

1.Список литературы по дисциплине “Электрические железные дороги”

Теория

- 1.Электрические железные дороги. Учебник для вузов. Под редакцией Плакса А.В.1993.**
- 2.Розенфельд В.Е. и др. Теория электрической тяги. Учебники для вузов, 1983, 1995.**
- 3.Осипов С.И. и др. Основы тяги поездов. Учебники для техникумов, 1985, 2000.**
- 4.Осипов С.С. и др.Теория электрической тяги. Учебник для вузов, 2006.**
- 5.Горбань В.Н. Электрические железные дороги. Конспект лекций.2004.**

Практические занятия и курсовая работа

- 1.Колодчевский Е.А Электрические железные дороги. Методическое руководство к практическим занятиям. 2006.**
- 2.Трофимов М.Н. Тяговые расчёты. Методическое руководство к курсовой работе. 2001.**

Дополнительная литература

- 1.Сидоров Н.Н. Как устроен и работает электровоз. 1988.**
- 2.Исаев И.П. Беседы об электрической железной дороге. 1982.**

2.История развития электрических ж.д.

1831 г. – первый электрический двигатель.

США, инж. Давенпорт.

1835 г. – вагон с электрическим двигателем и гальваническим элементом, опытные поездки.

1870-е годы – появление стационарных источников электроэнергии и линий электропередачи; эксперименты и макеты электрических железных дорог, модель фирмы Сименс (Германия) и вагон Пироцкого (Петербург) с передачей тока по рельсам.

1881 г. - первая электрическая трамвайная линия в Берлине (Сименс).

Конец 1880-х – первые электрические трамваи с контактным проводом(Европа, США).

1892 – первый трамвай в России (Киев).

1895 г. – первая электрическая ж.д. с контактным проводом, напряжение 600 В, г.Балтимор, США.

1896 г. – первая подземка (метро) в Будапеште (Сименс).

1898 – 1915 г.г. - первые участки ж.д. на трехфазном, однофазном и постоянном токе, Европа.

Начало XX века – проекты электрификации участков ж.д. в России, открытие в Петербурге кафедры ЭЖД и создание учебников по электрической тяге.

1926 г. – СССР, первый электрифицированный участок Баку – Сабунчи, 19 км, напряжение 1200 В.

1930-е – 1940-е годы, Москва, пригородные участки, напряжение 1500, затем 3000 В; Урал и Кавказ, горные участки, 3000 В.

1954 г. – СССР, начало электрификации на переменном токе, напряжение 25 кВ.

1960-е годы – появление высокоскоростного ж.д. транспорта, до 300 км/час (Япония, Франция, Германия др.), в России – до 200 км/час на участке Москва – Петербург, с 2009 г. – до 250 км/час (Э/п Сапсан, фирма Сименс).

2000-е годы – протяжённость электрифицированных участков в России составляет около 43 тыс. км, примерно поровну на постоянном и переменном токе. Занимая около 50% протяженности сети, они выполняют около 85% всего объёма перевозок.

Лэп 110

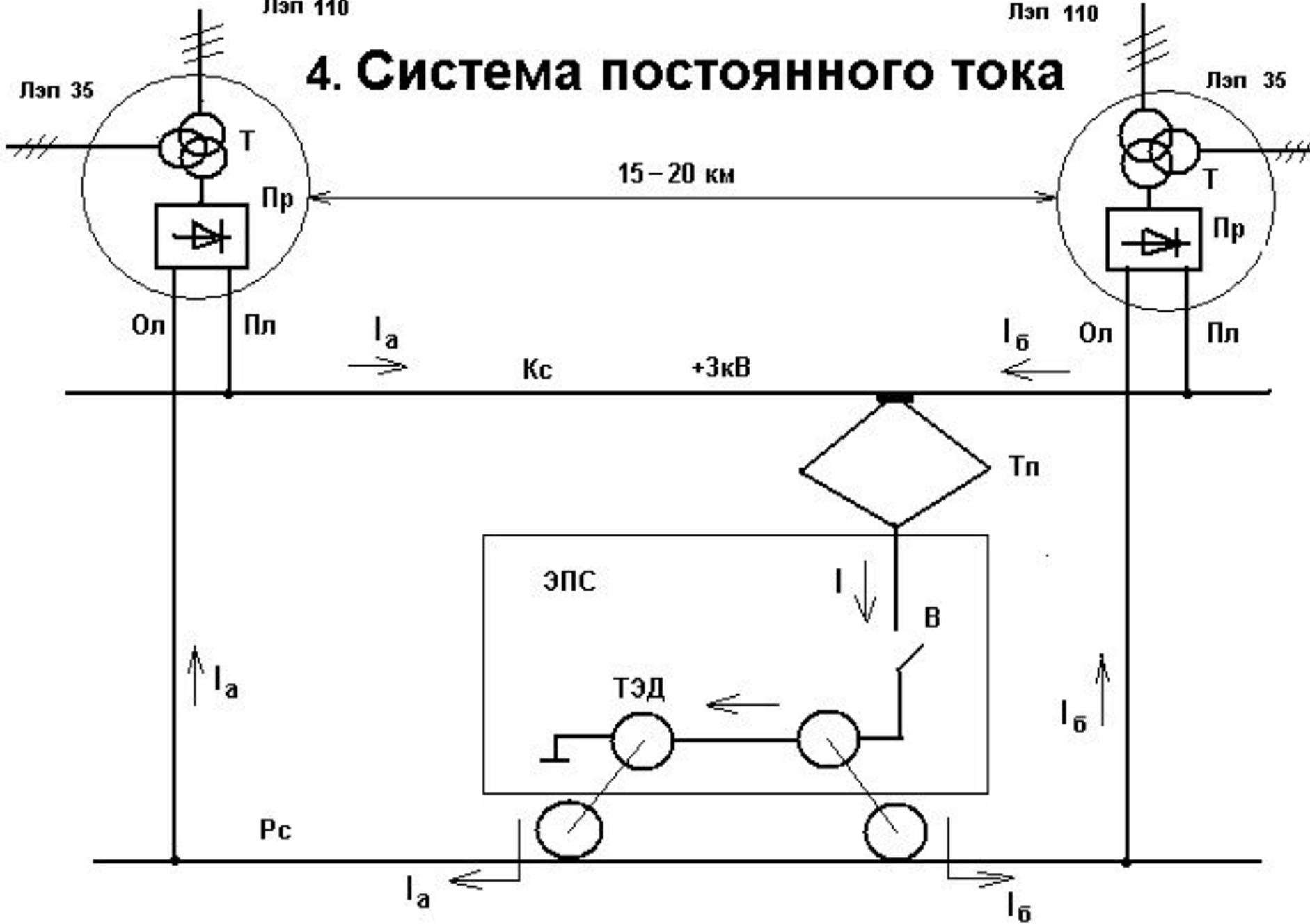
Лэп 110

4. Система постоянного тока

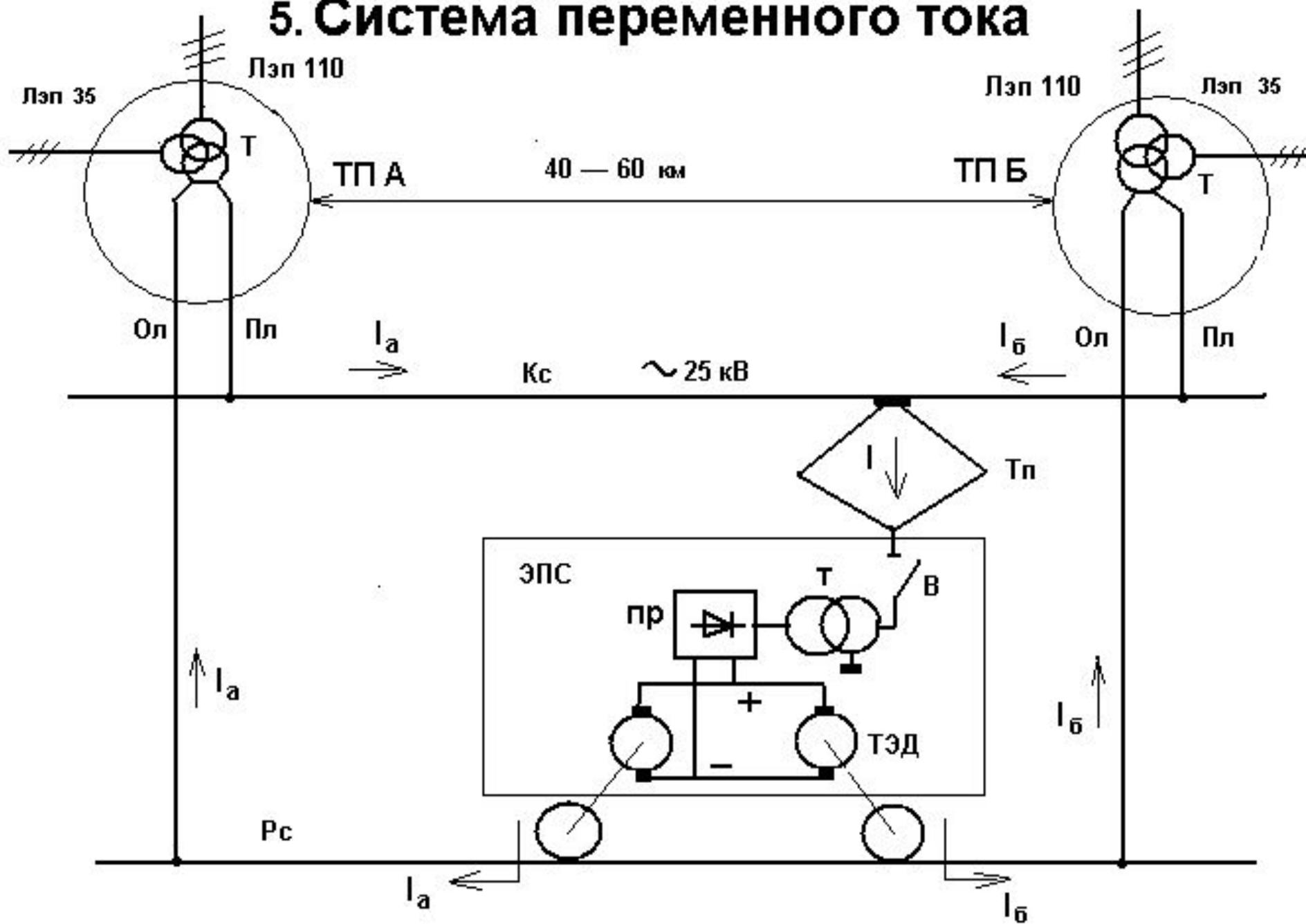
Лэп 35

Лэп 35

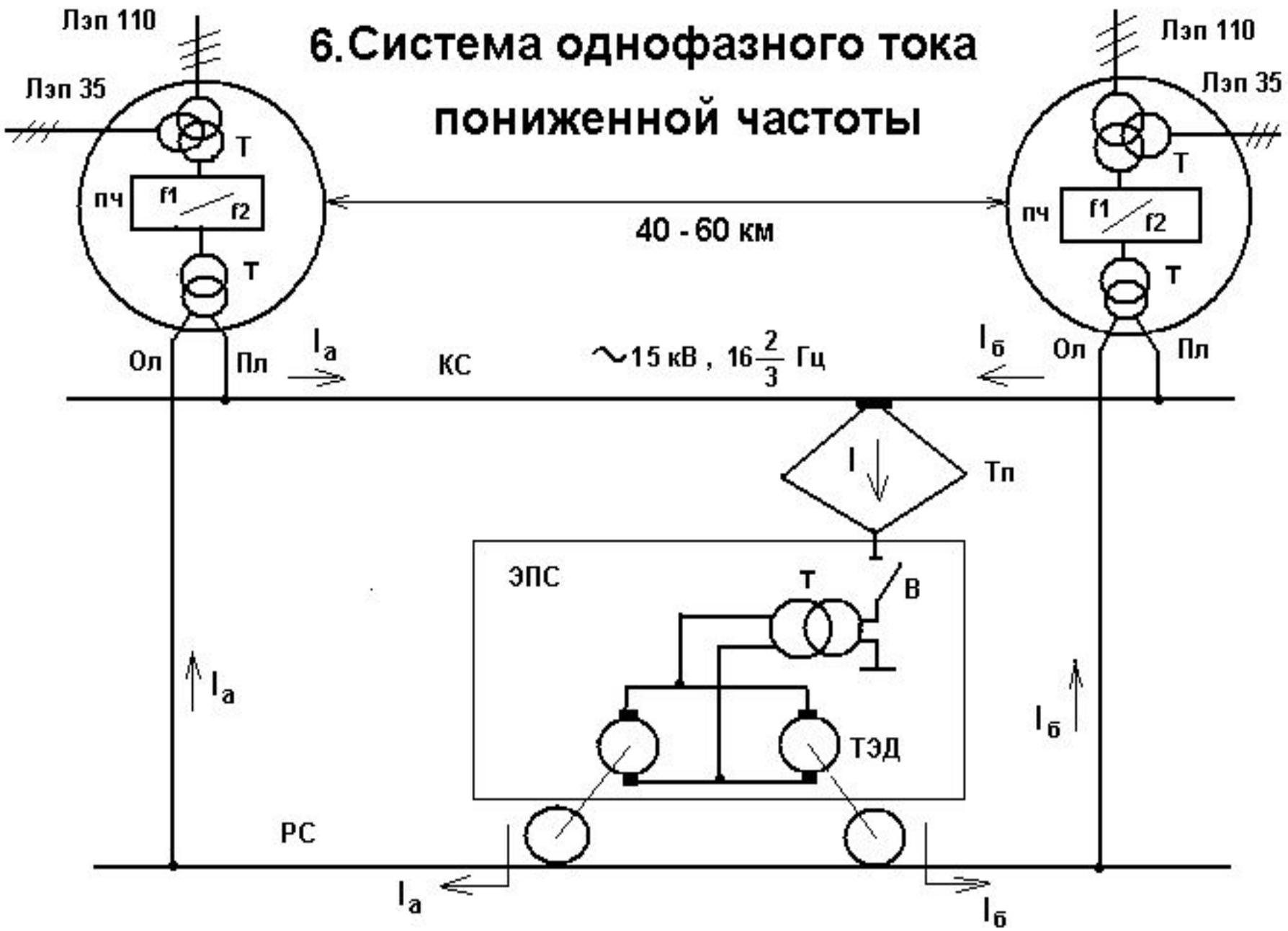
15-20 км



5. Система переменного тока



6. Система однофазного тока пониженной частоты



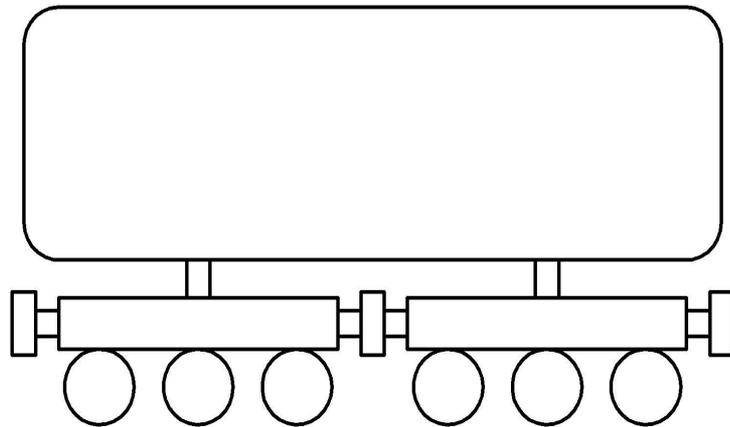
7. Виды ЭПС, используемые в России

Электровозы					Электропоезда			
Магистральные					Магистральные			Метро
Напряжение в тяговой сети					Напряжение в тяговой сети			
=3кВ		~25кВ		=3кВ / ~25кВ	=3кВ	~25кВ	=3кВ / ~25кВ	= 800 В
пасс.	груз.	пасс.	груз.	пасс.				
ЧС 2 ЧС 6 ЧС 7 ЧС 8 ЧС 200 ЭП 2	ВЛ 23 ВЛ 8 ВЛ 10 ВЛ 11 ВЛ 15 2ЭС4к "Дончак" 2ЭС6 "Синара"	ЧС 4 ВЛ 65 ВЛ 80т ВЛ 80с ЭП 1	ВЛ 60 ВЛ 80 ВЛ 85 ВЛ 86 2ЭСК "Ермак"	ЭП 10 ЭП 100 ЭП 200 ЭП 300	ЭР 2 ЭР 200 ЭТ 2 ЭД 2 ЭМ 4 ЭД 4 ЭД 6 "Сапсан"	ЭР 9 ЭД 9	ЭДТ4	Цифровые обозначения типов вагонов.

