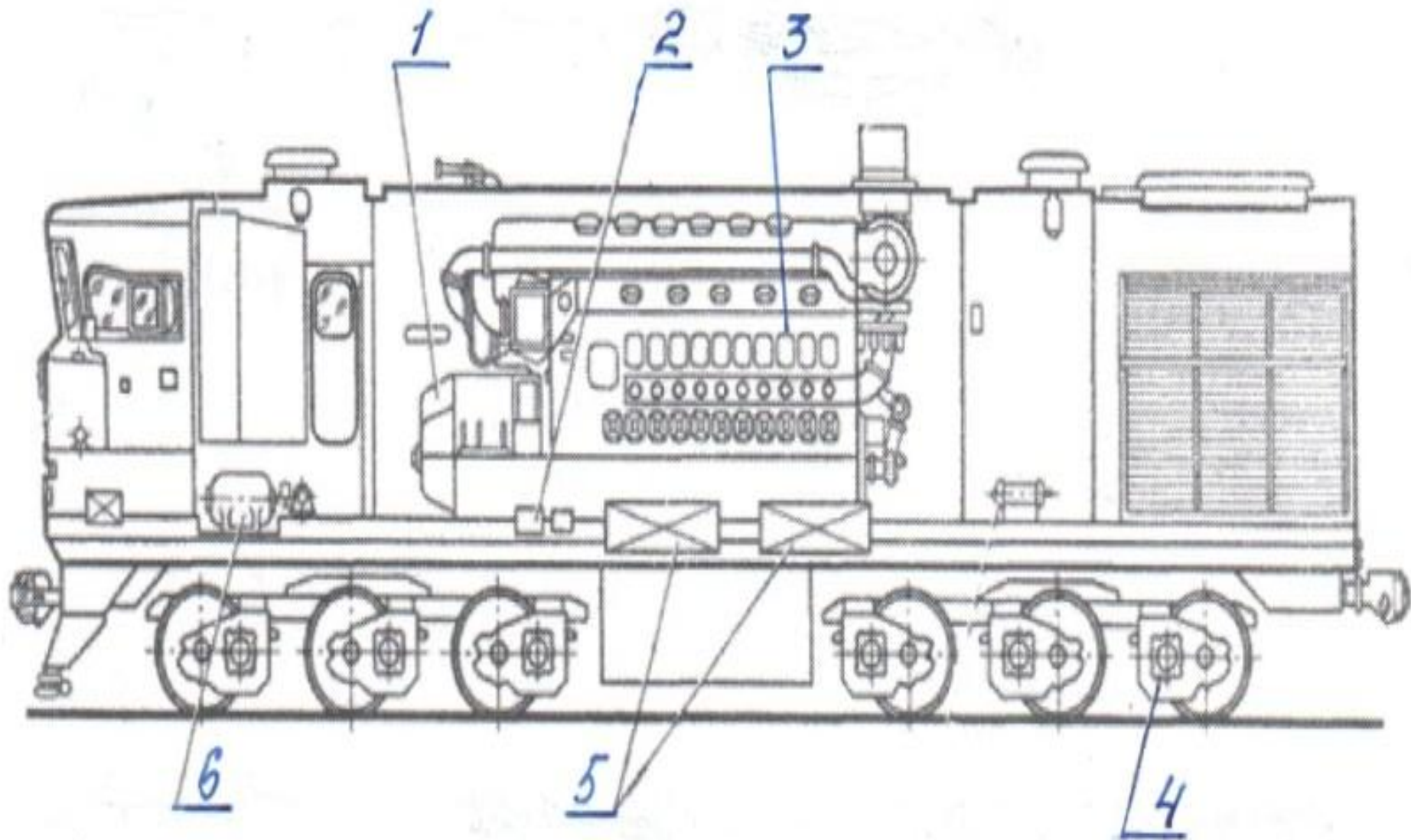


Рис.5.2. Схема расположения оборудования  
тепловоза 2ТЭ10В



Существуют три основных вида электрических передач: **постоянного тока, постоянно-переменного тока** и **переменно-переменного тока**. Их структурные схемы представлены на рис. 5.3.

В передачах на постоянном токе используются тяговые электрические машины (генераторы  $\Gamma$  и двигатели 1,2, ...) постоянного тока. Ротор генератора  $\Gamma$  приводится во вращение дизелем  $\Delta$ . Генератор  $\Gamma$ , в свою очередь, питает тяговые двигатели 1,2, ..., число которых определяется конструктивной схемой и мощностью тепловоза. Передача постоянного тока получила наибольшее распространение на отечественных тепловозах.



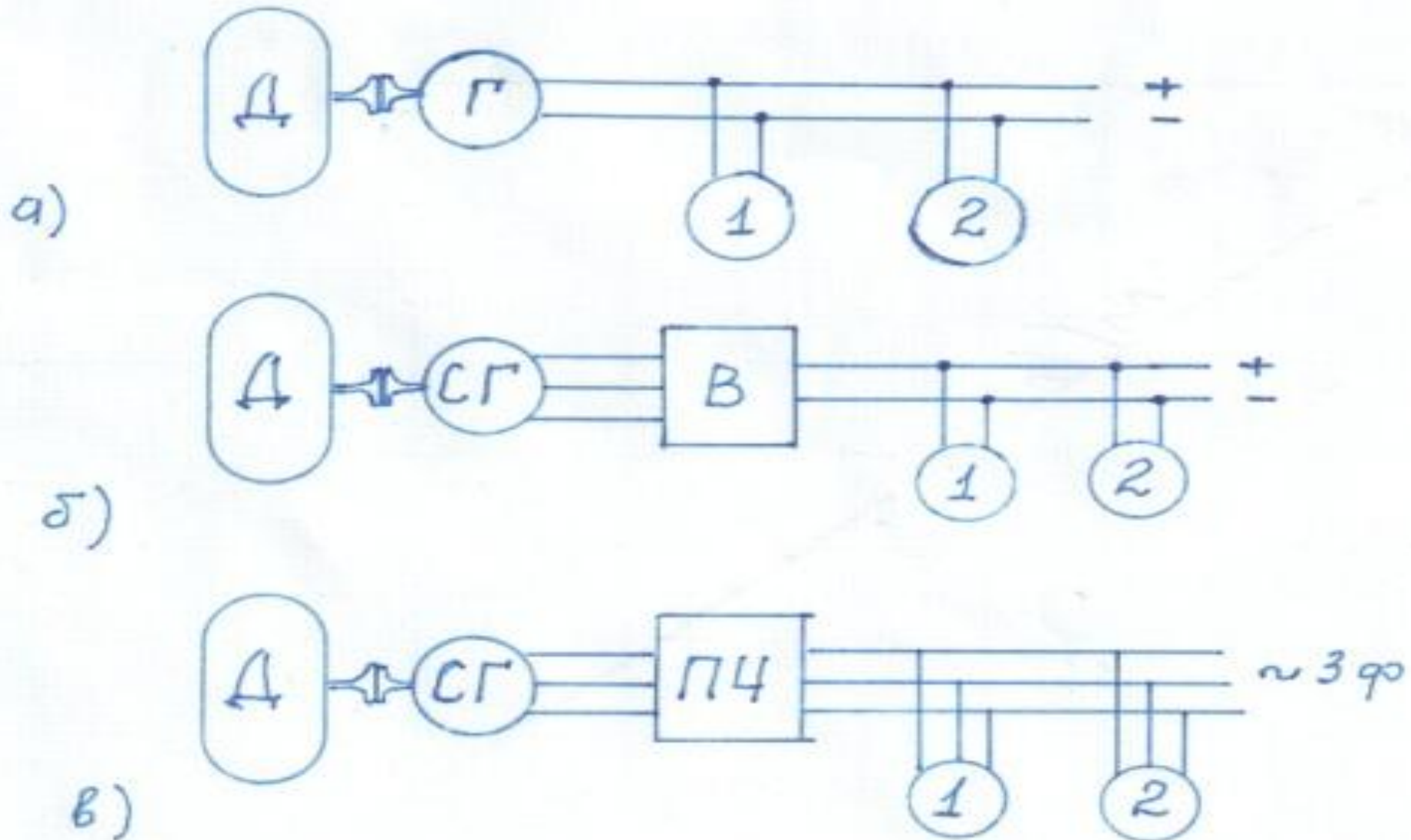


Рис.5.3. Структурные схемы передач постоянного (а), постоянно-переменного (б) и переменного-переменного (в)



На тепловозах большой мощности широко используют передачу постоянно-переменного тока (рис. 5.3, б), в которой в качестве тягового генератора (Г) используется синхронный генератор, а в качестве тяговых двигателей (1, 2, ...) - двигатели постоянного тока. Генератор питает двигатели через выпрямительную установку В. Конструктивная схема тягового электродвигателя постоянного тока приведена на рис.5.4.