Страны, производители ЭПС: ЧС - Чехословакия;
 ВЛ - СССР; ЭР - Латвия;
 ЭП, 2ЭС, ЭТ, ЭД, ЭМ, ЭДТ - Россия;
 "Сапсан" - Германия.

Рисунок 8 - Конструктивные схемы электровозов и их осевые формулы

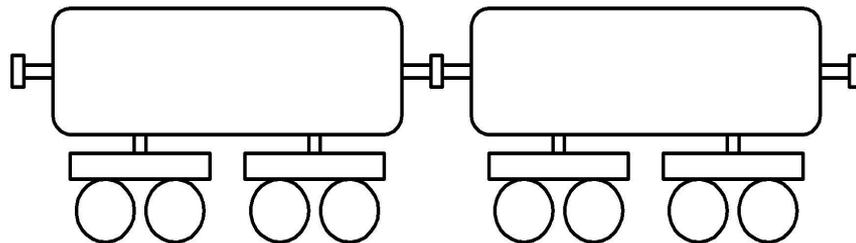
а)



а) электровозы
ВЛ22^М и ВЛ23

$$3_0 + 3_0$$

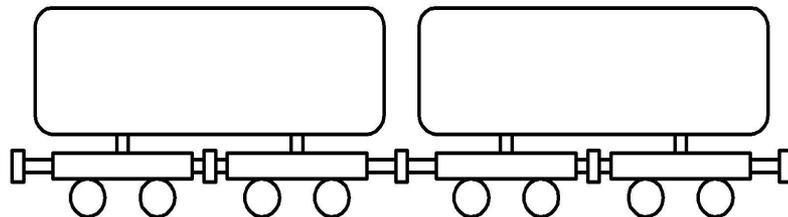
б)



б) электровозы
ВЛ80, ВЛ82,
ВЛ10 и ВЛ11

$$2[2_0 - 2_0]$$

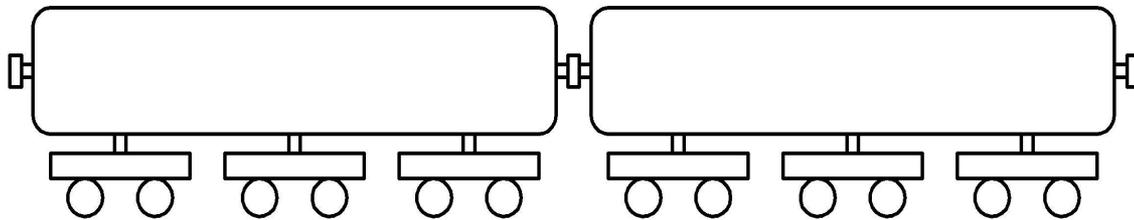
в)



в) электровоз
ВЛ8

$$2_0 + 2_0 + 2_0 + 2_0$$

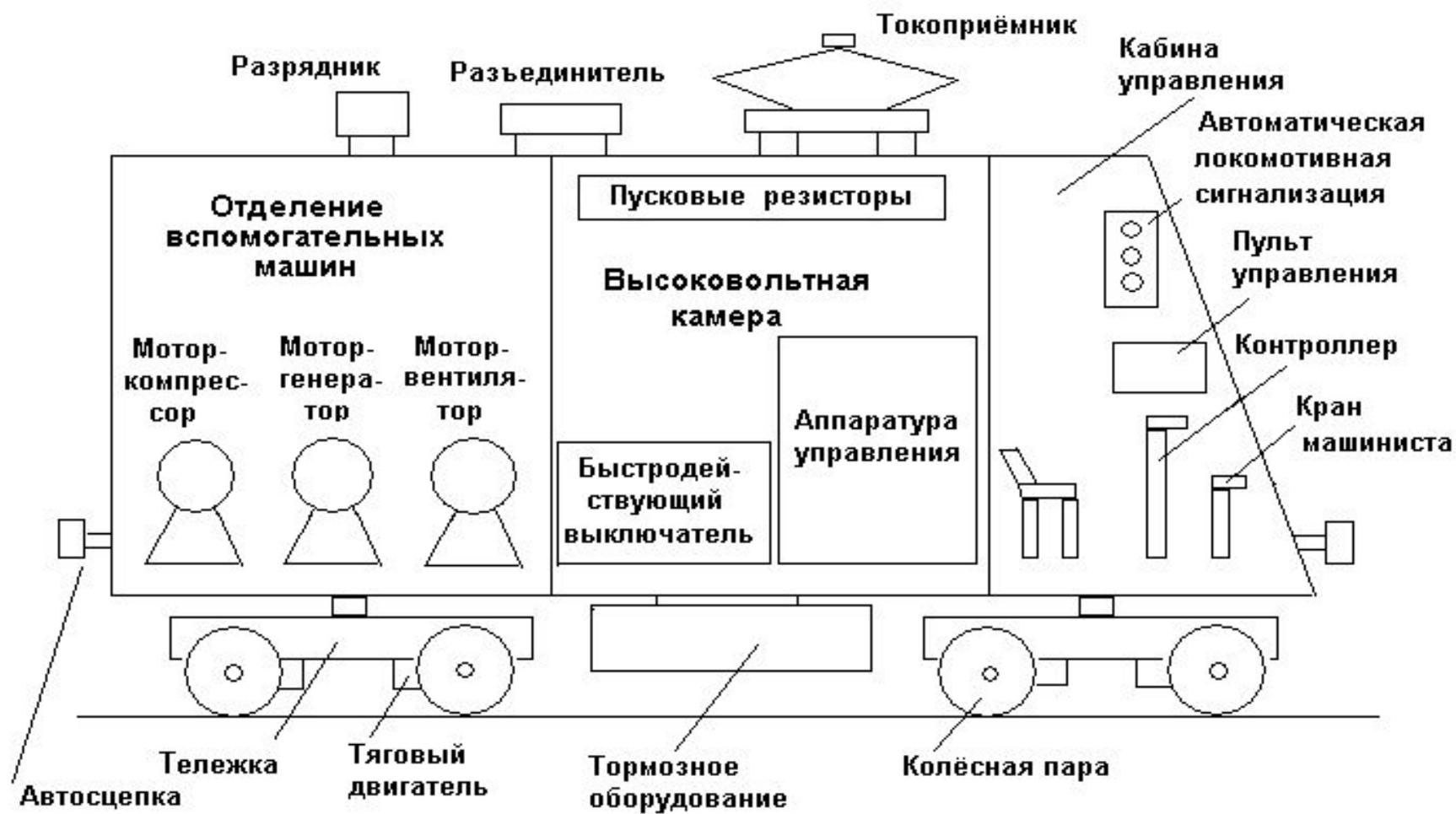
г)



г) электровозы
ВЛ85 и ВЛ15

$$2[2_0 - 2_0 - 2_0]$$

9.Оборудование электровоза постоянного тока



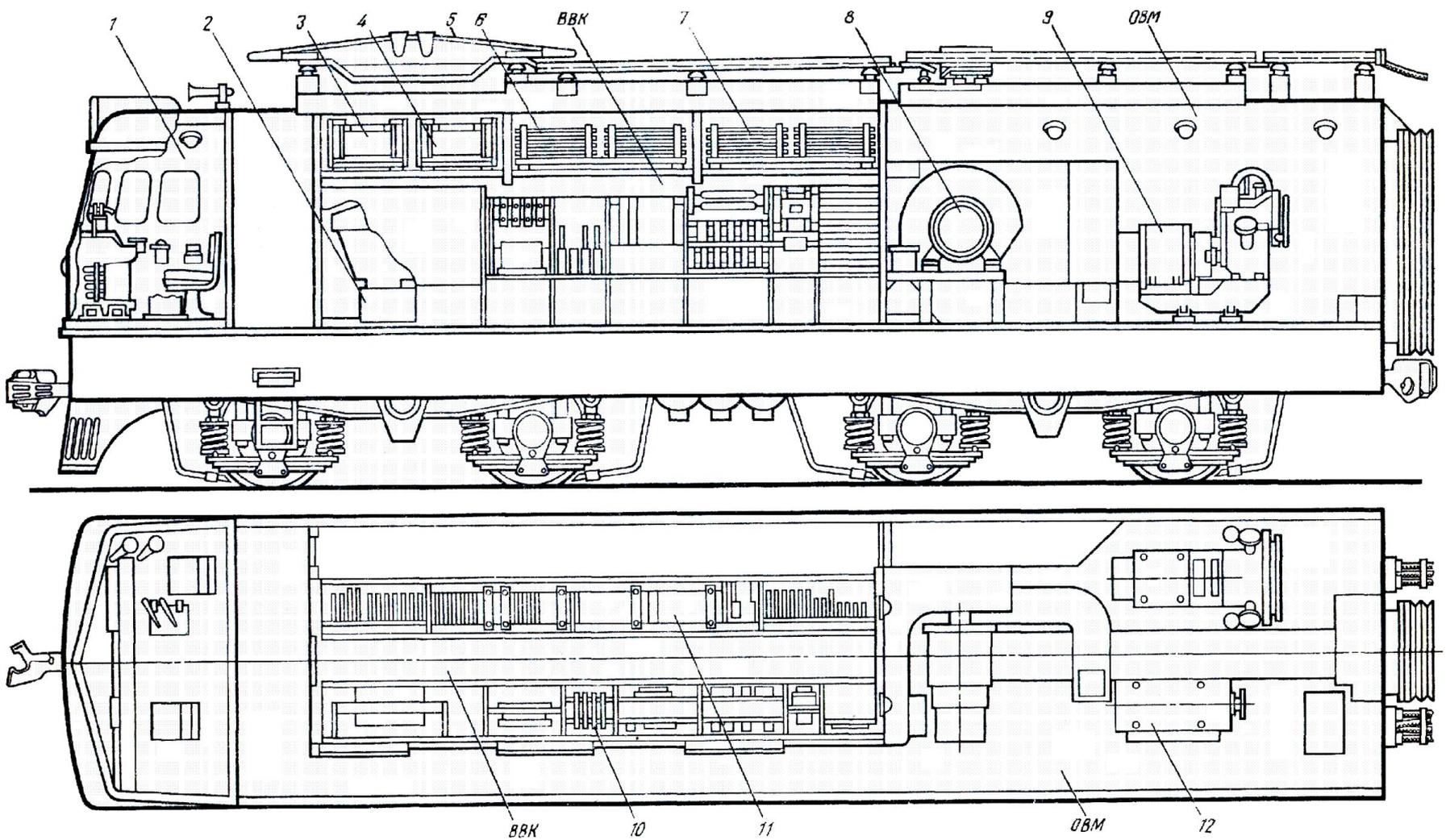
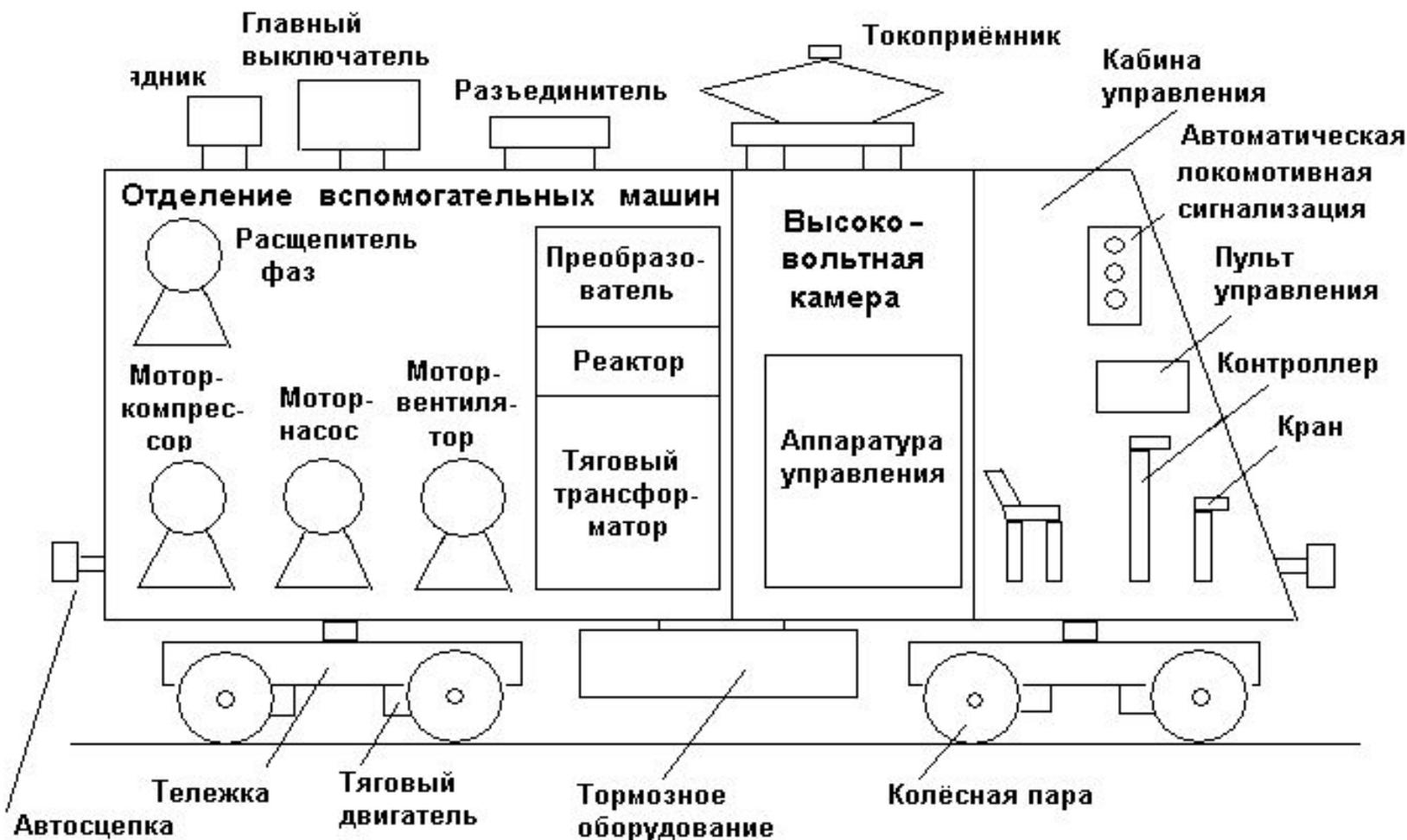


Рисунок 10 - Схема расположения электрооборудования на электровозе постоянного тока ВЛ10

11. Оборудование электровоза переменного тока



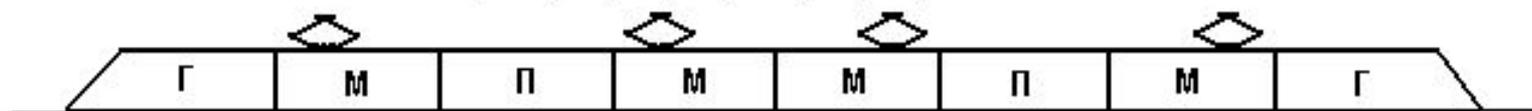
12. Электропоезда

На железных дорогах России эксплуатируют несколько типов электропоездов. Их формируют из отдельных секций, состоящих из двух вагонов: моторного М и прицепного П или головного Г.

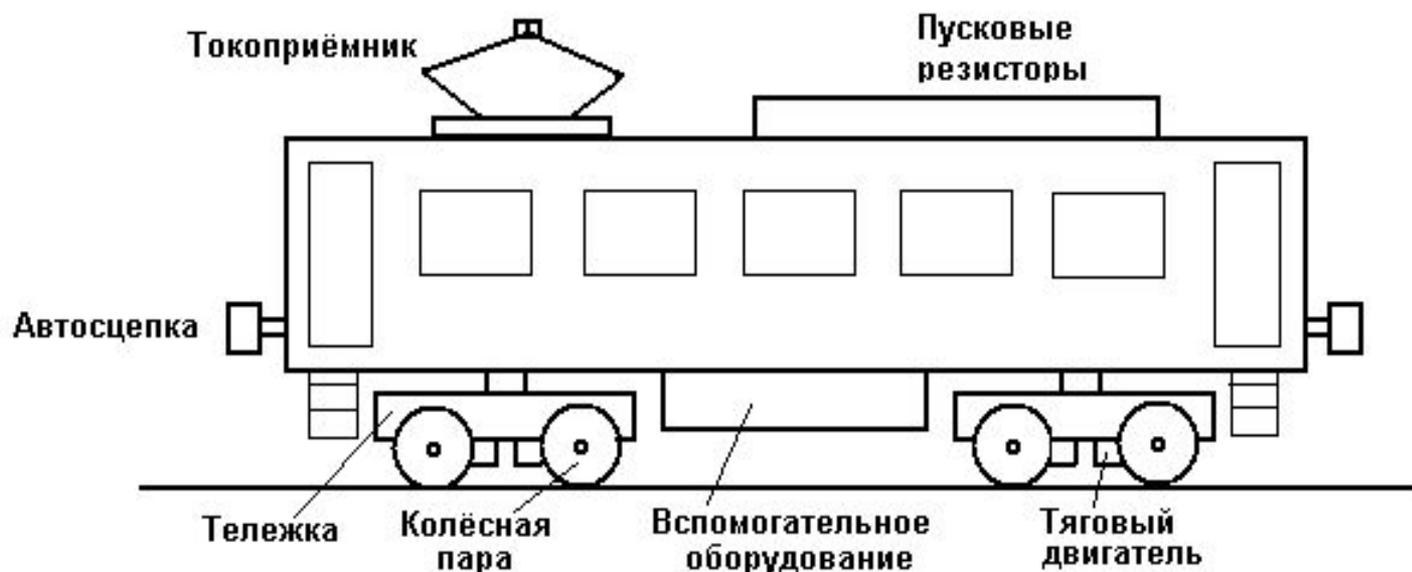
В составе может быть от 4 до 12 вагонов.

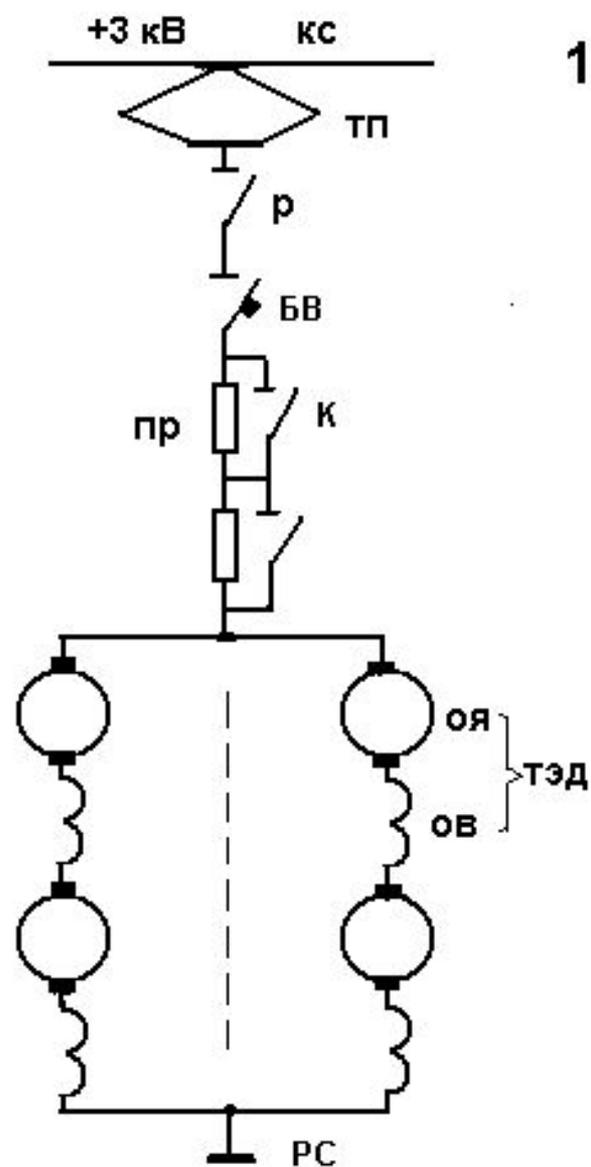
Обозначают электропоезда следующей характеристикой, например, в случае 8 вагонов:

$$(Г+М) + (П+М) + (М+П) + (М+Г)$$



Конструкция моторного вагона электропоезда





13. Упрощённая силовая цепь ЭПС постоянного тока

КС - контактная сеть

ТП - токоприёмник

БВ - быстродействующий
выключатель

Р - разъединитель

ОЯ - обмотка якоря

ОВ - обмотка возбуждения

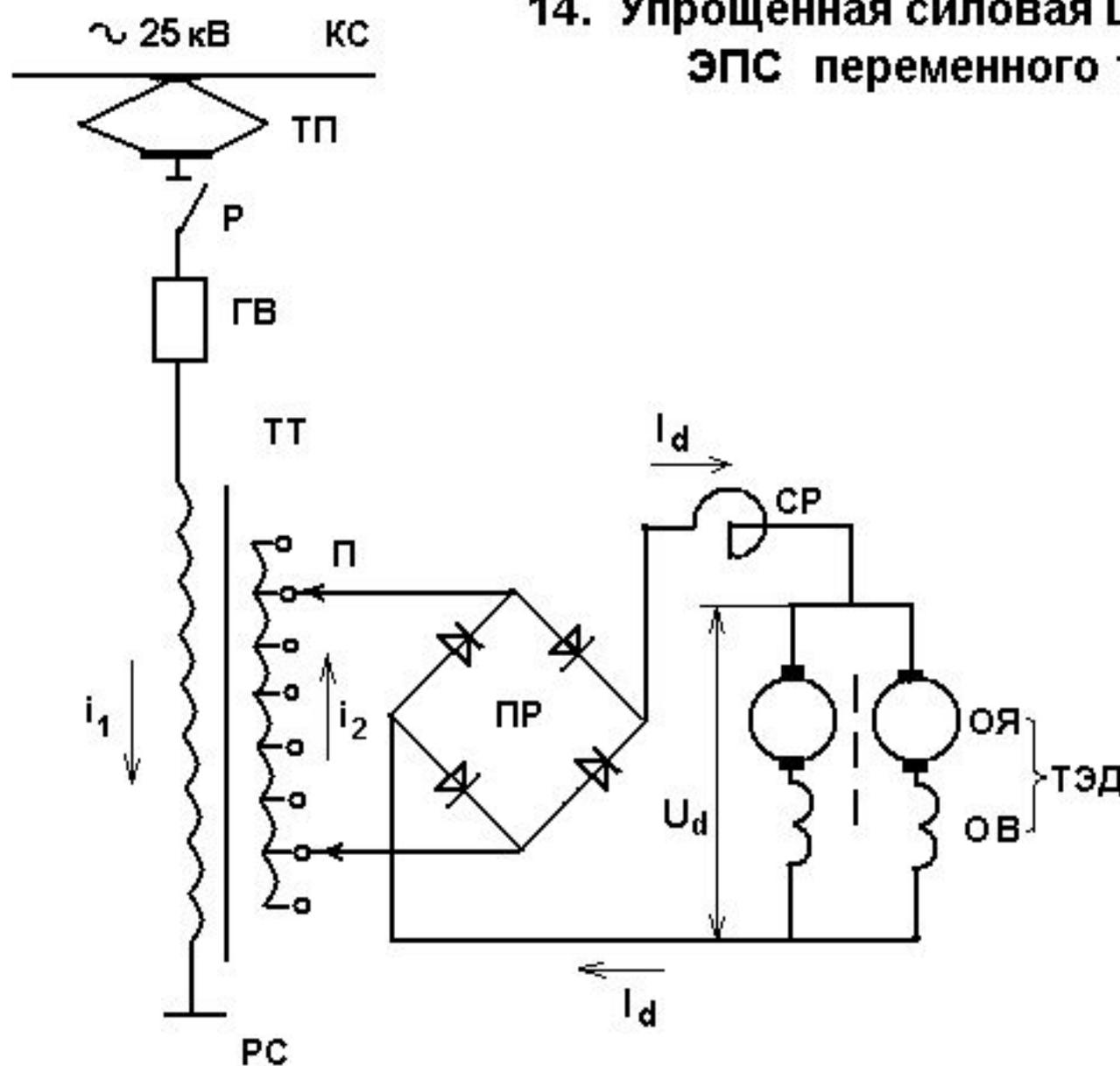
ПР - пусковой резистор

К - контактор

ТЭД - тяговый электродвигатель

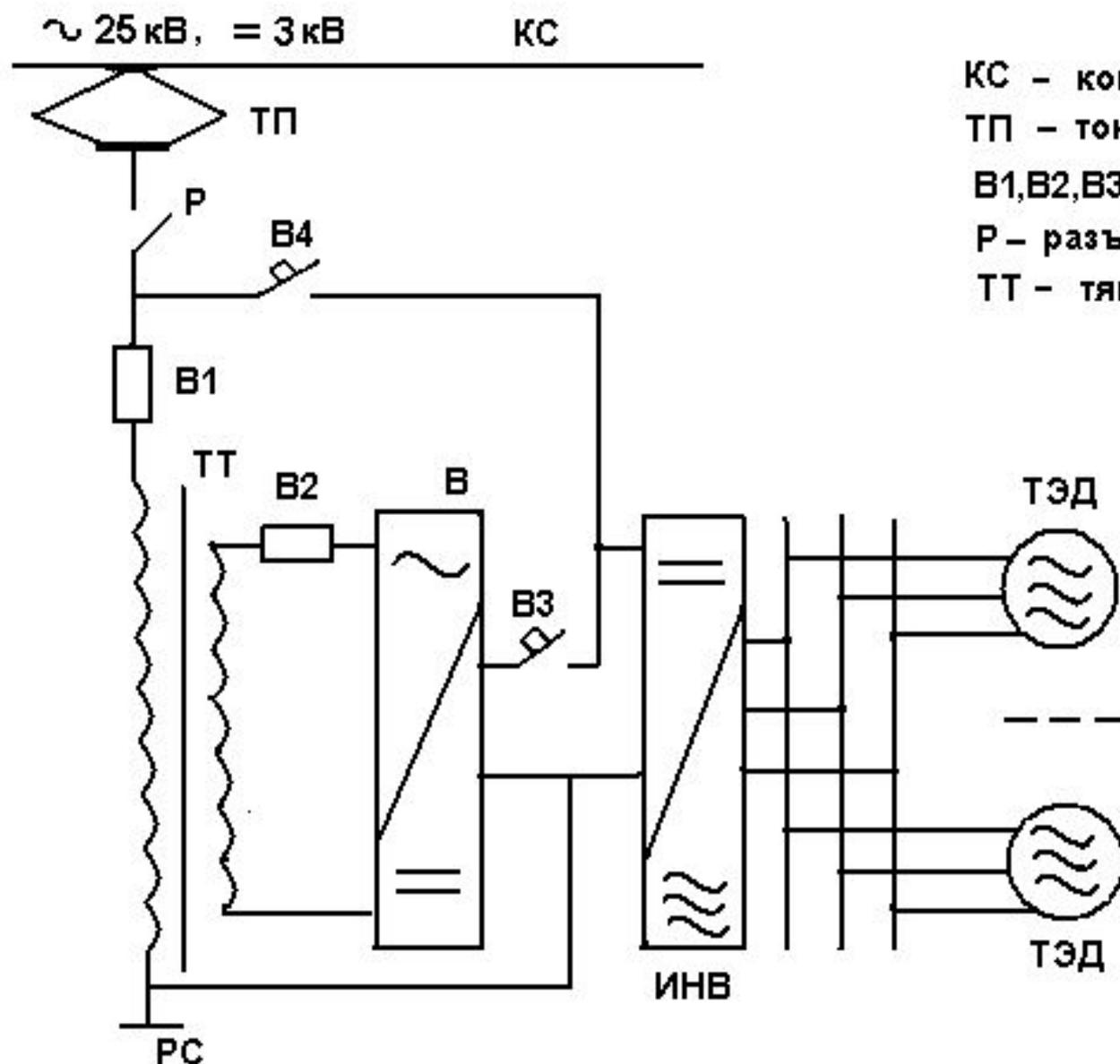
РС - рельсовая сеть

14. Упрощённая силовая цепь ЭПС переменного тока



- КС – контактная сеть
- ТП – токоприёмник
- ГВ – главный выключатель
- Р – разъединитель
- ТТ – тяговый трансформатор
- РС – рельсовая сеть
- П – переключатель
- ПР – преобразователь
- СР – сглаживающий реактор
- ОЯ – обмотка якоря
- ОВ – обмотка возбуждения
- ТЭД – тяговый электродвигатель