На неподвижной части двигателя - статоре - расположен магнитопровод 1, представляющий собой главные полюса, на которых расположена обмотка возбуждения 2. Корпус двигателя выполнен из стали и служит для проведения магнитного поля

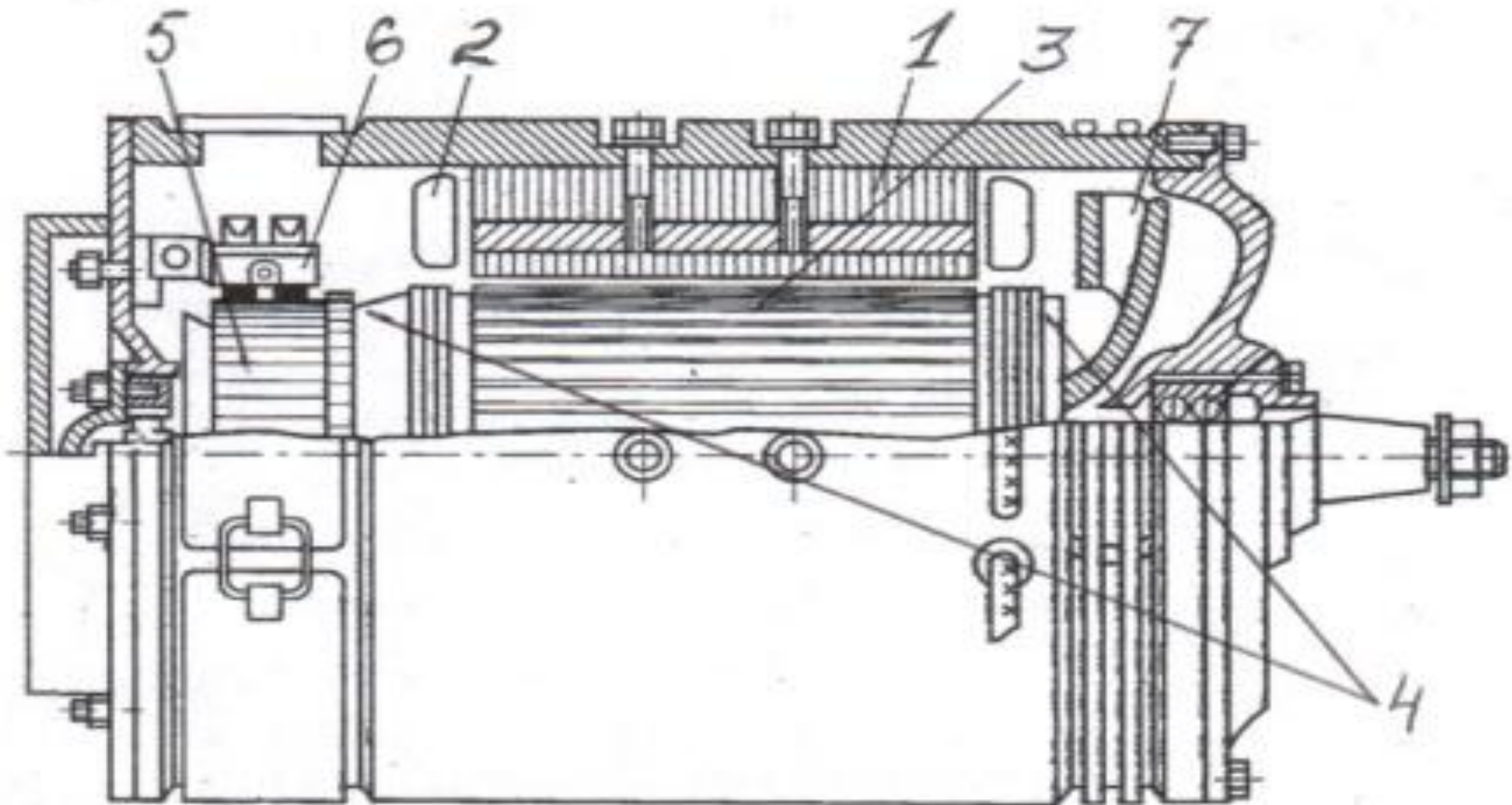


Рис. 5.4. Конструкция тягового электродвигателя постоянного тока.

1 - магнитопровод статора; 2 - обмотка возбуждения; 3 - ротор; 4 - обмотка якоря; 5 - коллектор; 6 - щеткодержатель со щетками; 7 - вентилятор



В пазах ротора 3, выполненного также из электротехнической стали, расположена обмотка якоря, выводы которой соединены с пластинами коллектора 5. Посредством графитовых щеток, установленных в щеткодержателе 6, к обмотке якоря подводится напряжение питания. Вентилятор 7, расположенный на валу двигателя, служит для охлаждения активных частей двигателя (в некоторых конструкциях тяговых двигателей может отсутствовать).

Обмотка возбуждения создает постоянное магнитное поле. При протекании по обмотке якоря электрического тока в результате взаимодействия его с магнитным полем возникает сила, действующая по касательной к окружности ротора. (Направление силы можно определить по правилу левой руки). При совместном действии сил, действующих на все проводники якорной обмотки, создается вращающий момент на валу, в результате чего машина может работать в режиме двигателя.



В зависимости от способа включения обмотки возбуждения двигатели постоянного тока делятся на:

- двигатели независимого возбуждения (обмотка возбуждения питается от отдельного источника);
- двигатели параллельного возбуждения (обмотка возбуждения подключается параллельно обмотке якоря)
- двигатели последовательного возбуждения (обмотка возбуждения подключается последовательно с обмоткой якоря);
- двигатели смешанного возбуждения (обмотка возбуждения состоит из двух частей: одна часть подключена параллельно цепи якоря, другая - последовательно).

В качестве тяговых двигателей на железнодорожном транспорте применяют преимущественно двигатели постоянного тока последовательного возбуждения.

При вращении ротора в магнитном поле главных полюсов в проводниках обмотки якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции возникает электродвижущая сила (ЭДС), направленная навстречу току якоря. Напряжение  $U_{\text{д}}$ , подведенное к двигателю, уравновешивается ЭДС  $E_{\text{д}}$  и падением напряжения в обмотках:

$$U_{\text{д}} = E_{\text{д}} + I r_{\text{д}},$$

где  $I$  - ток электродвигателя,  $r_{\text{д}}$  - сопротивление последовательно включенных якорной обмотки и обмотки возбуждения.

С учетом соотношения  $E = c_e n \Phi$ , где  $n$  - скорость вращения ротора;  $\Phi$  - магнитный поток,  $c_e$  - коэффициент, найдем:

$$n = \frac{U_{\text{д}} - I r_{\text{д}}}{c_e \Phi}.$$



Поскольку сопротивление  $r_D$  невелико (составляет менее 0,1 Ом), то с достаточной степенью точности можно сказать, что скорость вращения ротора обратно пропорциональна величине магнитного потока. А поскольку магнитный поток в двигателе последовательного возбуждения создается током якоря, то, если не учитывать насыщение магнитной цепи, можно считать, что скорость вращения ротора обратно пропорциональна току якоря.

Вращающий момент двигателя пропорционален току якоря и величине магнитного потока:

$$M = c_M I \Phi,$$

где  $c_M$  - коэффициент.

Зависимости скорости вращения и момента двигателя от потребляемого тока носят название электромеханических характеристик тягового двигателя (рис.5.5) при неизменном напряжении  $U_D$ , по которым можно построить тяговую характеристику локомотива. Для этого возьмем ряд значений тока и определим по электромеханическим характеристикам соответствующие им скорость вращения  $n$  и вращающий момент  $M$ . Зная передаточное число  $i$  редуктора между двигателем и ведущими колесами и диаметр  $D$  круга катания колесной пары, находим скорость движения локомотива:

$$v=0,188Dn/i.$$

Коэффициент **0,188** является согласующим размерности величин скорости, поскольку в теории тяги скорость вращения вала двигателя  $n$  измеряется в об/мин, а скорость поезда  $v$  - в км/час



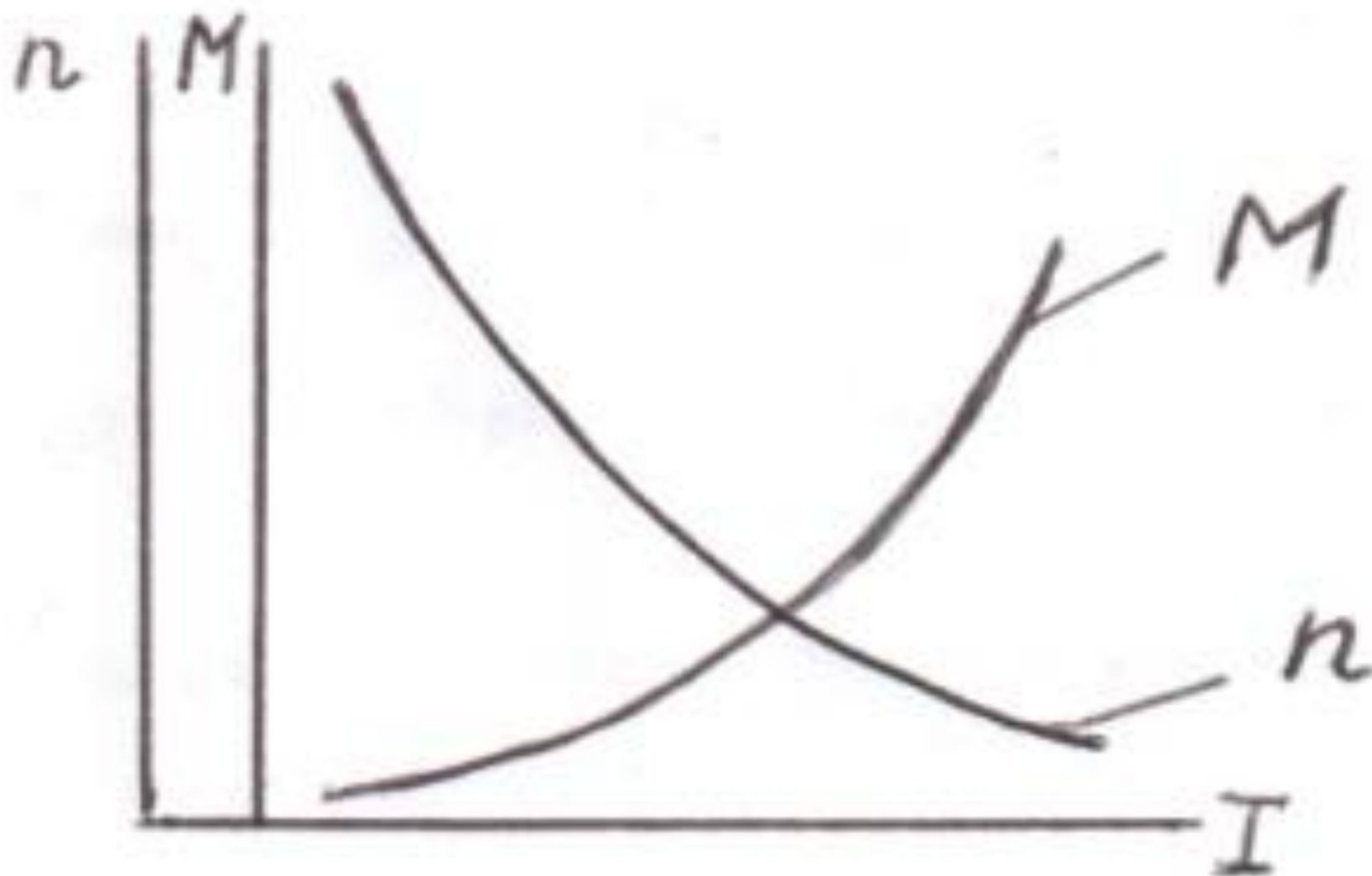


Рис.5.5. Электромеханические характеристики двигателя с последовательным возбуждением

Силу тяги, развиваемую колесной парой, найдем из соотношения:

$$F_{к1} = \frac{2}{D} M i \eta_p,$$

где  $\eta_p$  - КПД редуктора.