15. Упрощённая силовая цепь ЭПС двойного питания



КС – контактная сеть

ТП – токоприёмник

В1, В2, В3, В4 – выключатели

Р – разъединитель

ТТ – тяговый трансформатор

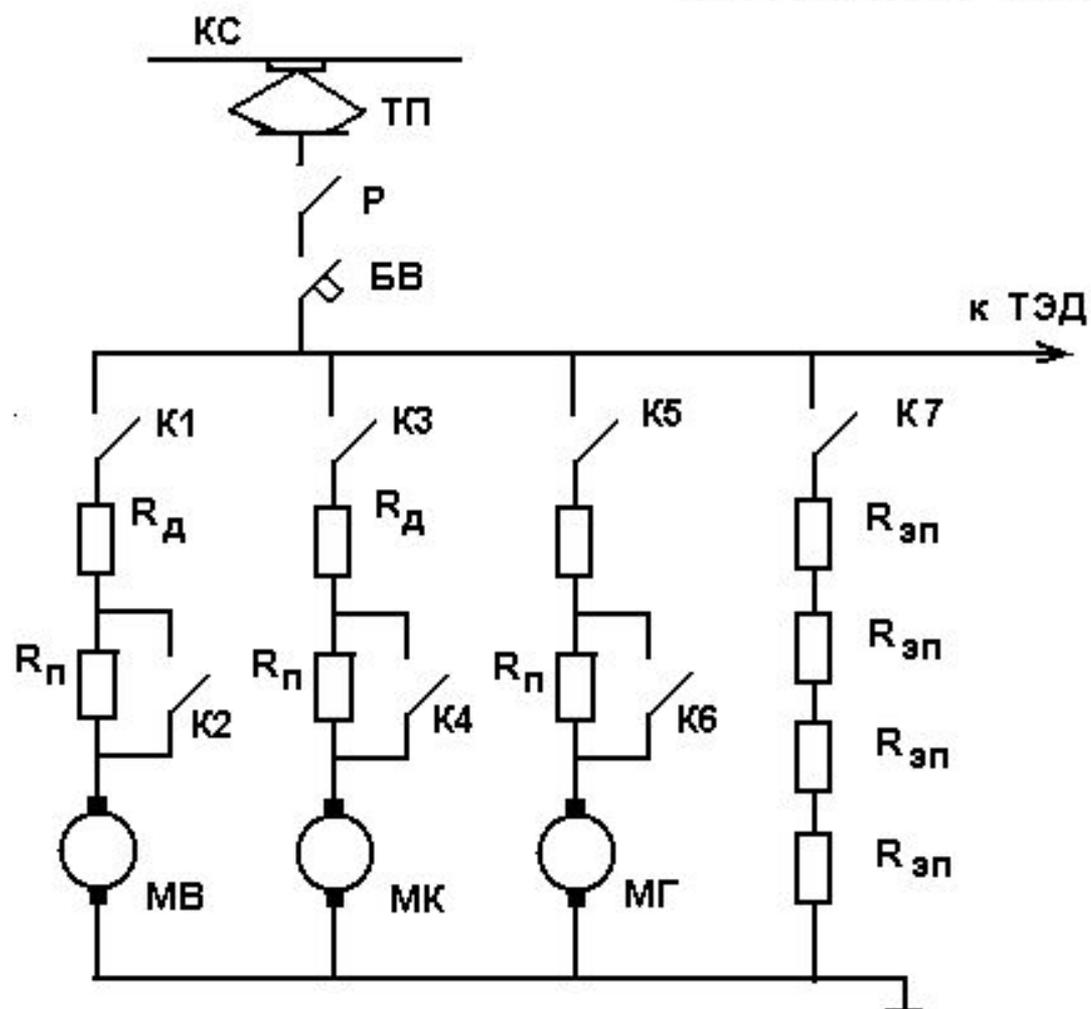
РС – рельсовая сеть

В – выпрямитель

ИНВ – инвертор

ТЭД – тяговые
двигатели
трехфазные,
асинхронные

16. Высоковольтная цепь вспомогательных машин ЭПС постоянного тока



- КС — контактная сеть
- ТП — токоприёмник
- Р — разъединитель
- БВ — быстродействующий выключатель
- К1 — К7 — контакторы
- R_d — добавочные резисторы
- R_n — пусковые резисторы
- $R_{зп}$ — электрические печи
- МВ — мотор-вентилятор
- МК — мотор-компрессор
- МГ — мотор-генератор
- ТЭД — тяговые двигатели

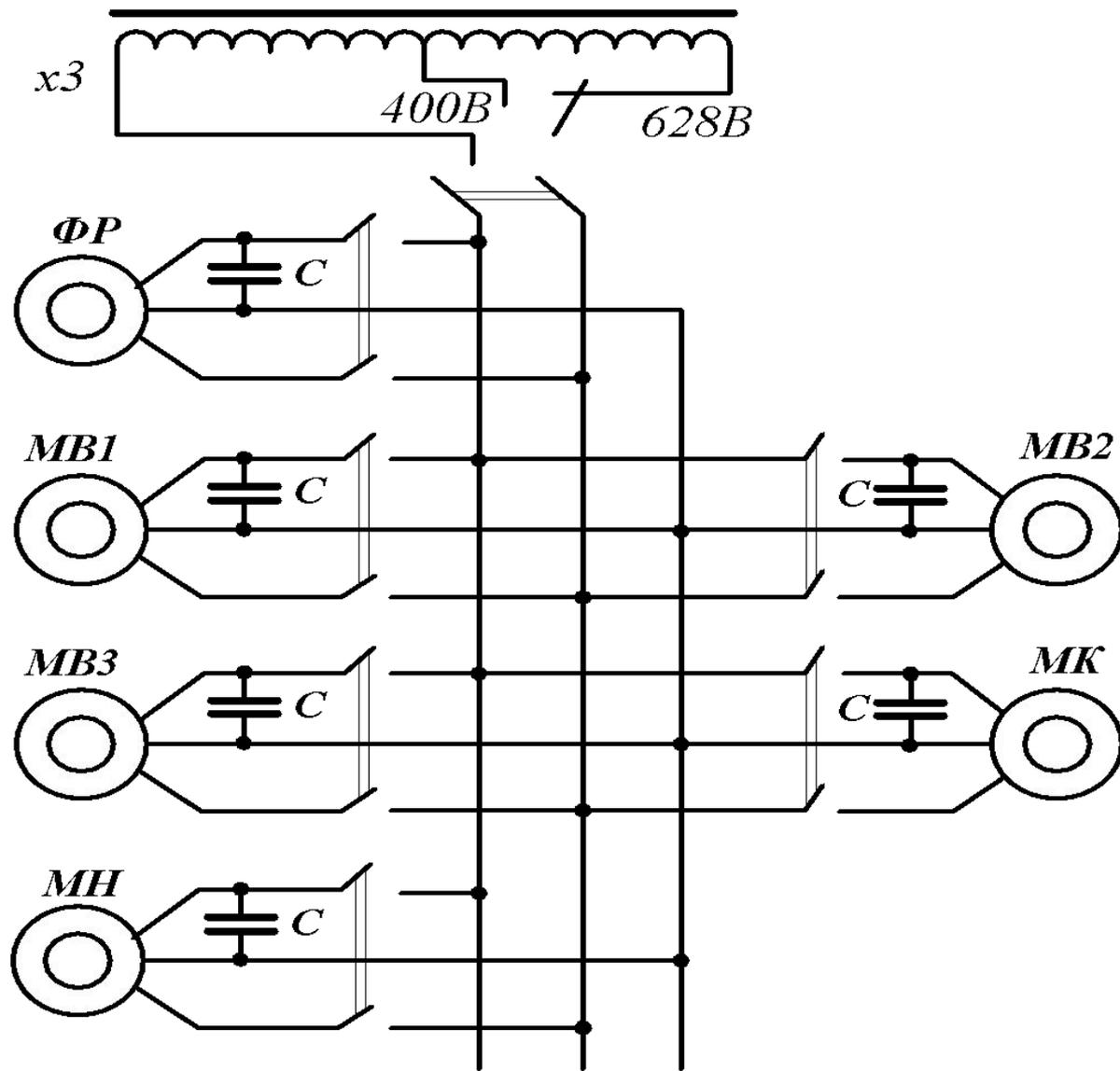


Рисунок 17 – Электрическая схема вспомогательных машин э.п.с. переменного тока

18. Закон Ампера

На проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует сила

$$F = B I L \sin \alpha ,$$

где B - индукция, Тл

I - ток, А

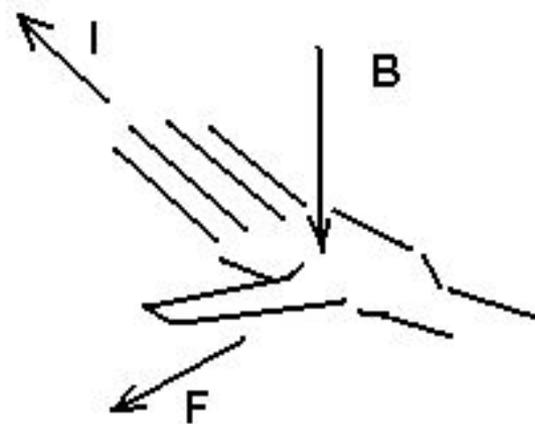
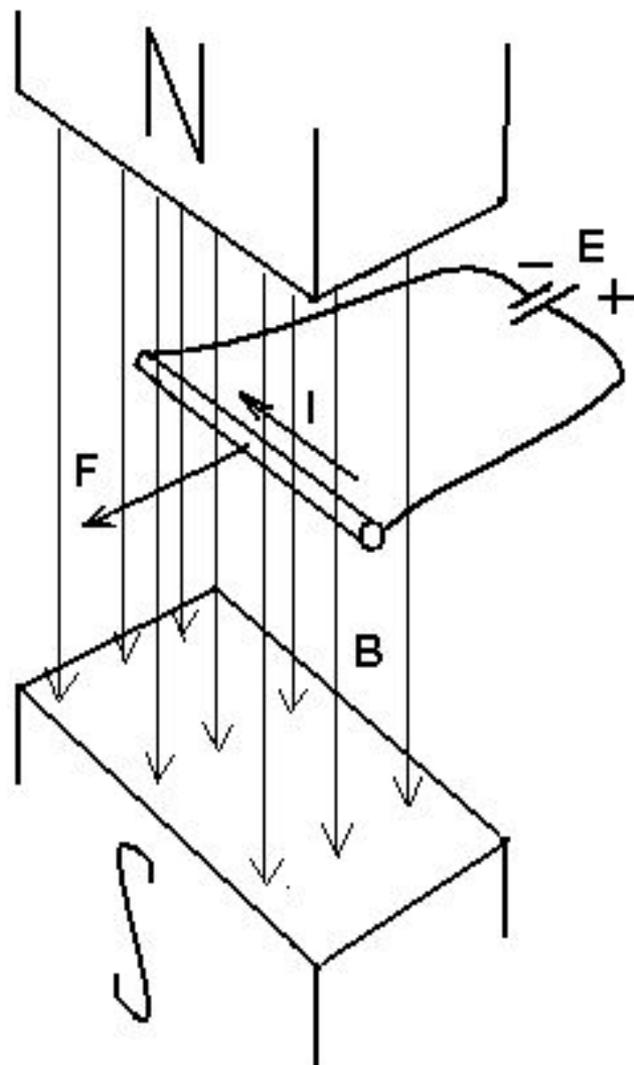
L - длина проводника, м

α - угол между B и I

$$\text{При } \alpha = \frac{\pi}{2}$$

$$F = B I L$$

Направление силы определяют по правилу левой руки.



19. Закон электромагнитной индукции

При перемещении проводника в магнитном поле в нём возникает эдс E

$$E = B L V \sin \alpha,$$

где B - индукция, Тл

L - длина проводника, м

V - скорость, м/сек,

α - угол между B и V

При $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$$E = B L V$$

Направление эдс определяют по правилу правой руки.

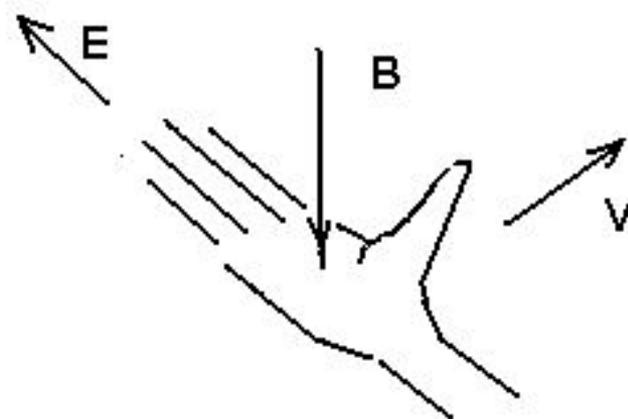
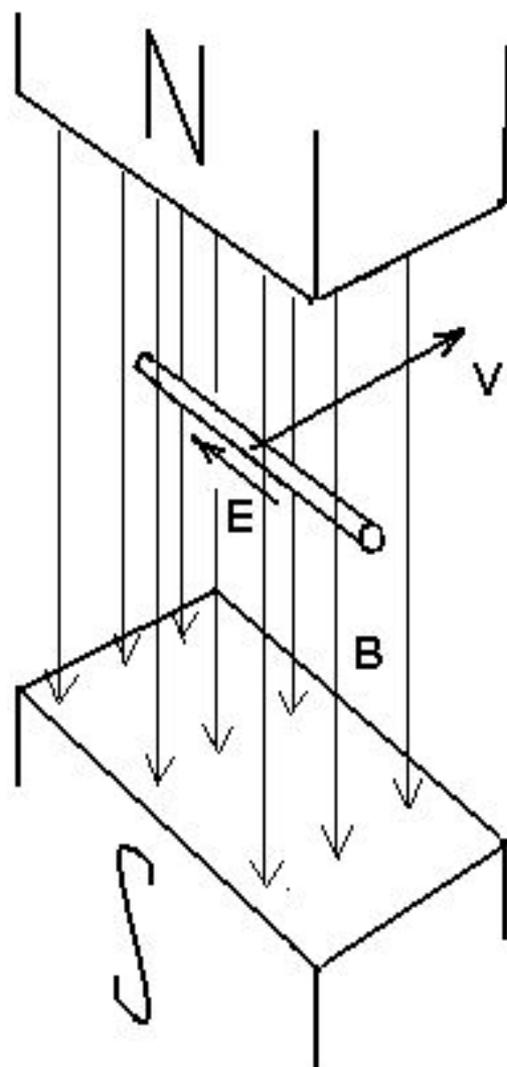


Рисунок 20 – Простейшая машина постоянного тока.

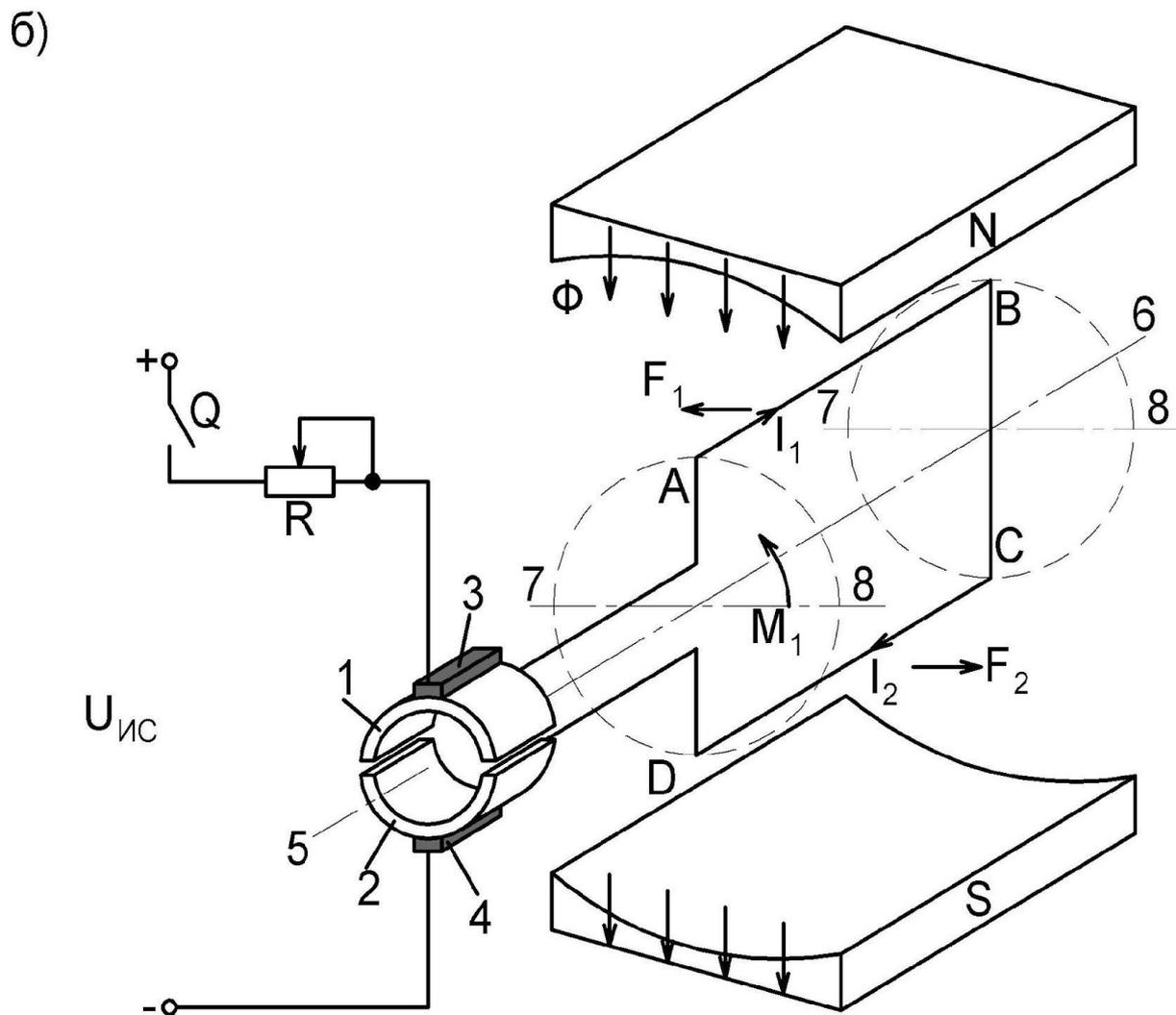
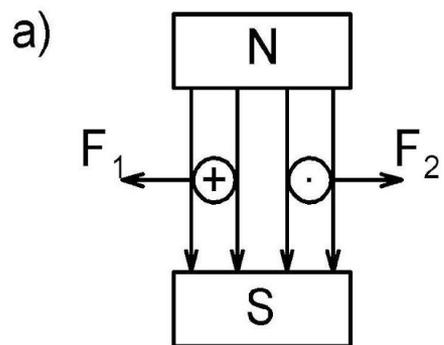
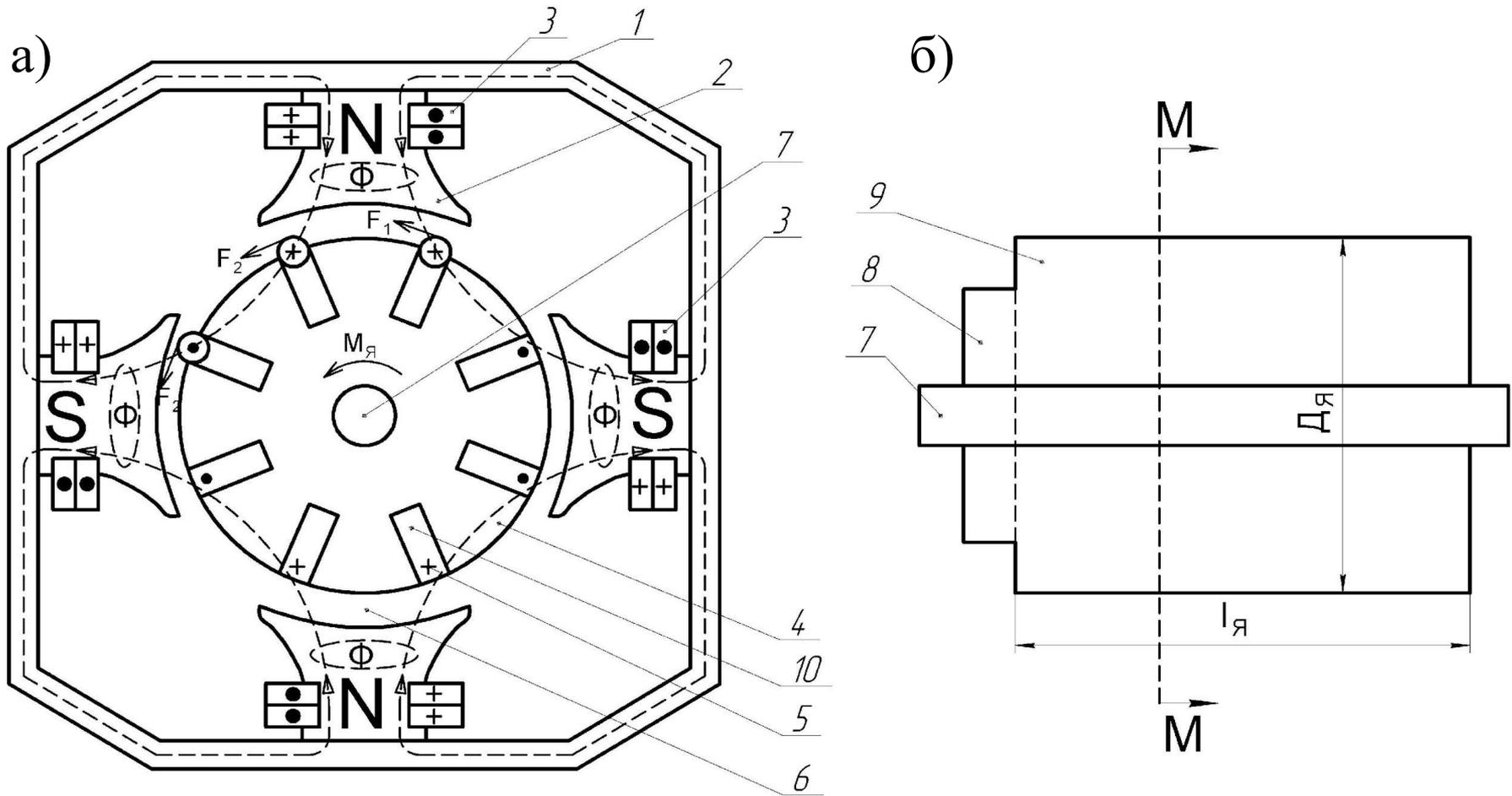


Рисунок 21 - Конструктивная схема тягового двигателя



а) - поперечный разрез ТЭД по линии MN: 1-остов; 2-сердечник главного полюса; 3-катушка обмотки возбуждения; 4-сердечник якоря; 5-проводник обмотки якоря; 6-воздушный зазор; 7-вал якоря; 10- пазы сердечника

б) – вид сбоку на якорь и коллектор ТЭД: 7-вал якоря; 8-коллектор; 9-якорь ТЭД

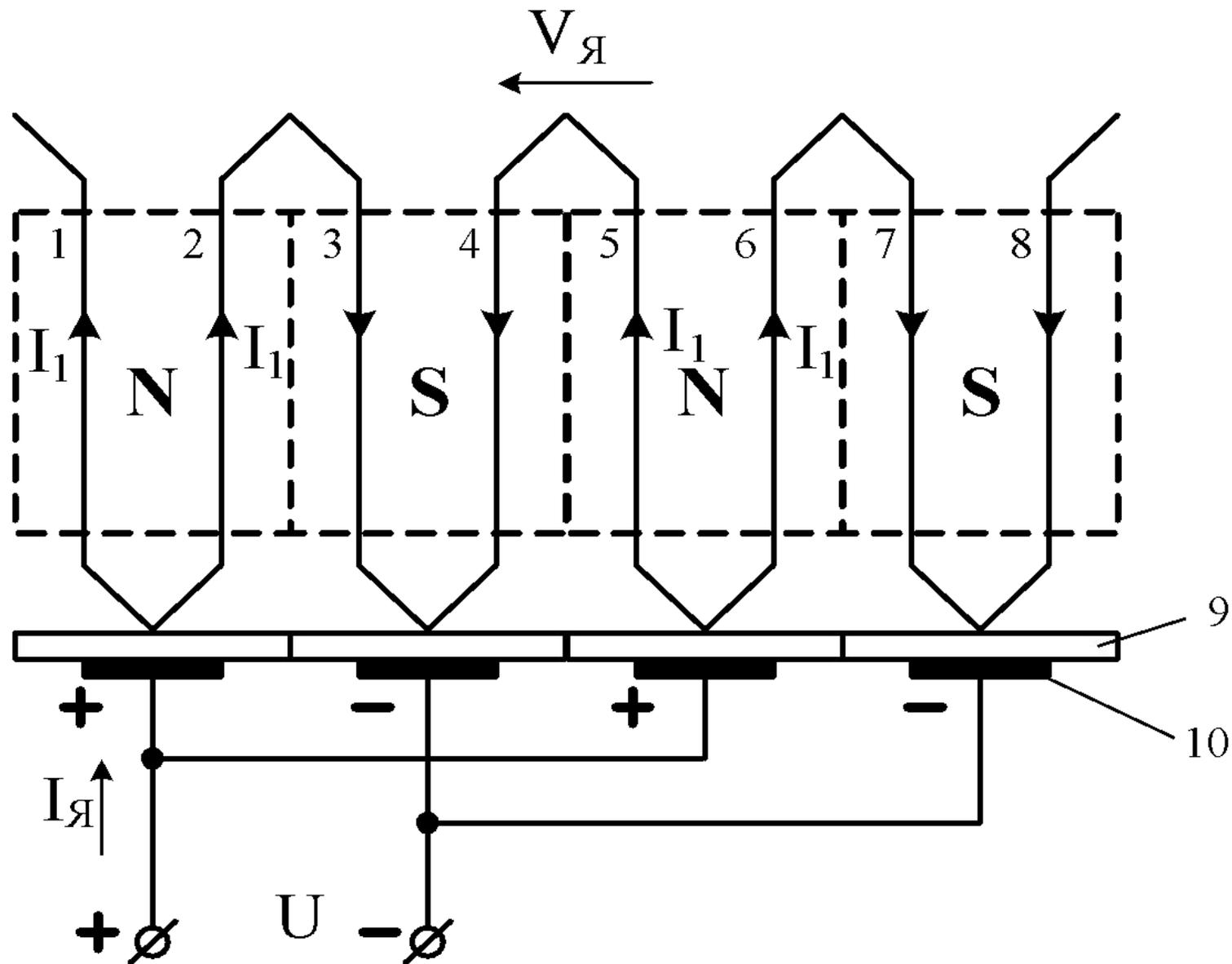
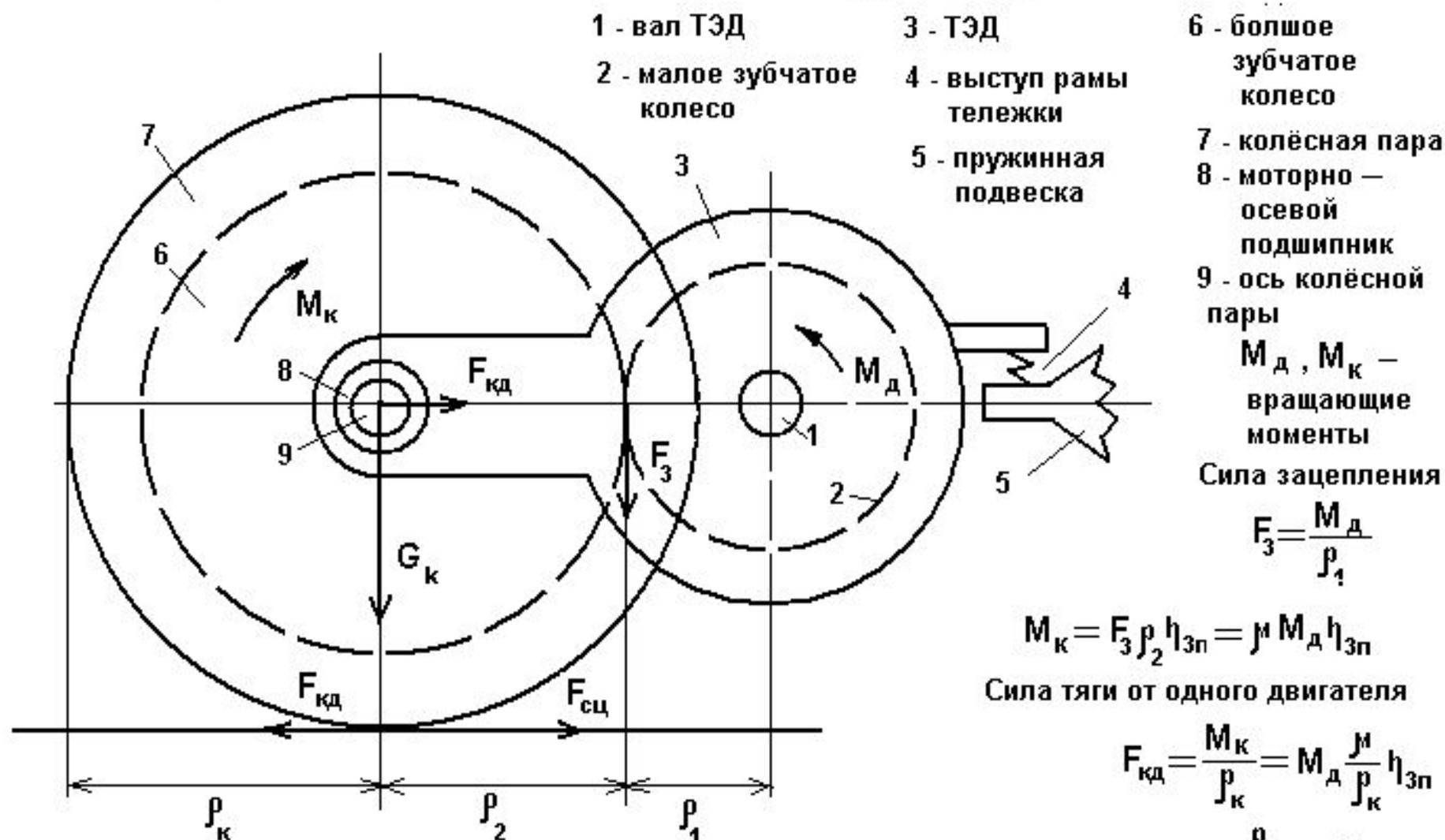


Рисунок 22 – Упрощённая развёрнутая схема обмотки якоря.
 1...8 – проводники обмотки якоря; 9 – пластины коллектора;
 10 – угольно-графитовые щётки