Зная количество тяговых двигателей или колесных пар  $n_{кп}$ , находим силу тяги локомотива

$$F_k = n_{кп} F_{к1}.$$

По полученным данным строят тяговую характеристику (рис.5.1).



Двигатели постоянного тока - коллекторные электрические машины. Наличие коллектора снижает надежность и срок службы привода, поэтому перспективным представляется переход на систему переменного-переменного тока (рис.5.3,в), где в качестве тяговых двигателей (1,2, ...) используются асинхронные двигатели, получающие питание от преобразователя частоты (ПЧ). Для эффективного регулирования скорости вращения двигателей необходимо менять частоту питающего напряжения, что и осуществляет преобразователь частоты.

По конструкции асинхронный электродвигатель подобен синхронной машине с той только разницей, что на роторе вместо обмотки возбуждения расположена короткозамкнутая обмотка типа "беличьей клетки". Переменный ток, протекающий в трехфазной обмотке статора двигателя, создает вращающееся электромагнитное поле, которое наводит в проводниках обмотки ротора ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции. Поскольку обмотка ротора короткозамкнутая, наведенная ЭДС вызывает в ней ток.



В результате взаимодействия тока с вращающимся полем возникает электромагнитный момент, благодаря которому ротор двигателя начинает вращаться. Если к валу двигателя приложен момент нагрузки, то скорость вращения ротора растет до тех пор, пока не наступит равновесие моментов. Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет вид как на рис. 5.6.

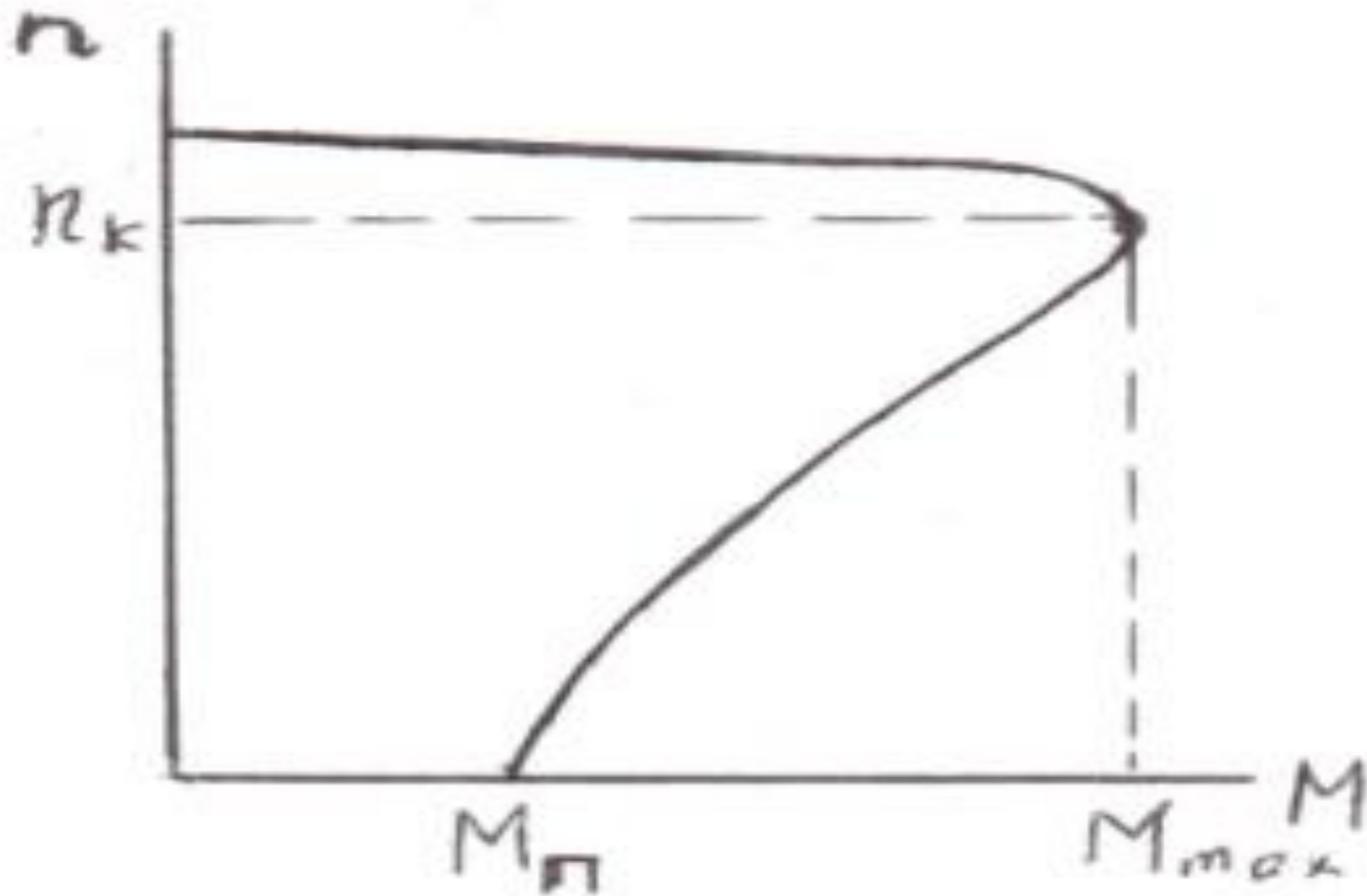


Рис.5.6. Механическая характеристика асинхронного двигателя



Скорость вращения ротора асинхронного двигателя всегда меньше скорости вращения электромагнитного поля. Максимальной скорости вращения, равной скорости вращения поля (на механической характеристике при  $M=0$ ), ротор двигателя никогда не достигает, поскольку в этом случае ЭДС в обмотке ротора перестала бы наводиться, а ток и соответственно момент стали бы равны нулю. А так как существует момент трения в подшипниках и другие потери, в двигателе обязательно должен создаваться момент, преодолевающий все моменты сопротивления.

Разницу в скорости вращения ротора  $n_p$  и поля  $n_1$  оценивают величиной скольжения  $s$ :

$$s = (n_1 - n_p) / n_1.$$

Так как скорость вращения поля связана с частотой  $f$  питающего обмотку статора напряжения формулой  $n_1 = 60f/p$ , где  $p$  - число пар полюсов обмотки статора, то после несложных преобразований получим:

$$n_p = (1-s)60f/p.$$

Коэффициент **60** появляется ввиду того, что размерность скорости ротора  $[n_p] = \text{об/мин}$ .

Как видно из механической характеристики, устойчивая работа двигателя возможна только при скоростях, выше критической  $n_k$ , соответствующей максимальному моменту  $M_{max}$ . Этой точке соответствует критическое скольжение  $s_k$ .



Для асинхронных двигателей средней и большой мощности критическое скольжение  $s_k < 0,1$ . При этом изменение величины питающего напряжения приводит только к изменению величины максимального момента  $M_{max}$ , в то время как критическое скольжение  $s_k$  не меняется. Поэтому для регулирования скорости двигателя в широком диапазоне с целью получения характеристики, подобной тяговой, требуется изменять частоту  $f$  напряжения питания.

Для пояснения принципа регулирования скорости вращения ротора асинхронного двигателя рассмотрим выражение для действующего значения ЭДС вращения, наводимой в его статорной обмотке,

$$E = k\omega f\Phi, \quad (5.1)$$

где  $\Phi$  - магнитный поток в двигателе,  $f$  - частота питающего напряжения,  $\omega$  - число витков фазы обмотки статора,  $k$  - коэффициент.

Если пренебречь относительно небольшим падением напряжения в первичной цепи асинхронного двигателя, то можно записать  $U = E$ , где  $U$  - действующее значение напряжения питания двигателя.



Изменение частоты при неизменной величине напряжения питания приведет к изменению магнитного потока. Существенное увеличение величины магнитного потока  $\Phi$  при регулировании скорости нежелательно, так как его увеличение против номинального вызовет увеличение насыщения магнитной цепи двигателя и значительное увеличение намагничивающего тока, а уменьшение вызовет недоиспользование машины и уменьшение перегрузочной способности.

Поэтому целесообразно при регулировании скорости изменением частоты питающего напряжения поддерживать  $\Phi = const$ . Из соотношения (5.1) следует, что одновременно с регулированием частоты  $f$  пропорционально ей необходимо изменять и напряжение  $U$ , т.е. поддерживать  $U/f = const$ .

Данное соотношение и поддерживает преобразователь частоты в процессе регулирования скорости вращения асинхронного двигателя.



Асинхронные двигатели дешевле электродвигателей постоянного тока той же мощности, проще по конструкции и не содержат щеточно-коллекторного аппарата. С появлением мощных полупроводниковых элементов появляется возможность создания экономичных преобразователей частоты, что будет способствовать увеличению доли тепловозов с передачей на переменном токе.