23. Образование силы тяги от одного двигателя

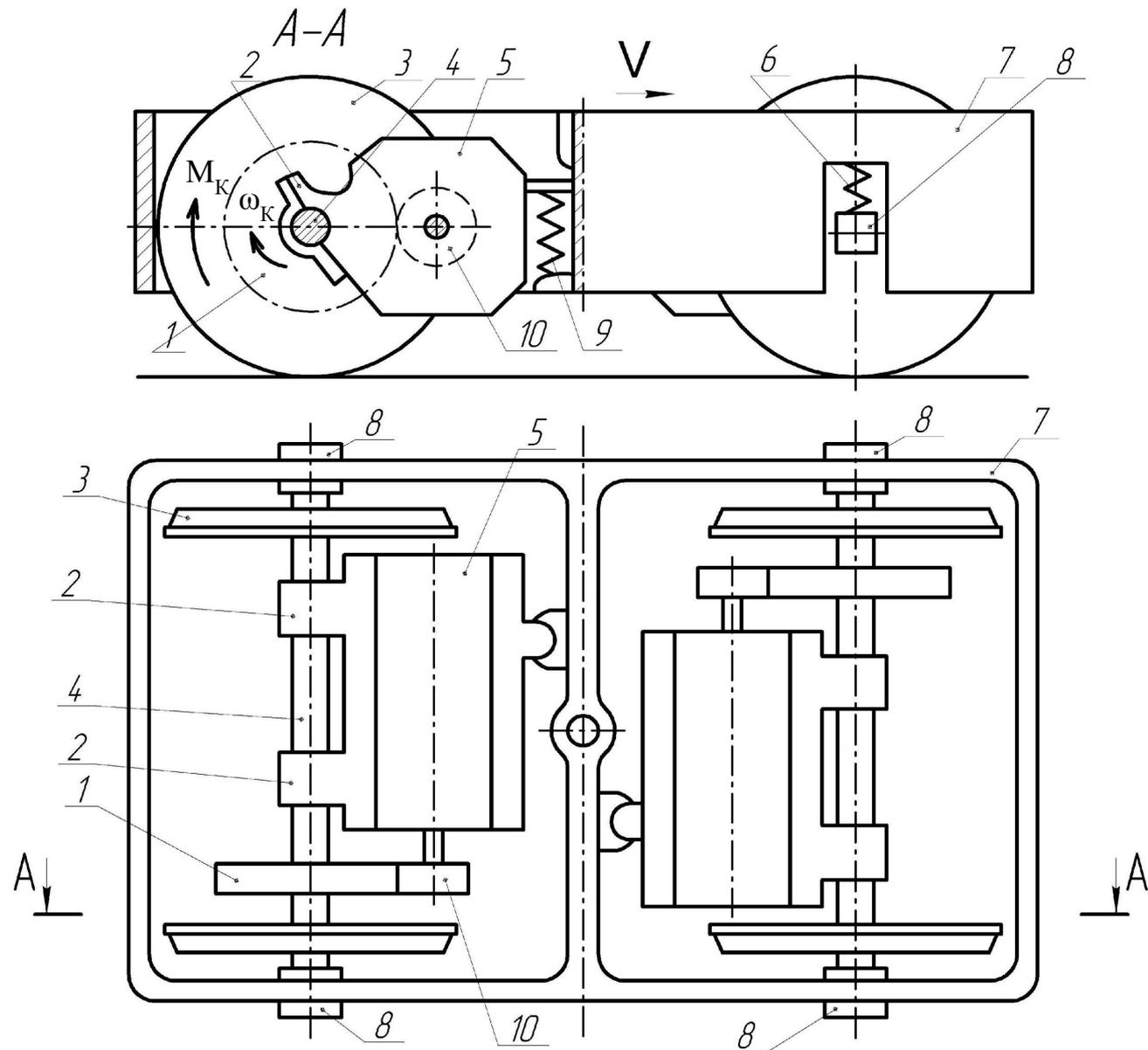


Коэффициент потерь зубчатой передачи $\eta_{зп}$, передаточное число $\mu = \frac{r_2}{r_1} = \frac{z_2}{z_1}$.

Сила сцепления колёсной пары с рельсами $F_{сц} = 1000 G_к \psi$, где ψ - коэффициент сцепления.

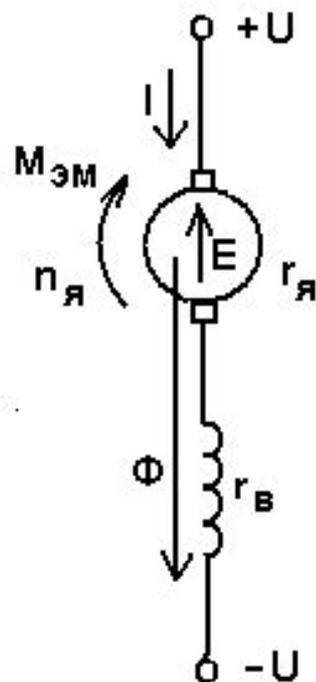
Условие нормальной тяги $F_{кд} \leq F_{сц}$; условие боксования $F_{кд} > F_{сц}$.

Рисунок 24 - Основные элементы тягового электропривода



1 и 10 – зубчатая передача; 2 – приливы; 3 – колесная пара; 4 – ось колесной пары; 5 – ТЭД; 6 – рессоры; 7 – рама тележки; 8 – буксы; 9 – пружина.

25. Уравнение электрической цепи и вращающий момент ТЭД



$$U = E + I \cdot r,$$

где U - напряжение, В

E - эдс, В

I - ток, А

$r = r_{\text{я}} + r_{\text{в}}$, Ом

Якорь двигателя развивает
электромагнитный
вращающий момент

$$M_{\text{эм}} = C_M \Phi I, \text{ Нм}$$

где $C_M = pN/2a\pi$ -
конструктивная постоянная,

p - число пар полюсов,

N - число проводников
обмотки якоря,

$2a$ - число параллельных
ветвей обмотки якоря,

Φ - магнитный поток одного полюса, Вб

Вращающий момент на валу якоря $M_{\text{д}}$ меньше электромагнитного за счёт механических и магнитных потерь в двигателе.

Причиной этих потерь являются силы трения движущихся частей, перемагничивание якоря и вихревые токи, создающие тормозящее действие.

$$M_{\text{д}} = C_M \Phi I \eta_M,$$

где η_M - коэффициент,
учитывающий магнитные
и механические потери.

Выводы:

1. Вращающий момент не зависит от скорости вращения якоря.
2. Направление вращения якоря можно изменить двумя способами: либо изменив направление тока в обмотке якоря, либо - направление магнитного потока полюсов.

26. ЭДС ВРАЩЕНИЯ

При вращении якоря в магнитном поле в проводниках его обмотки в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится эдс E

$$E = C_n \Phi n_a,$$

где E - эдс в вольтах,

C_n - конструктивная постоянная для определения эдс через частоту вращения якоря, n_a об/мин,

$$C_n = pN / 60a ,$$

Φ - магнитный поток одного полюса, Вб,

Поскольку ТЭД вращает колёсную пару через зубчатую передачу, между частотой вращения n_a и поступательной скоростью электровоза V имеется прямая пропорциональность .

Выражение для эдс через скорость имеет вид:

$$E = C_v \Phi V,$$

где C_v - конструктивная постоянная для определения эдс через скорость движения электровоза, V км / час,

$$C_v = pN\mu / a\pi D_k .$$

где μ - передаточное число зубчатой передачи.

Выводы:

1. ЭДС вращения пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения якоря или скорости движения электровоза.
2. ЭДС вращения направлена против тока в проводниках обмотки якоря при работе электрической машины в режиме двигателя.

27. ВЫРАЖЕНИЕ СИЛЫ ТЯГИ ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Если использовать полученные ранее выражения для силы тяги и вращающего момента, (см. рис.23, 25), можно получить зависимость силы тяги на ободу колеса от тока и магнитного потока

$$F_{к\delta} = C_F \Phi I \eta_F,$$

где $F_{к\delta}$ - сила тяги, Н,

Φ - магнитный поток, Вб,

$C_F = C_M \frac{\mu}{\rho_k}$ - конструктивная постоянная для вычисления силы тяги,

$\eta_F = \eta_M \eta_{ЭП}$ - коэффициент, учитывающий потери силы тяги в процессе преобразования электрической энергии в механическую.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ РАБОТУ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

1. $U = E + I * r$

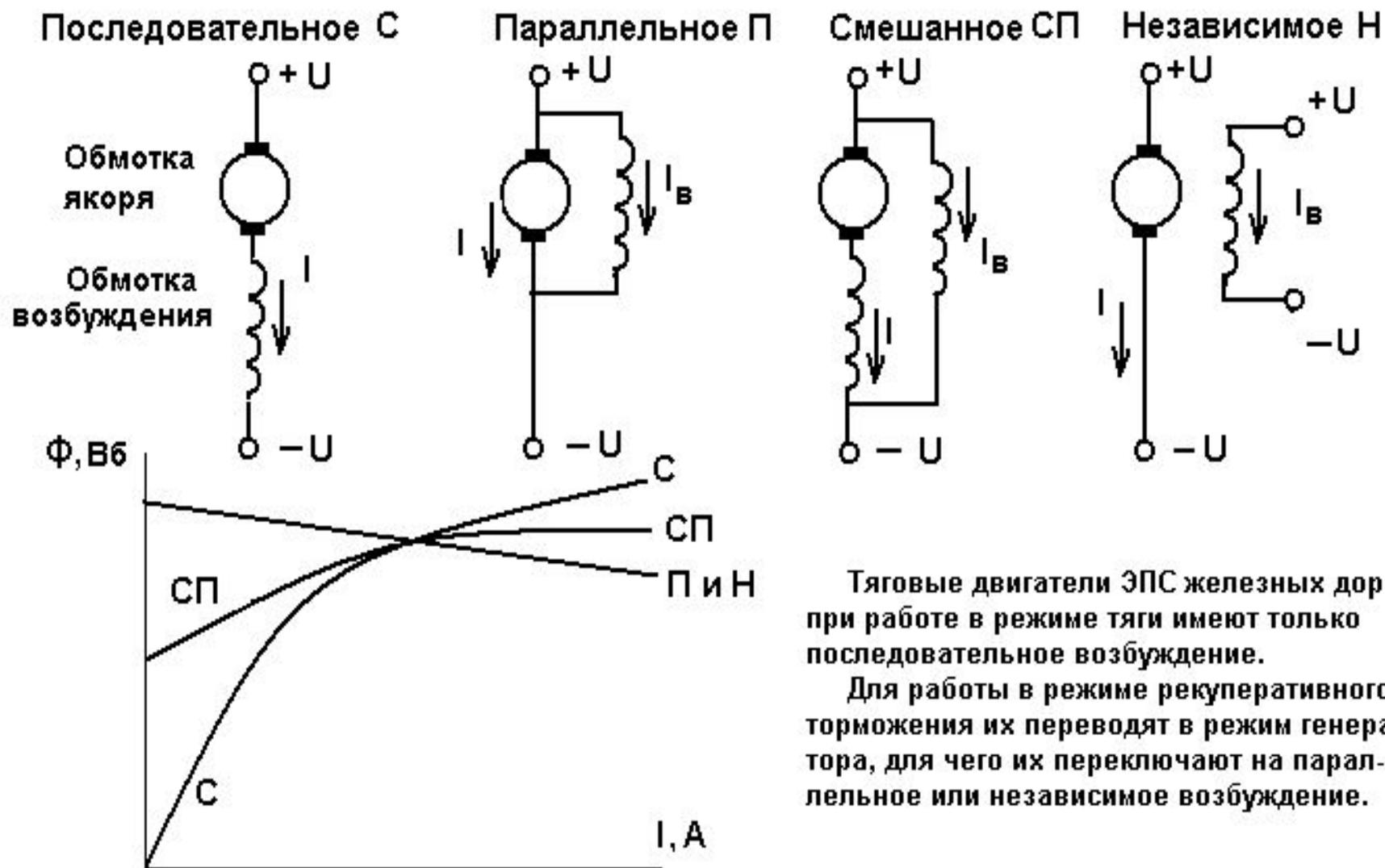
2. $M_{\delta} = C_M \Phi I \eta_M$

3. $E = C_v \Phi V$; $E = C_n \Phi n_s$

4. $F_{к\delta} = C_F \Phi I \eta_F$

28. Магнитные характеристики тяговых двигателей

Зависимость магнитного потока от тока якоря $\Phi(I)$ называют магнитной характеристикой. Она зависит от вида возбуждения двигателя:



29. Скоростные характеристики тягового двигателя

Зависимости частоты вращения якоря и скорости движения электровоза от потребляемого двигателем тока называют скоростными характеристиками.

Из уравнения электрической цепи двигателя $U = E + I * r$ можно найти зависимости частоты вращения n_a и скорости движения V от тока якоря, подставляя в него выражения для ЭДС

$$U = C_n \Phi n_a + I * r \quad \text{и} \quad U = C_v \Phi V + I * r$$

В результате найдём уравнения скоростных характеристик тягового двигателя

$$n_a = \frac{U - I * r}{C_n \Phi}, \text{ об/мин} \quad \text{и} \quad V = \frac{U - I * r}{C_v \Phi}, \text{ км/час}$$

Задавая ряд значений тока, рассчитывают и строят эти характеристики.

30. Электромеханические характеристики ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Это характеристики, связывающие между собой электрические и механические величины.

Электромеханические характеристики на валу ТЭД

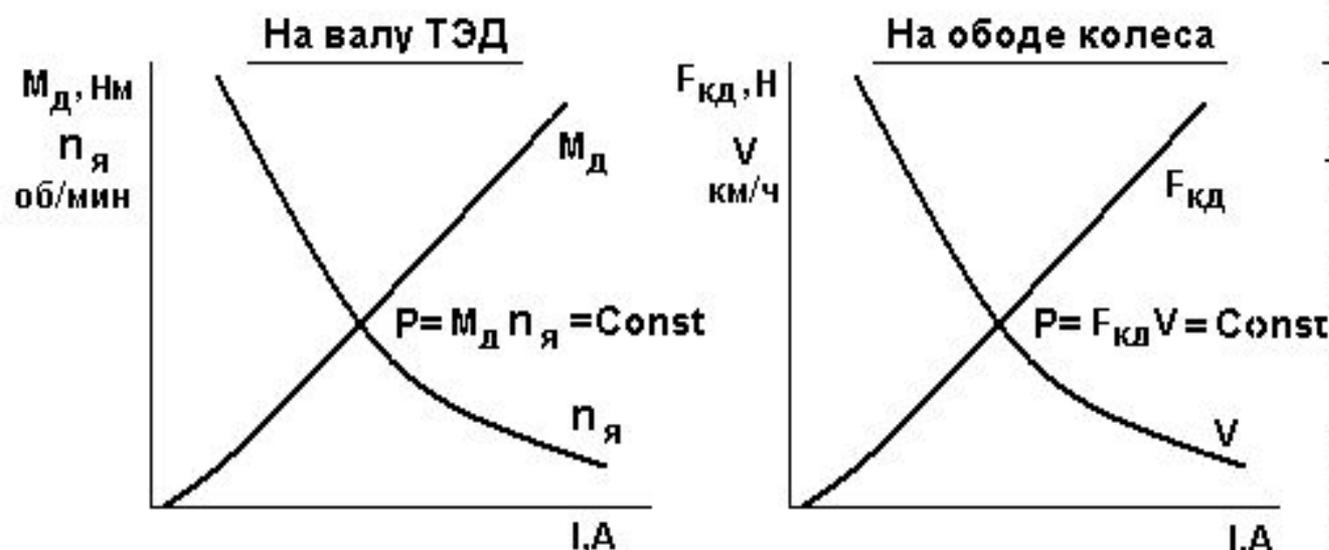
$$M_{\delta} = C_M \Phi I \eta_M \quad (1), \quad n_x = \frac{U - Ir}{C_n \Phi} \quad (2)$$

Электромеханические характеристики на ободах колёсной пары

$$F_{\kappa\delta} = C_F \Phi I \eta_F \quad (3), \quad V = \frac{U - Ir}{C_v \Phi} \quad (4)$$

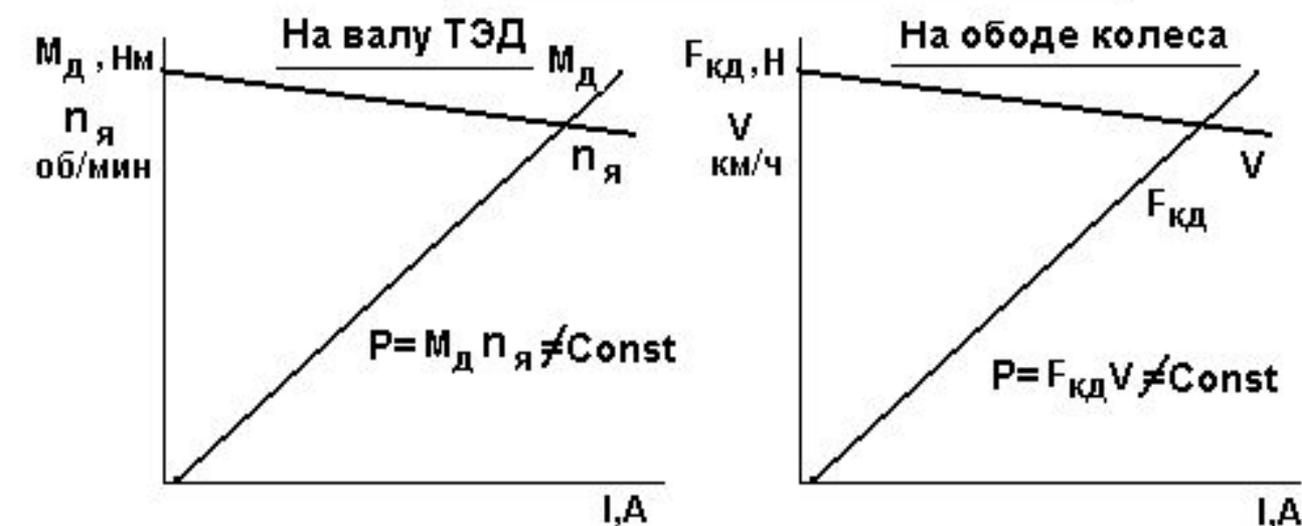
Эти выражения действительны для тяговых двигателей с разными способами возбуждения. Характер зависимостей, или вид кривых, определяется магнитными характеристиками двигателей. Для того, чтобы рассчитать, а затем построить графики, надо определить конструктивные постоянные C_M, C_n, C_F, C_v и иметь магнитную характеристику ТЭД.

31. Примерный вид электромеханических характеристик ТЭД



Характеристики ТЭД последовательного возбуждения называют мягкими. Они обеспечивают постоянство потребляемой мощности при различных токах.

Характеристики ТЭД параллельного возбуждения называют жесткими. Они обеспечивают рост потребляемой мощности с ростом тока.



Мягкие характеристики лучше отвечают условиям работы электрической железной дороги. Поэтому на ЭПС при работе в режиме тяги применяют последовательное возбуждение.

32. Коэффициент полезного действия ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Кпд тягового двигателя определяют как отношение отдаваемой механической мощности P_2 к получаемой электрической P_1

$$\eta_{\partial} = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

Если известны потери мощности в двигателе ΔP , то отдаваемая мощность $P_2 = P_1 - \Delta P$ и тогда

$$\eta_{\partial} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \quad (2)$$

Для ТЭД постоянного тока $P_1 = U * I$, и тогда

$$\eta_{\partial} = \frac{U * I - \Delta P}{U * I} \quad (3)$$

Таким образом, для определения КПД надо знать потери мощности ΔP . Эти потери можно представить в виде суммы:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{доб}}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{мех}}$ - механические потери на трение вала в подшипниках, щёток о коллектор, якоря о воздух и вентилятор; эти потери зависят от частоты вращения якоря $n_{\text{я}}$;

$\Delta P_{\text{маг}}$ - магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в сердечнике и зубцах якоря; зависят от величины индукции B и частоты $n_{\text{я}}$;

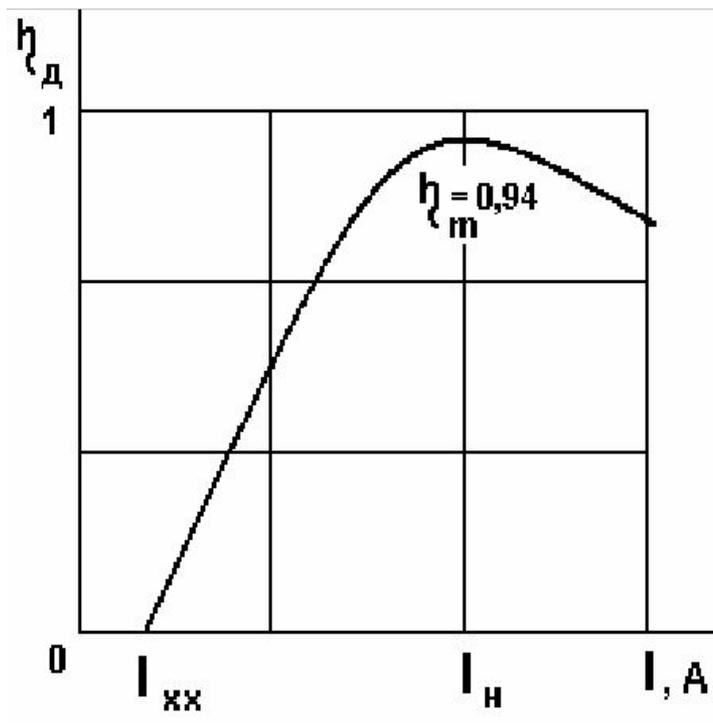
ΔP_m - потери в меди проводников обмоток якоря и полюсов,

пропорциональны квадрату тока;

$\Delta P_{щ}$ - потери в щётках, возникают в переходном сопротивлении между графитовыми щётками и вращающимся коллектором из медных пластин, пропорциональны квадрату тока;

$\Delta P_{доб}$ - добавочные потери, зависят от искажения магнитного потока в якоре, от вихревых токов в полюсах, от неравномерности распределения токов в проводниках обмотки якоря, пропорциональны току.

33. Кривая зависимости КПД тягового двигателя от тока

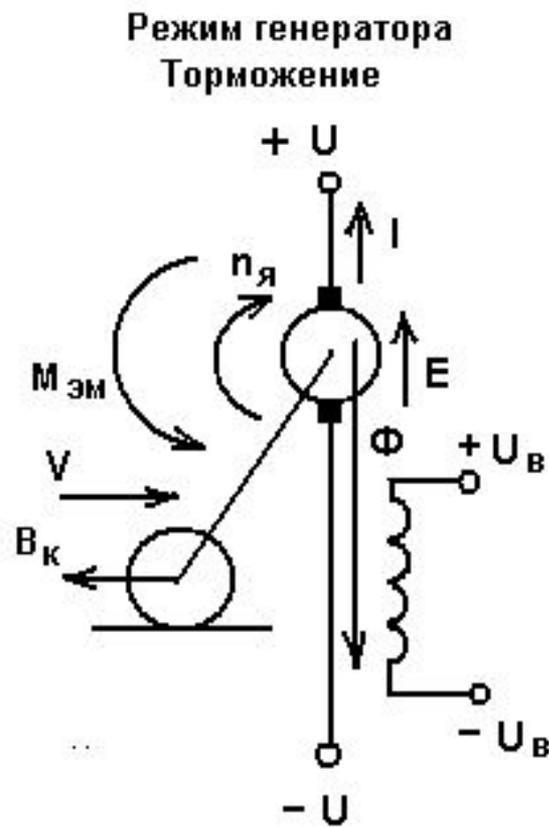
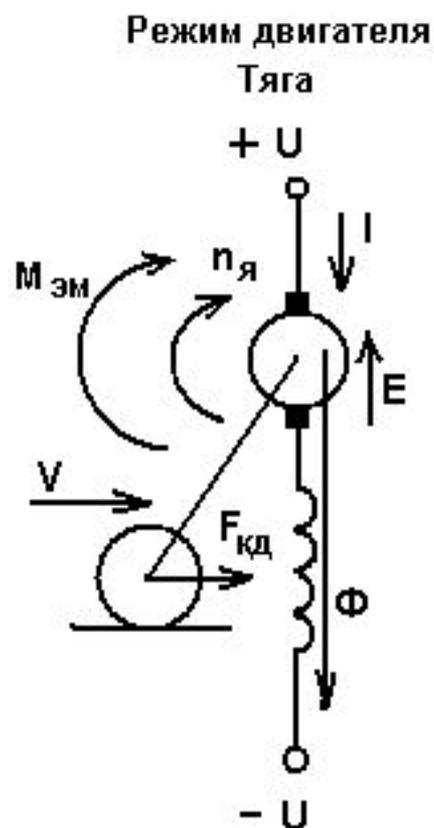


На холостом ходе КПД равен нулю, при номинальном токе достигает максимума, а при больших токах снижается вследствие роста электрических потерь.

В условиях эксплуатации КПД двигателей и электровоза в целом много ниже номинального значения, что объясняется неравномерной нагрузкой локомотива в процессе движения.

34. Работа электрической машины постоянного тока в режимах двигателя (тяга) и генератора (торможение)

Тяговый электродвигатель (ТЭД), как машину постоянного тока, можно переводить из режима двигателя в режим генератора, для чего питание обмотки возбуждения переключают на отдельный источник. При этом электромагнитный момент и ток меняют направление, а машина вырабатывает электроэнергию.



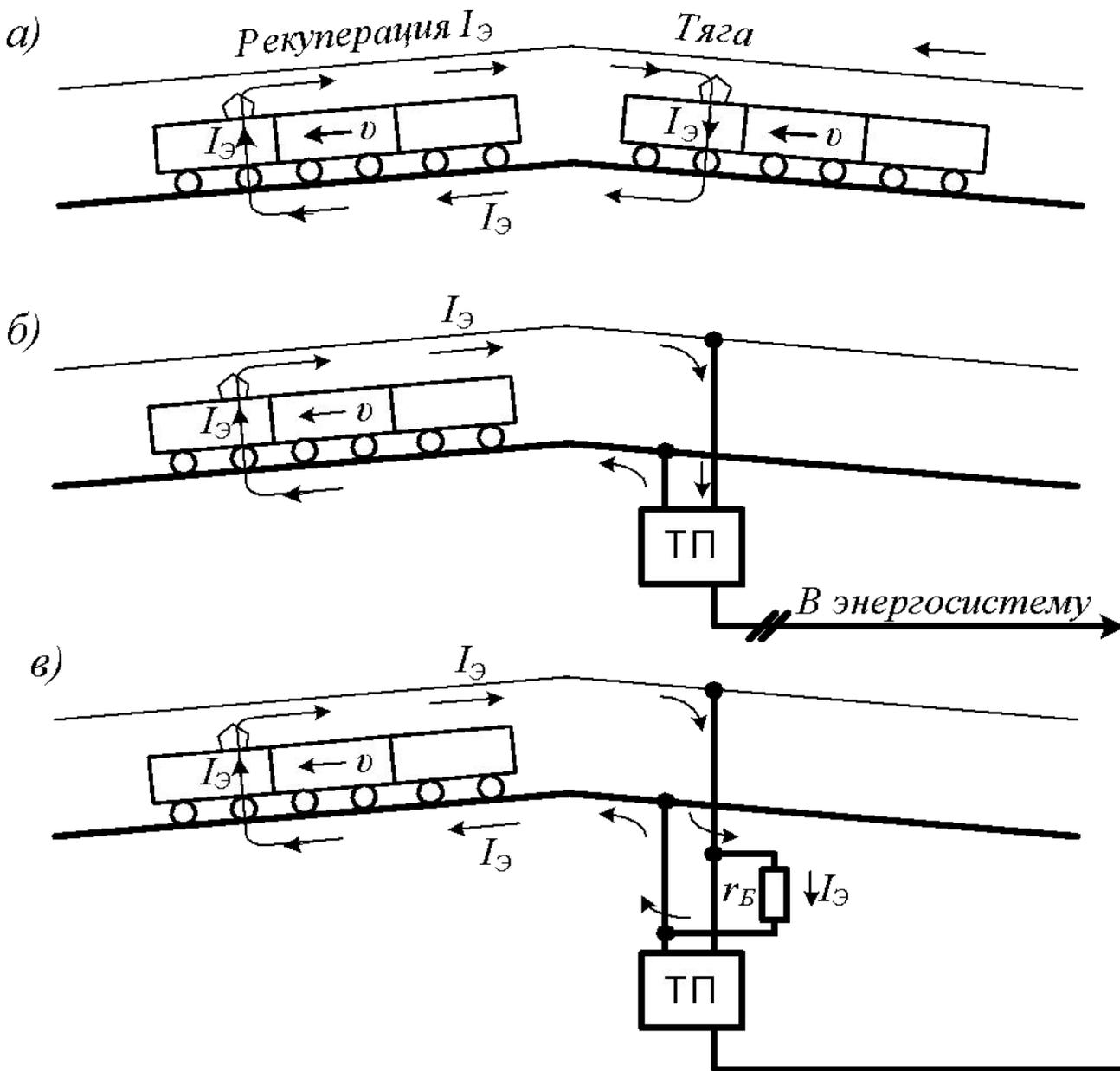


Рисунок 35 –
 Схемы передачи
 электрической
 энергии при
 рекуперативном
 торможении:
а – на электровоз,
 работающий в
 режиме тяги; *б* –
 возврат энергии
 через тяговую
 подстанцию в
 первичную
 энергосистему; *в* –
 на балластный
 резистор

36. Тяговая характеристика электровоза постоянного тока

Тяговая характеристика – это зависимость силы тяги F_x от скорости V . Для её построения нужны электромеханические характеристики ТЭД, приведенные к ободу колеса $F_{x0}(I)$ и $V(I)$.

Последовательность расчёта и построения тяговой характеристики.