Электрическими передачами постоянного тока оборудованы маневровые тепловозы ТЭ1, ТЭМ1, ТЭМ2, магистральные грузовые тепловозы ТЭЗ, М62, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В и пассажирские тепловозы ТЭШО, ТЭП60. На каждой секции тепловоза установлено по одному тяговому генератору постоянного тока, приводимому в действие дизелем, и по шесть тяговых двигателей (по одному на колесную пару локомотива).

Электрическая передача переменного-постоянного тока получила применение на грузовых тепловозах 2ТЭ116, 2ТЭ121, пассажирских тепловозах ТЭП70 и ТЭП75. Каждая секция тепловоза оборудована одним синхронным генератором и шестью тяговыми двигателями постоянного тока.



Генераторы переменного тока составляют конкуренцию генераторам постоянного тока при секционной мощности тепловоза выше 3000 л.с. На тепловозах мощностью менее 2000 л.с. генераторы постоянного тока находят по-прежнему преимущественное применение.

Для пуска дизеля на тепловозах используют энергию аккумуляторных батарей. На тепловозах с передачей постоянного тока в качестве пускового двигателя используют тяговый генератор в режиме двигателя. На тепловозах с передачей переменного постоянного тока для пуска дизеля используют специальный стартерный электродвигатель.

Несомненным преимуществом электрической передачи является возможность использования свойства обратимости электрических машин для реализации так называемого **электродинамического торможения**. При таком торможении якорные цепи тяговых двигателей отключаются от генератора и замыкаются на тормозные реостаты. Обмотки возбуждения при этом подключаются к источнику регулируемого напряжения. Двигатели переходят в генераторный режим, и на колесных парах возникают тормозные усилия. Вырабатываемая электрическая энергия рассеивается в виде тепла в реостатах. Изменение тормозного усилия регулируется током возбуждения двигателей с помощью контроллера из кабины машиниста. Поскольку в реостатах выделяется значительная энергия, используется их интенсивное принудительное

Применение электродинамического торможения обеспечивает высокие тормозные усилия и позволяет значительно реже пользоваться пневматическими тормозами, что снижает износ тормозных колодок. Также появляется возможность допустить более высокие скорости составов при движении на уклонах. В результате увеличивается средняя скорость движения поездов и достигается определенная экономия дизельного топлива.



Учебный вопрос № 5.2.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ  
УСТАНОВКИ  
ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

Электровоз - это локомотив, приводимый в движение электрическими двигателями которые получают электрическую энергию от контактной сети. В зависимости от рода тока различают электровозы **постоянного** и **переменного** тока. Существуют также электровозы **двойного питания** (постоянным и переменным током).

Размещение основных элементов силового оборудования электровоза показано на рис. 5.7, где обозначено: 1 - токоприемник; 2 - электрические аппараты; 3 - вспомогательное оборудование; 4 - тяговый двигатель; 5 - колесная пара.

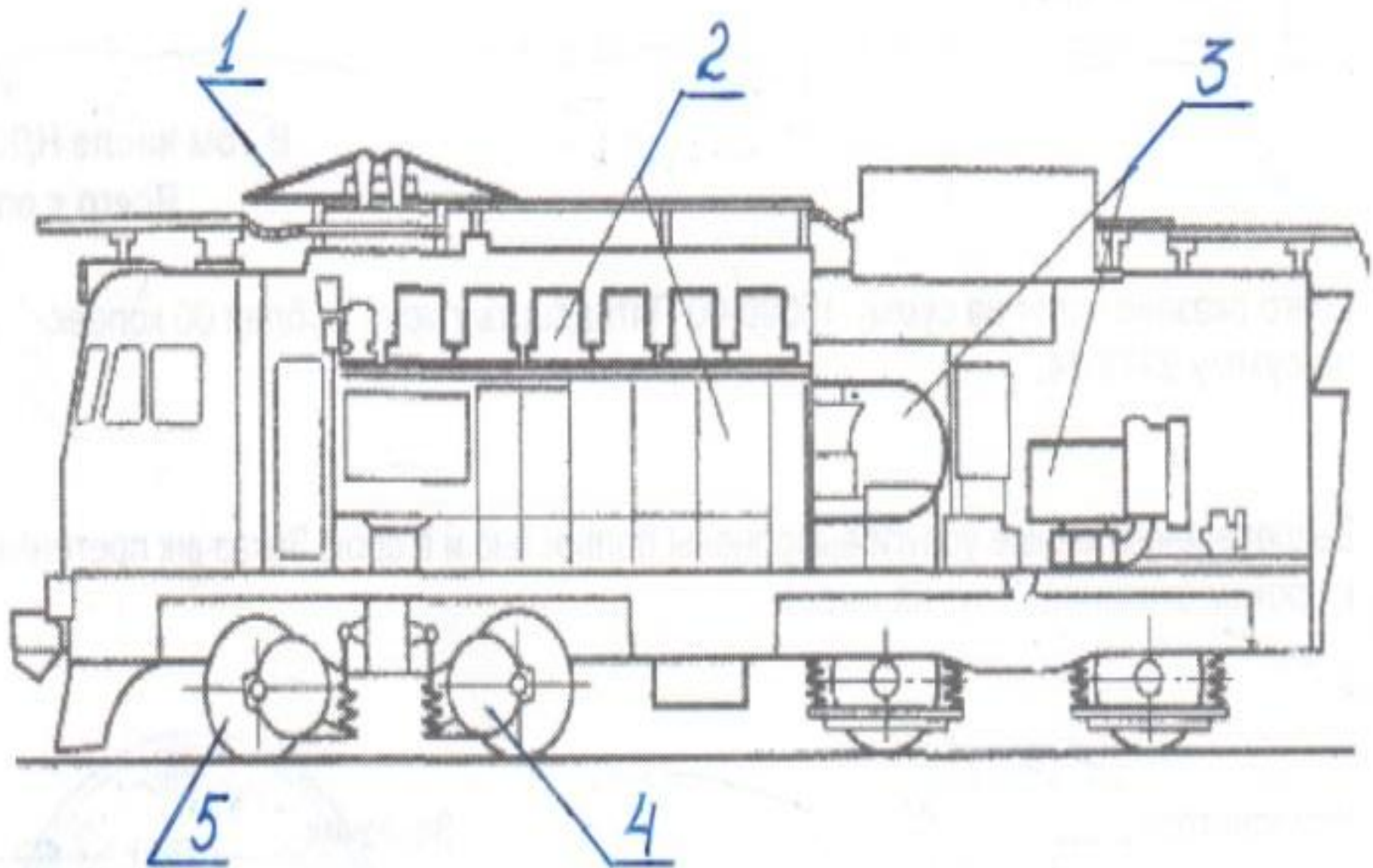


Рис.5.7. Схема размещения силового оборудования электровоза



Электрическая энергия поступает на оборудование электровоза через токоприемник (1). Колесные пары (5) электровозов приводятся во вращение тяговыми двигателями (4) через зубчатые передачи - редукторы. В качестве тяговых используются в основном двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. Электрические аппараты (2) предназначены для пуска тяговых двигателей, изменения скорости и направления движения локомотива, электродинамического торможения, защиты оборудования от перегрузок и токов короткого замыкания.

Вспомогательное оборудование (3) обеспечивает системы охлаждения электрических машин и аппаратов, выделяющих при работе большое количество тепла. На электровозах переменного тока мощные трансформаторы охлаждаются маслом, циркуляция которого осуществляется центробежными насосами. К вспомогательным машинам относятся также генераторы управления - источники тока низкого напряжения. От них получают энергию приборы освещения и заряжается аккумуляторная батарея.

Высоковольтное электрооборудование электровозов объединено в две электрические цепи - силовую, включающую в себя тяговые двигатели и пуско-регулирующую аппаратуру, и цепь вспомогательных машин. Низковольтные электрические аппараты, с помощью которых управляют аппаратами силовой и вспомогательных цепей, объединены в цепь управления. Основным аппаратом цепи управления является контроллер машиниста, расположенный в кабине.

*Поскольку работа электротранспорта связана с передачей электрической энергии на расстояние от электростанций и тяговых подстанций через контактную сеть непосредственно к электровозу, представляет интерес рассмотреть вопрос о преимуществах той или иной системы электроснабжения.*



**Учебный вопрос № 5.2.1**

**СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

На железных дорогах России получили распространение две системы электроснабжения: на **постоянном** токе и **однофазном переменном** токе. Тяга на трехфазном переменном токе широкого распространения не получила, поскольку технически сложно изолировать близко расположенные провода двух фаз контактной сети при напряжении между ними более 20 кВ. (В качестве третьего провода трехфазной сети используются рельсы). Трехфазная система была применена на некоторых дорогах в Италии, но широкого распространения так и не получила.

Железные дороги, электрифицированные по системе постоянного тока, составляют более 50% всех электрифицированных дорог на земном шаре. Рост объемов перевозок связан с совершенствованием и техническим перевооружением железнодорожного транспорта. Одним из путей освоения быстро растущего объема перевозок, является увеличение массы поездов. Это, в свою очередь, связано с повышением мощности локомотивов, а для электровозов это означает увеличение потребляемого тока при том же напряжении контактной сети.

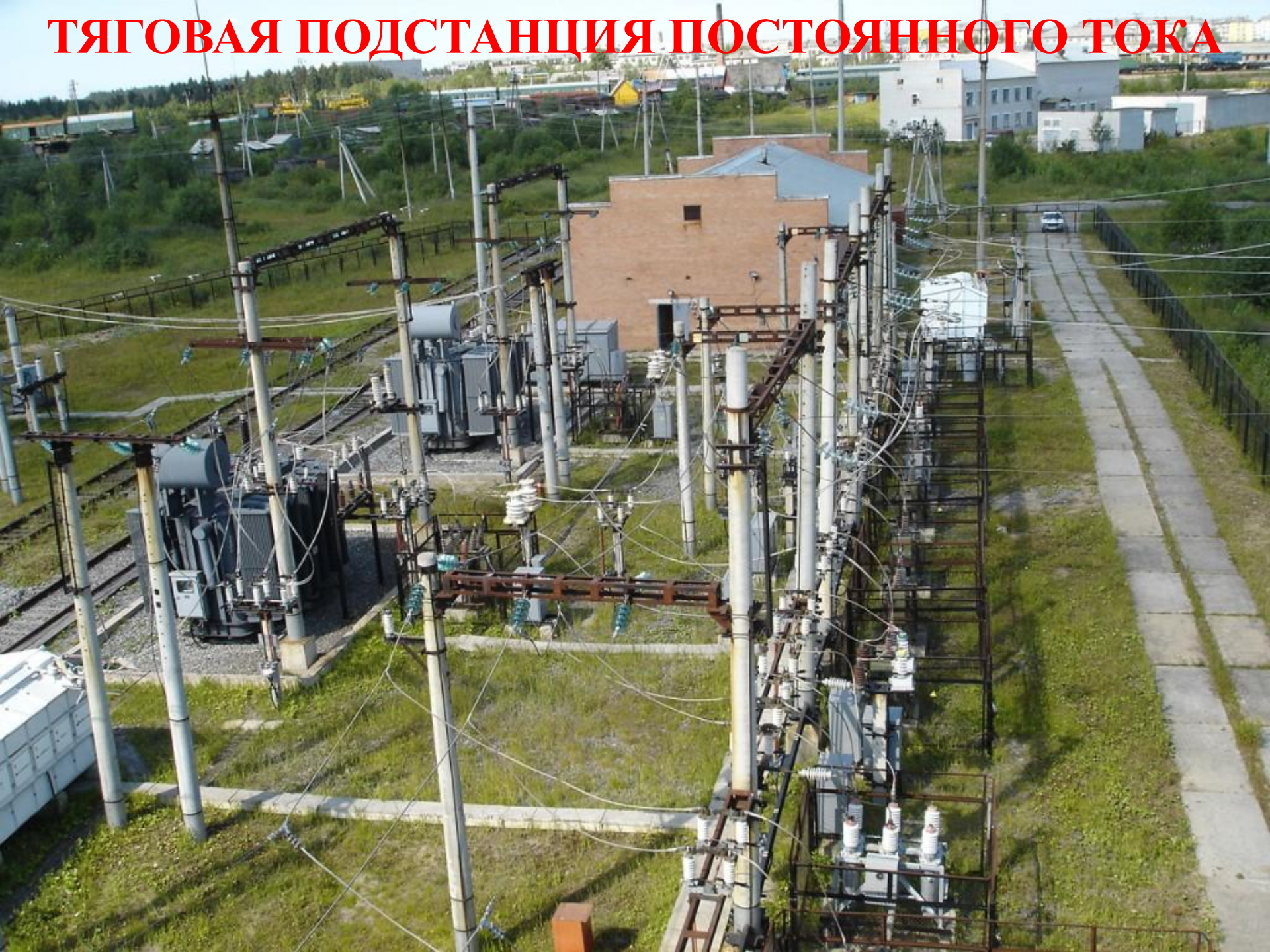


В контактной сети электрифицированных ж. д. в России используется **постоянный** электрический ток напряжением **3 кВ (825В в Метро)** или **переменный** однофазный ток промышленной частоты напряжением **25 кВ**.

При питании **переменным** током усложняется конструкция подвижного состава, но значительно **упрощаются** устройства энергоснабжения электрических железных дорог, увеличивается расстояние между тяговыми подстанциями при тех же потерях до 50 км (20—25 км при постоянном токе), снижается стоимость строительства контактной сети до 10%, в 2,5 раза меньше расход меди (за счет меньшей площади сечения фидеров).



# ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА





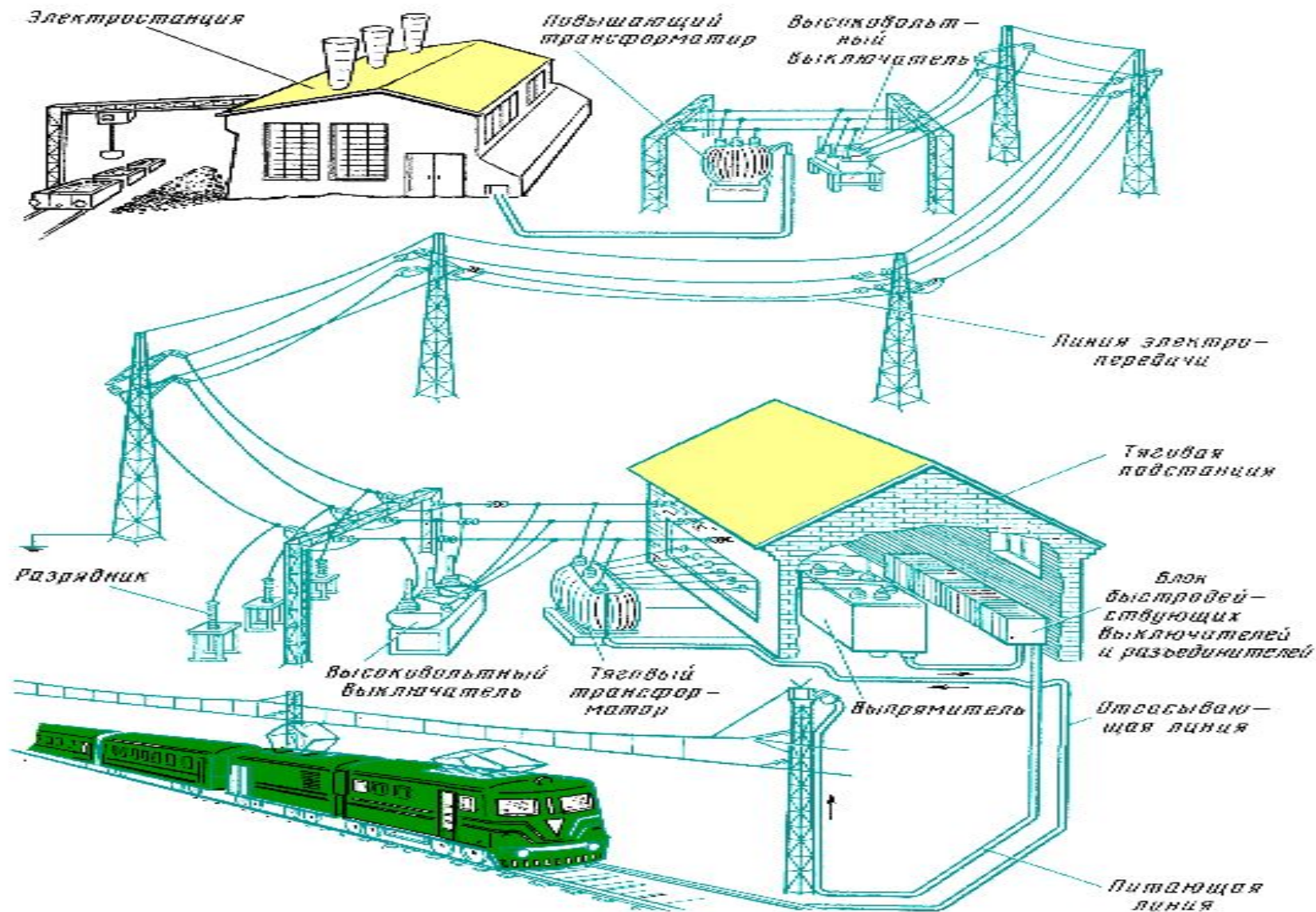


Рис. 2. Общий вид участка электрифицированной железной дороги постоянного тока и питающих ее устройств.

Рис. Общий вид электрифицированной железной дороги постоянного тока и питающих её устройств



# ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ





# ПОНИЗИТЕЛЬНАЯ ПОДСТАНЦИЯ МЕТРО



Центральный вход



Релейный зал



Аккумуляторная



Диспетчерская



# ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ





Рост тока приводит к увеличению падения напряжения в контактной сети (при неизменности площади сечения контактного провода). Поэтому для снижения потерь следует либо увеличивать сечение контактного провода, что нецелесообразно из-за увеличения расхода цветного металла, либо повышать напряжение контактного провода. Для систем постоянного тока увеличение напряжения приводит к существенному усложнению тяговой аппаратуры и тяговых двигателей при той же мощности и снижению надежности их работы. Поэтому с увеличением мощности локомотивов становится целесообразным переход на системы электроснабжения переменного тока. Это связано, в первую очередь, с замечательным свойством переменного тока - возможностью изменения (трансформации) напряжения в широких пределах с помощью трансформаторов.

Если на самом электровозе осуществлять понижение напряжения с помощью силовых трансформаторов с последующим его выпрямлением полупроводниковыми преобразователями, то появляется возможность использования тяговых электродвигателей постоянного тока. Именно по такой схеме устроены современные электровозы. Для питания электровозов переменного тока применяют однофазный ток промышленной частоты (50 Гц) при напряжении в контактном проводе 25 кВ. Железные дороги, где эксплуатируются такие электровозы, называют железными дорогами, электрифицированными по системе переменного тока.

Для ознакомления со структурой систем электроснабжения железных дорог рассмотрим упрощенную схему (рис.5.8) общего вида участка электрифицированной железной дороги.

Вырабатываемый синхронными генераторами электростанции (1) трехфазный переменный ток напряжением 6-10 кВ подходит к повышающему трансформатору (2), который повышает напряжение до 20 - 750 кВ в зависимости от конкретных условий линии передачи. Значения напряжений линии электропередачи определены действующими стандартами.



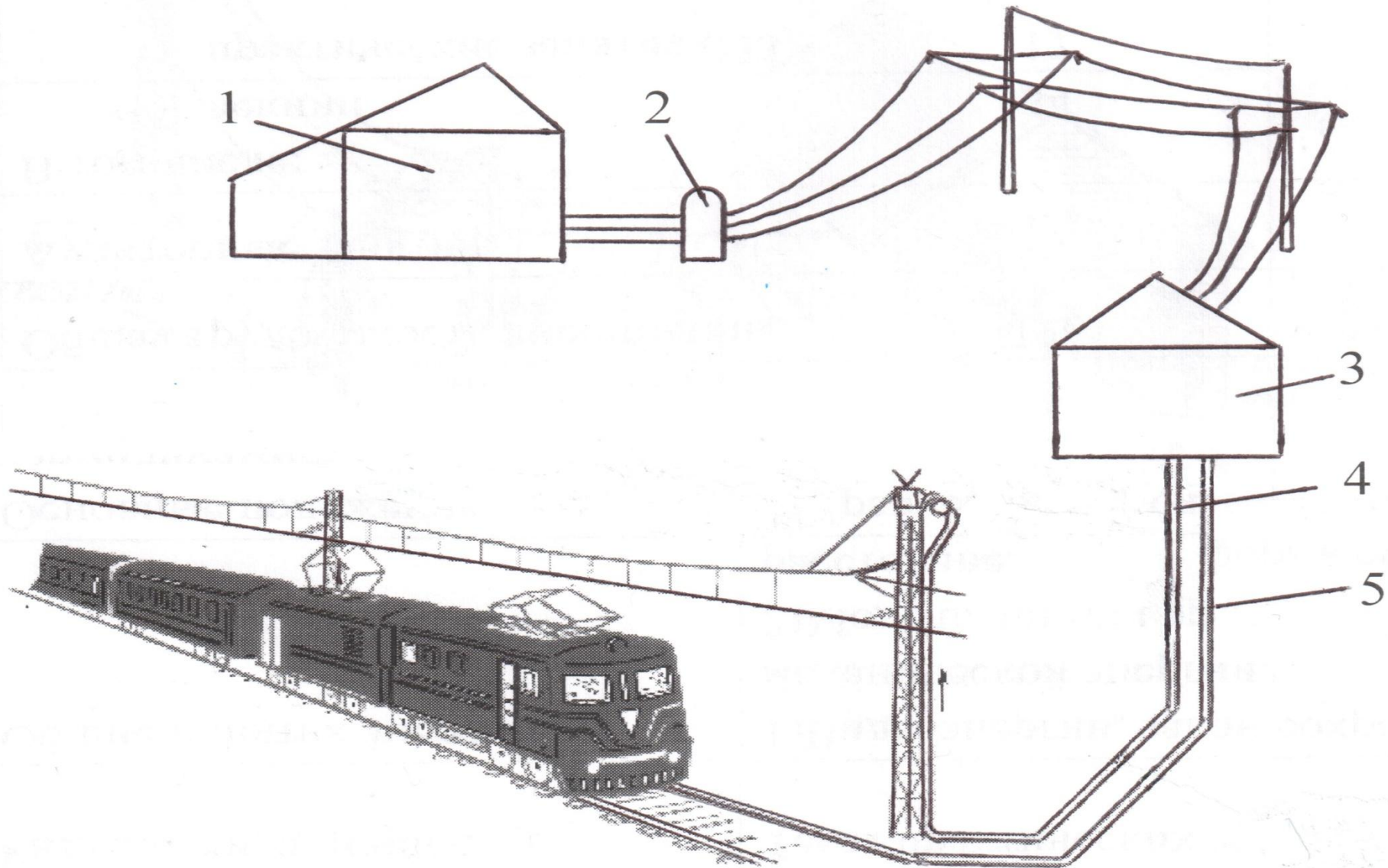


Рис.5.8. Схема участка электрифицированной железной дороги.  
 1 - электростанция; 2 - повышающий трансформатор; 3 - тяговая подстанция; 4 - питающая линия; 5 - обратная линия

*Устройство и работа тяговых подстанций дорог, электрифицированных на постоянном и переменном токе, существенно отличаются между собой.*

На тяговой подстанции (3) постоянного тока напряжение понижается до значения, необходимого для нормальной работы подвижного состава, переменный ток с помощью полупроводниковых выпрямителей преобразуется в постоянный и через питающую линию (4) - фидер подводится к контактной сети. Для замыкания электрической цепи рельсы соединяют через обратную линию (5) с нулевой точкой вторичной обмотки понижающего трансформатора тяговой подстанции (3).

Правилами технической эксплуатации регламентирован уровень постоянного напряжения на токоприемнике подвижного состава в 3 кВ. Тяговые подстанции переменного тока предназначены лишь для понижения напряжения и распределения электрической энергии по участкам контактной сети. Выпрямление напряжения осуществляется на самом подвижном составе.



При переменном токе повышается эффективность использования электрической тяги, так как по контактной сети передается требуемая мощность при меньшем токе, чем в системе постоянного тока. В связи с этим тяговые подстанции переменного тока располагаются на значительно большем расстоянии друг от друга (40-60 км), нежели тяговые подстанции постоянного тока (10-20 км). Однако, конструкция локомотивов и электропоездов на переменном токе сложнее и стоимость их выше.

Электрифицированные железные дороги в нашей стране получают электроэнергию от энергосистем, представляющих собой совокупность крупных электрических станций, объединенных линиями электропередачи и совместно питающих потребителей электрической и тепловой энергией. Электрические магистрали европейской части страны, Урала и Сибири питаются от Единой энергетической системы. Эффективность использования энергоносителя для получения полезной работы тем выше, чем совершеннее первичная энергетическая установка (электростанция).

Коэффициент полезного действия электрической тяги  $\eta_{\text{эт}}$  зависит от КПД отдельных звеньев системы электроснабжения электрифицированной железной дороги:

$$\eta_{\text{эт}} = \eta_{\text{э}} \eta_{\text{лэп}} \eta_{\text{тп}} \eta_{\text{кс}} \eta_{\text{эв}},$$

где  $\eta_{\text{э}}$  - КПД электростанции,  $\eta_{\text{лэп}}$  - КПД линии электропередачи;  $\eta_{\text{тп}}$  - КПД тяговой подстанции;  $\eta_{\text{кс}}$  - КПД контактной сети;  $\eta_{\text{эв}}$  - КПД электровоза.

Если энергия поступает от тепловой электростанции, КПД которой около 35%, то полный КПД электрической тяги составляет 28%. Если же источник энергии - гидроэлектростанции, КПД которых достигает 85%, КПД электротяги составляет 60-62%.



**Учебный вопрос № 5.2.2**

**ТЯГОВЫЕ  
ТРАНСФОРМАТОРЫ**

Основной задачей тяговых трансформаторов, одного из основных элементов силового оборудования электровоза, является понижение подводимого от контактной сети напряжения до величины номинального напряжения тяговых электродвигателей. Так, на дорогах, электрифицированных по системе переменного тока, напряжение контактного провода равно 25 кВ, а номинальное напряжение тяговых двигателей составляет 900-1600 В. Кроме того, гораздо более простым и экономичным является регулирование частоты вращения тяговых электродвигателей изменением питающего напряжения по сравнению с использованием пусковых резисторов и применением перегруппировки двигателей.

*Регулирование вторичного напряжения трансформаторов может быть осуществлено изменением числа витков первичной (со стороны высокого напряжения) или вторичной (со стороны низкого напряжения) обмоток .*

*На первый взгляд, регулирование со стороны высшего напряжения осуществить проще, поскольку ток в первичной обмотке меньше. Но регулирование напряжения в широких пределах вызывает проблемы с обеспечением надежной изоляции обмоток. Действительно, если требуется повысить напряжение выходной обмотки, необходимо отключить часть витков первичной обмотки.*



Тогда на один виток будет приходиться большее напряжение. Но магнитный поток в сердечниках трансформатора будет индуцировать ЭДС и в отключенных витках. поэтому по мере уменьшения числа рабочих витков первичной обмотки напряжение между ее началом и концом будет возрастать. Так, если минимально необходимое из соображений регулирования число витков первичной обмотки в четыре раза меньше полного числа витков первичной обмотки, то при напряжении контактной сети 25 кВ напряжение между концом и началом первичной обмотки составит 100 кВ. Именно на такое напряжение и должна быть рассчитана изоляция трансформатора. Поэтому на электровозах, где требуется регулировать напряжение в широких пределах, такой способ не применяют.

На отечественных электровозах переменного тока всех серий используют регулирование напряжения со стороны вторичных обмоток. Но и в этом случае возникают определенные проблемы с аппаратной реализацией данного способа.

Рассмотрим упрощенную схему силового трансформатора, представленную на рис. 5.9,а. Регулирование вторичного напряжения осуществляется поочередным замыканием контактов 1,2,3. Предположим, контакт 1 замкнут. Для уменьшения выходного напряжения следует разомкнуть контакт 1 и замкнуть контакт 2.

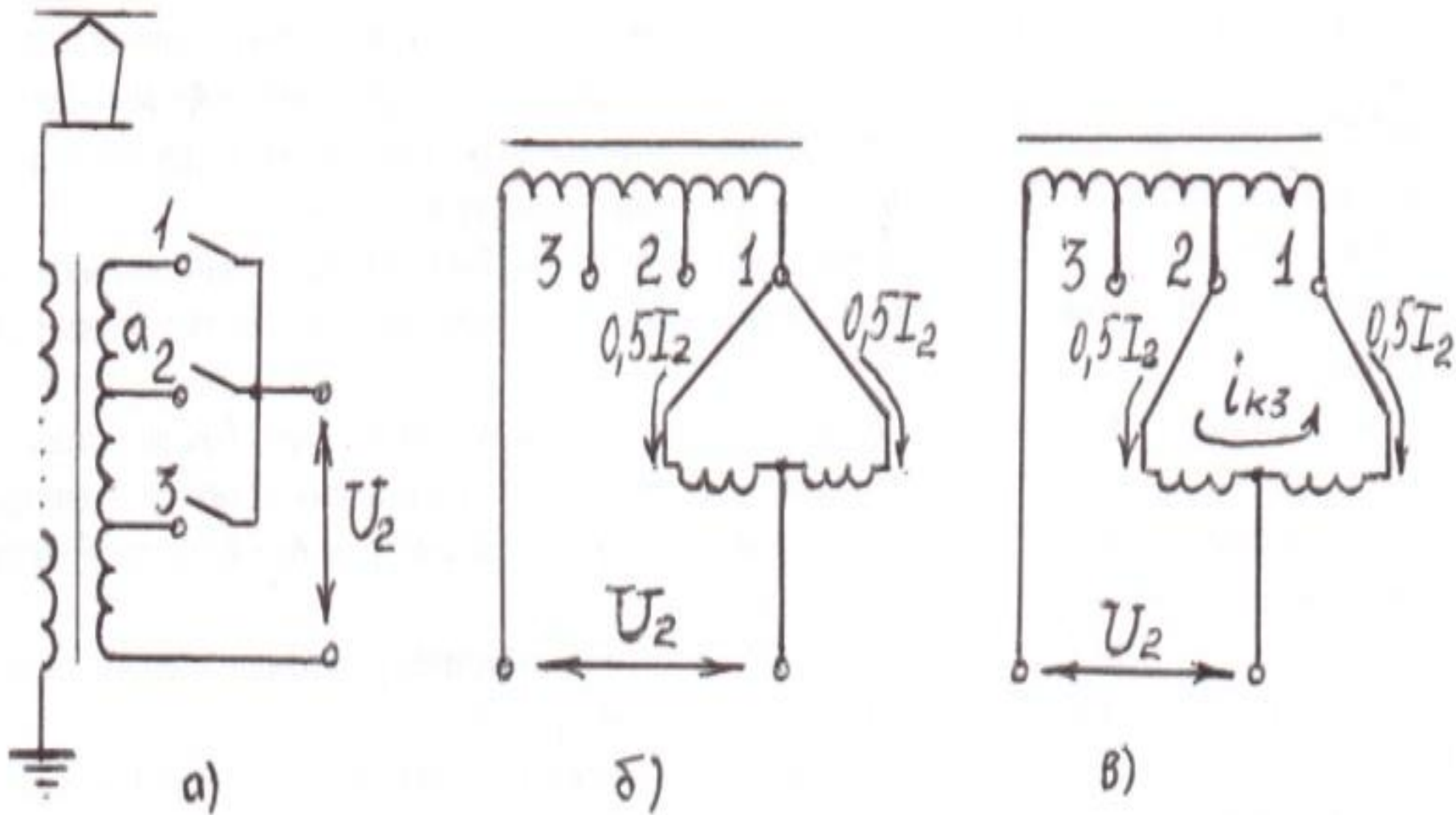


Рис.5.9. Регулирование вторичного напряжения тягового трансформатора  
 а) - схема трансформатора; б), в) - подключение переходного реактора



Но при этом на какое-то время потребители будут отключены от источника питания, что приведет к недопустимому нарушению работы оборудования и движению электровоза рывками. Можно, конечно, перед отключением контакта 1 сначала замкнуть контакт 2, а уже потом отключить первый. Но на какое-то время секция 1-2 выходной обмотки окажется замкнутой накоротко, что является аварийным режимом. Для безаварийного переключения секций трансформатора используют переходные реакторы.

На рис.5.9,б и в показан принцип переключения секций вторичных обмоток силового трансформатора с помощью реактора Р. Реактор Р имеет отвод от средней точки. Особенность параметров реактора такова, что его индуктивное сопротивление зависит от направления тока в полуобмотках. При встречном включении полуобмоток их индуктивное сопротивление невелико, а при согласном, или при прохождении тока только по одной из них, оно значительно больше. В исходном состоянии (рис.5.9,б) по полуобмоткам реактора протекает ток, равный половине вторичного тока трансформатора.

При этом сопротивление полуобмоток реактора мало и не оказывает существенного влияния на работу вторичной цепи. Для изменения вторичного напряжения  $U_2$  один из выводов реактора отсоединяют от вывода 1 и подсоединяют к выводу 2. При этом ток короткого замыкания  $i_{кз}$  не опасен для работы секции, поскольку он ограничен индуктивным сопротивлением реактора. Следом отключают второй вывод реактора от вывода 1 и соединяют его с выводом 2 секции выходной обмотки. В таком же порядке осуществляют переключение и других секций обмотки трансформатора.



Переключение секций вторичной обмотки силового трансформатора осуществляется под током, поэтому на электровозах устанавливают дополнительные контакторы с дугогашением, которые, включаясь и выключаясь в определенной последовательности, обеспечивают переключение остальных контакторов при обесточенной цепи.

В тех случаях, когда количество отводов вторичной обмотки тягового трансформатора невелико, для увеличения числа ступеней регулирования вторичного напряжения выходную обмотку разделяют на две части: несекционированную (нерегулируемую) часть с напряжением  $U_N$  и секционированную (регулируемую) с напряжением каждой из секций  $U_C$ , как на рис.5.10. Минимальное выходное напряжения  $U_2$  соответствует встречному включению обмоток, как на рис.5.10,а.

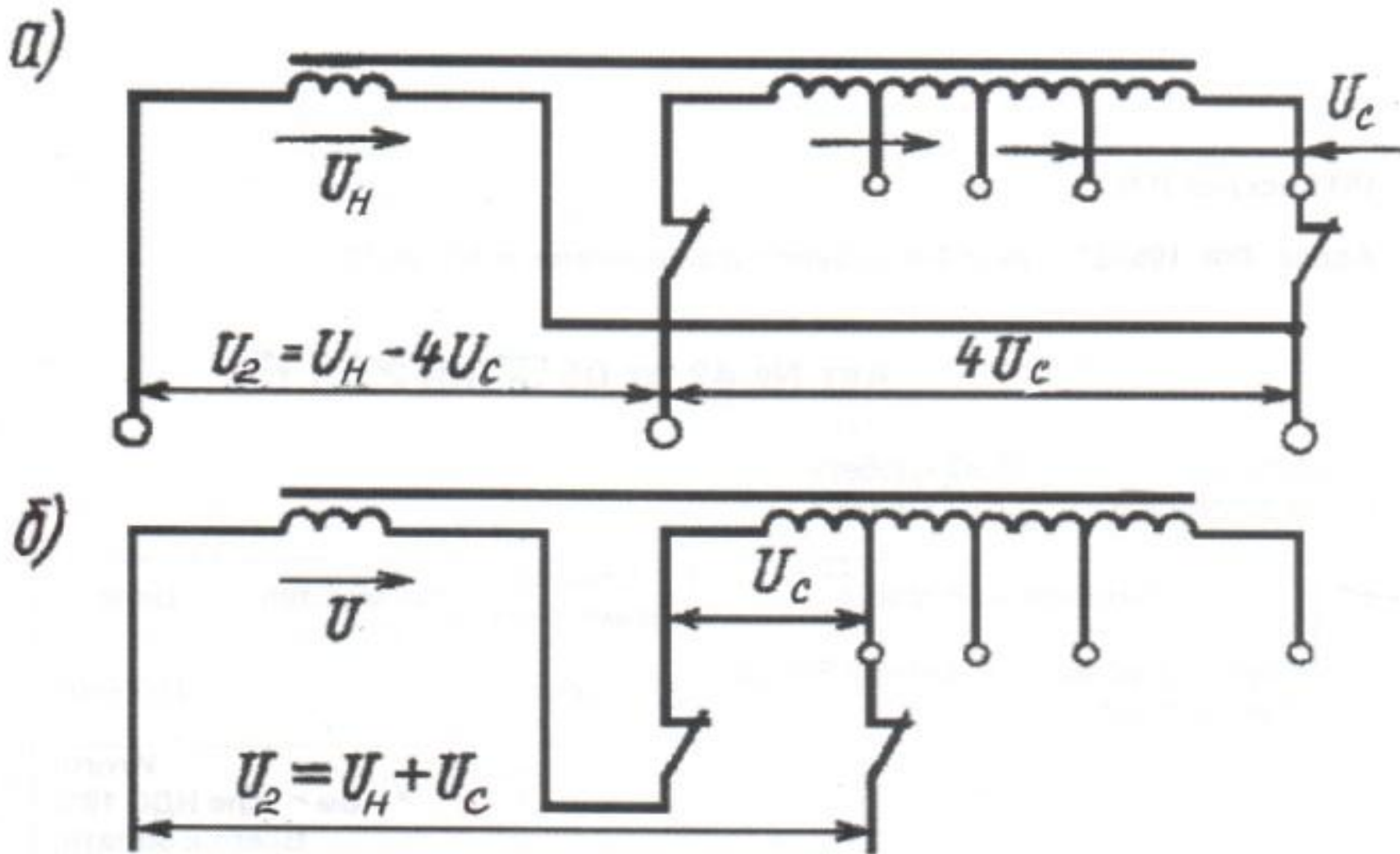


Рис.5.10. Схема включения вторичной обмотки тягового трансформатора с секционированием:  
 а) встречное включение; б) согласное включение



Уменьшая число встречно включенных секций, повышают выходное напряжение, и когда все секции регулируемой части обмотки выключены, напряжение  $U_2 = U_H$ . Дальнейшее повышение напряжения нерегулируемую и регулируемую части включают согласно, последовательно подключая одну за другой секции регулируемой части, как на рис.5.10,б. Диапазон регулирования выходного напряжения при четырех секциях составит:

$$U_2 = (U_H - 4U_C) \dots (U_H + 4U_C).$$

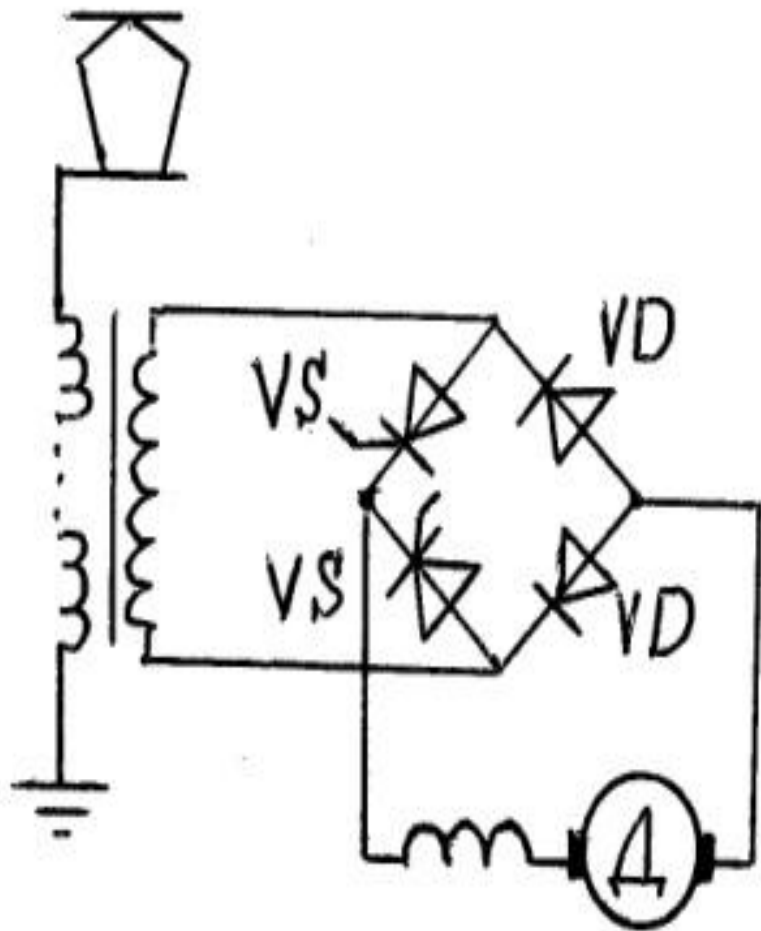
Все переключения секций вторичной обмотки производятся с использованием переходного реактора с помощью контакторов с дугогашением и без него в строго определенной последовательности. Устройство, осуществляющее переключения обмотки, представляет собой групповой аппарат, называемый главным контроллером.

Преобразование переменного напряжения в постоянное для питания тяговых электродвигателей на электровозах реализуют как с помощью неуправляемых выпрямителей, так и управляемых, которые не только преобразуют переменный ток в постоянный, но и осуществляют плавное регулирование напряжения, подводимого к тяговым двигателям.

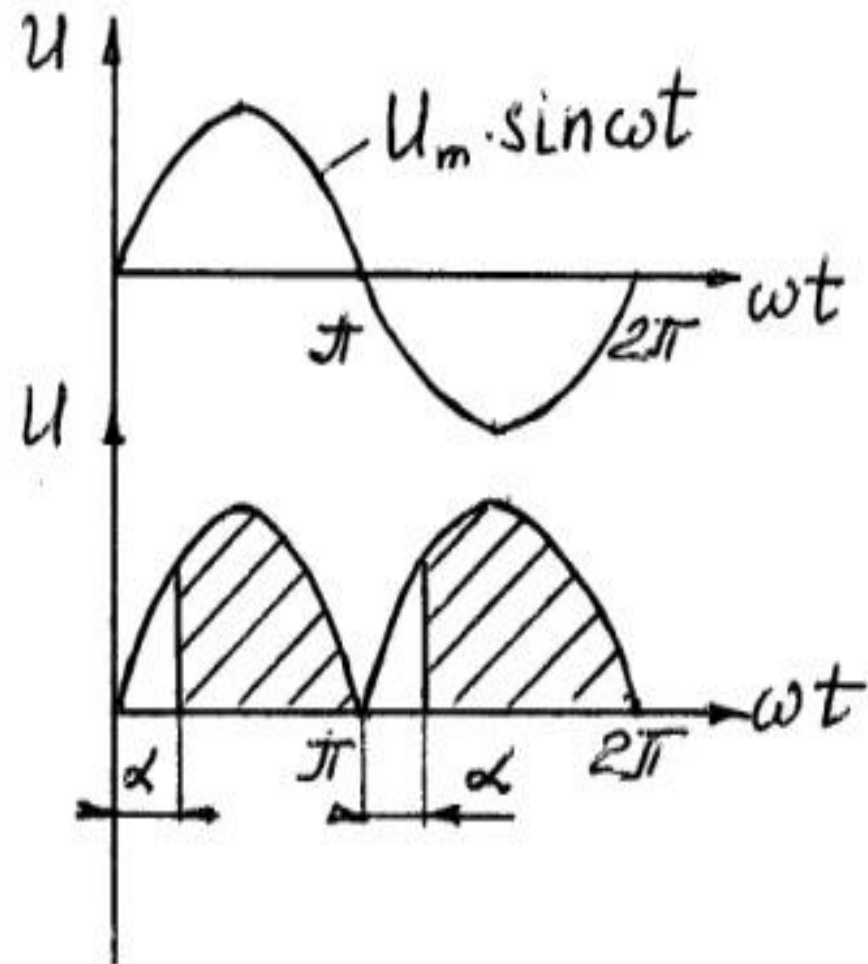
Принцип регулирования напряжения питания тяговых электродвигателей рассмотрим на упрощенной схеме выпрямителя (рис.5.11), собранного по мостовой схеме, позволяющей не только осуществлять выпрямление переменного напряжения, но и регулировать его величину.

Выпрямление осуществляется благодаря односторонней проводимости полупроводниковых приборов, включенных в плечи мостовой схемы. В два из плеч моста включены тиристоры - управляемые полупроводниковые приборы *VS*, которые начинают проводить ток только после того, как на дополнительные выводы подаются управляющие импульсы.





а)



б)

Рис.5.11. Мостовая схема регулирования напряжения двигателя

В том случае, когда управляющие импульсы подаются в момент перехода напряжения питания через ноль, выпрямленное напряжение представляет собой полуволны гармонического напряжения. Если управляющие импульсы подаются с задержкой на какой-то угол  $\alpha$ , то к обмоткам двигателя  $D$  подается напряжение в виде усеченных полуволн синусоидального напряжения (рис.5.11,б). Среднее значение выпрямленного напряжения найдем из соотношения

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{1}{\pi} U_m (1 + \cos \alpha).$$

При изменении угла  $\alpha$  в пределах от нуля до  $\pi$  среднее значение напряжения изменяется от  $\frac{2}{\pi} U_m$  до нуля. При таком глубоком регулировании имеют место большие пульсации тока в цепи якоря тягового двигателя, что усложняет его работу. Для снижения пульсаций применяют секционирование вторичной обмотки тягового трансформатора. Каждая секция через мостовую схему подключена к якорной цепи тягового двигателя. При последовательном соединении секций выходной обмотки трансформатора глубокое регулирование производится только в одной из секций, что существенно снижает пульсации тока в двигателе.



*В реальных схемах каждое плечо выпрямителя состоит из ряда последовательно соединенных полупроводниковых приборов. Так, один выпрямитель электровоза ВЛ80т(с) имеет 192 вентилей и рассчитан на номинальные выпрямленные ток 3200 А и напряжение 1350 В. Он питает два тяговых двигателя, поэтому на восьмиосных электровозах установлено четыре таких выпрямителя. Общее число вентилей равно 708, КПД выпрямителя равен 99%. Сам выпрямитель размещен в двух шкафах, работает только с принудительным охлаждением и снабжен сложной защитой.*

Использование управляемых выпрямителей дает возможность реализовать на электровозах **рекуперативное торможение**, переводя выпрямитель в режим инвертора. При этом тяговые двигатели при торможении поезда переводятся в режим генератора, и осуществляется возврат энергии в сеть.

Следует обратить внимание на то, что перевод электродвигателей с последовательным возбуждением в генераторный режим возможен лишь с отсоединением обмотки возбуждения от цепи якоря и подключением ее к стороннему источнику напряжения. Действительно, при увеличении скорости вращения ротора двигателя ЭДС вращения должна превысить напряжение питания, а ток поменять свое направление. Но в двигателе последовательного возбуждения с изменением направления тока изменится также и направление магнитного потока, а следовательно - и ЭДС. Поэтому необходимо в обмотке возбуждения создать ток того же направления, как и в тяговом режиме. Для этого обмотка возбуждения переключается на отдельный источник.



Управляемые вентили выпрямителя в режиме генераторного торможения (рекуперативного) переводятся в режим инвертора. При этом изменяют полярность обмоток якорей тяговых двигателей так, чтобы направление генерируемого тока соответствовало прямой проводимости тиристоров. Это достигается соответствующей полярностью напряжения, подводимого к обмотке возбуждения.

Таким образом, повышается эффективность силовых энергетических установок электровозов. В качестве примера - несколько данных по выпрямительно-инверторной установке электровоза ВЛ80р. Она работает выпрямителем в тяговом режиме работы электровоза и инвертором в режиме рекуперативного торможения. Установка содержит 154 силовых управляемых вентиля, рассчитана на номинальные выпрямленный ток 1760 А и напряжение 1250 В. Всего на электровозе четыре таких установки с общим числом тиристоров 616. КПД установки 98%.

Эксплуатация электровозов ВЛ80р показала, что среднее количество электрической энергии, возвращаемой в контактную сеть, составляет 10-14% от расходуемой в тяговом режиме на Дальневосточной дороге и 7-10% на других дорогах.



***Лекция окончена***

**Благодарю за внимание**