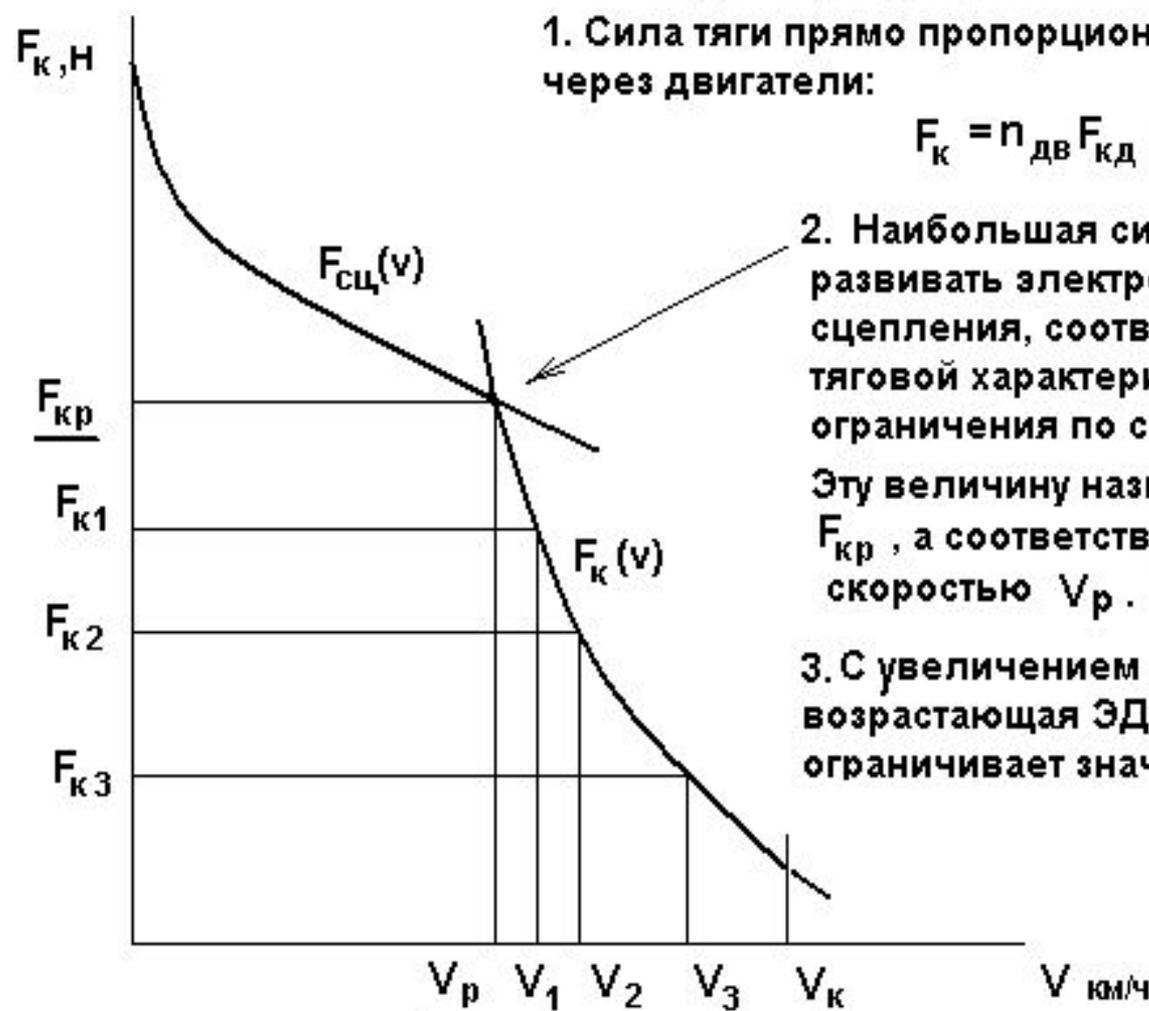
1. Задавая ряд значений тока I_1, I_2, I_3, \dots , находят значения скорости V_1, V_2, V_3, \dots и силы тяги от одного двигателя $F_{x01}, F_{x02}, F_{x03}, \dots$ (См. рис. 27).
2. Рассчитывают силу тяги электровоза $F_{x1} = n_{об} F_{x01}, F_{x2}, F_{x3}$ и т.д.
3. Строят естественную часть тяговой характеристики и осей V и F_x .
4. Рассчитывают и строят линию ограничения силы тяги по сцеплению как $F_{сц} = 1000 G_{сц} \psi_x$, где $G_{сц}$ - сцепной вес электровоза, кН, ψ_x - коэффициент сцепления колёс с рельсами, определяемый по эмпирической формуле.
5. Отмечают ограничение по конструкционной скорости V_x .
6. Отмечают точку пересечения кривых F_x и $F_{сц}$, которая определяет расчётные скорость V_p и силу тяги F_{xp} .

37. Вид тяговой характеристики ЭПС постоянного тока

Выводы к разделу "Тяговая характеристика ЭПС"

1. Сила тяги прямо пропорциональна току, протекающему через двигатели:

$$F_k = n_{\text{дв}} F_{\text{кд}} = n_{\text{дв}} C_F \Phi I \eta_F$$



2. Наибольшая сила тяги, которую может развивать электровоз по условиям сцепления, соответствует точке пересечения тяговой характеристики $F_k(v)$ с кривой ограничения по сцеплению $F_{\text{сц}}(v)$.

Эту величину называют расчётной силой тяги $F_{\text{кр}}$, а соответствующую скорость - расчётной скоростью V_p .

3. С увеличением скорости сила тяги снижается, т.к. возрастающая ЭДС вращения E тяговых двигателей ограничивает значение тока.

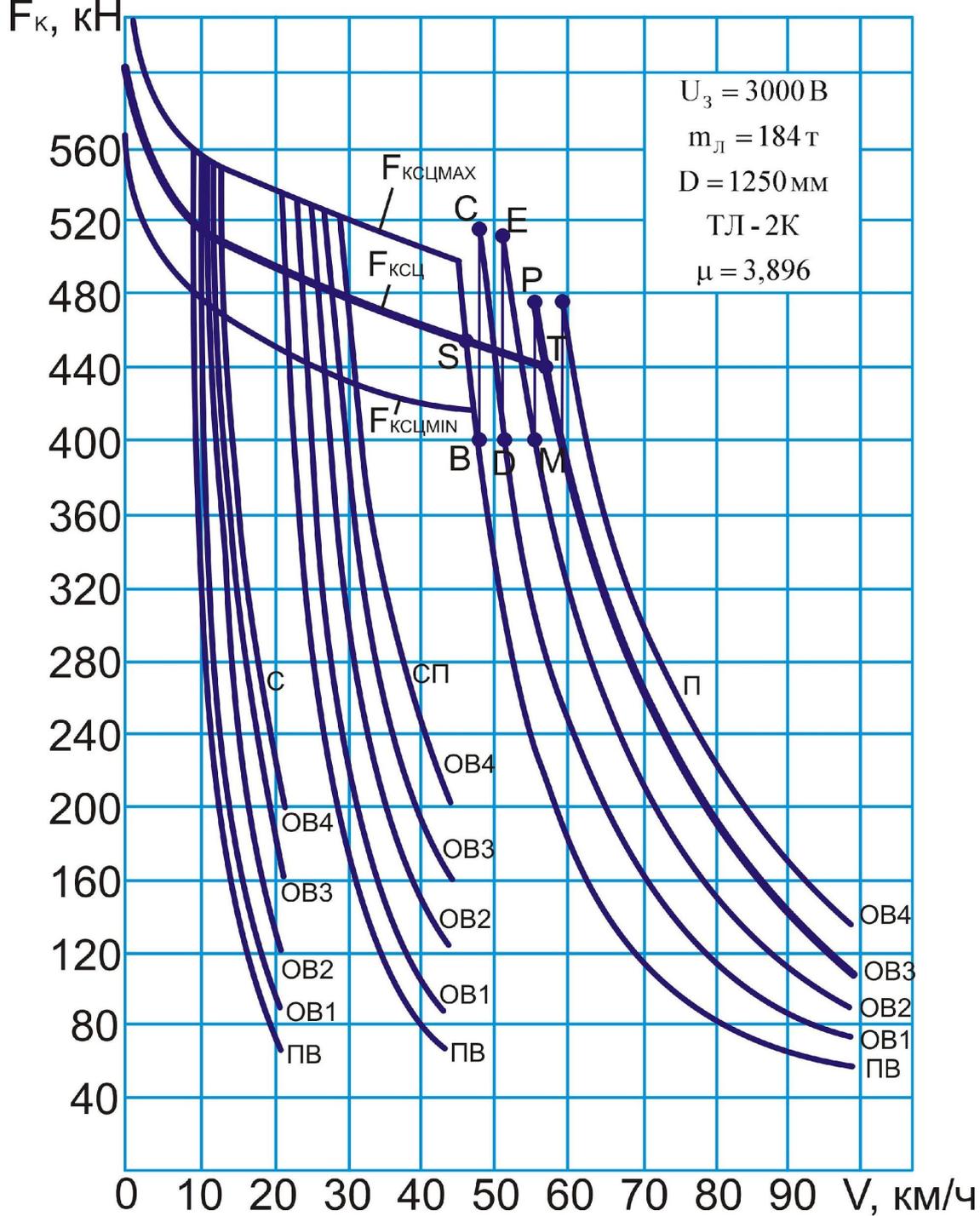
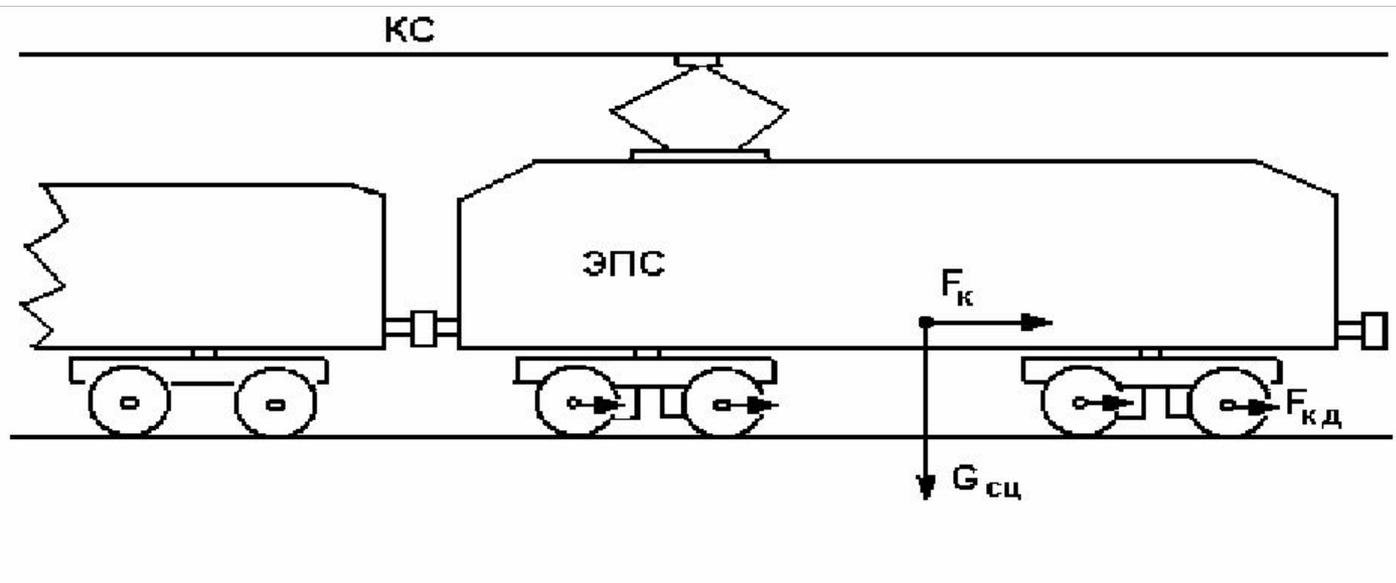


Рисунок 38 -
 Тяговые
 характеристики
 электровоза
 ВЛ10

39. Сила тяги и сила сцепления электровоза



Сила тяги всех колёсных пар суммируется и образует силу тяги электровоза

$$F_k = n_{\text{дв}} F_{\text{кд}}, \text{ Н}$$

где $n_{\text{дв}}$ - число двигателей локомотива,

$F_{\text{кд}}$ - сила тяги от одного двигателя.

Кроме неё действует сцепной вес

$$G_{\text{сц}} = m_n g, \text{ кН},$$

где m_n - масса локомотива, т.

Условием нормальной тяги является выражение

$$F_k \leq F_{\text{сц}} = 1000 \cdot G_{\text{сц}} \psi_k,$$

где $F_{\text{сц}}$ - сила сцепления колёс с рельсами,

ψ_k - коэффициент сцепления.

40. Коэффициент сцепления рассчитывают по эмпирической формуле, например, для электровозов ВЛ10, ВЛ11,

$$\psi_x = 0,28 + \frac{3}{50 + 20 \cdot V} - 0,0007 \cdot V,$$

где V - скорость в км/ч.

Величина коэффициента сцепления зависит от следующих факторов:

- 1. От состояния поверхностей колёс и рельсов, которое зависит от загрязнения поверхностей, попадания масла, снега, дождя. Лучшее средство противодействия – подсыпка песка.**
- 2. От неравномерности нагрузки от колёсных пар на рельсы, которая возникает при движении, при колебаниях локомотива вследствие прогиба рельсов и ударов на стыках.**
- 3. От расхождения характеристик ТЭД и диаметров колёсных пар, например, после ремонта. При этом колёсные пары развивают различные силы тяги.**
- 4. От проскальзывания колёс, связанного с различием диаметров качения колёс одной колёсной пары, особенно при движении в кривых.**

Результаты расчёта и экспериментального определения коэффициента сцепления приведены в следующем слайде.

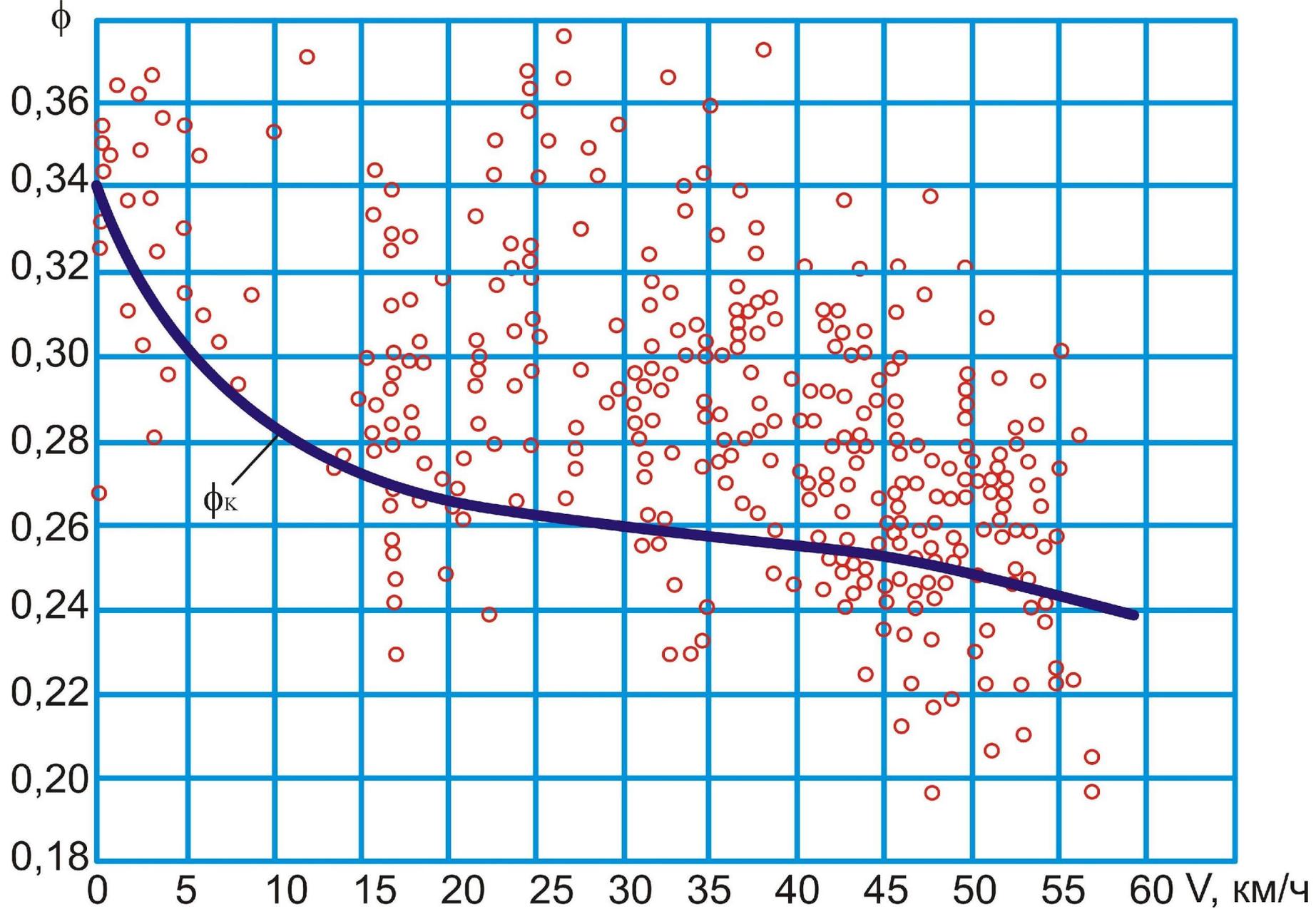


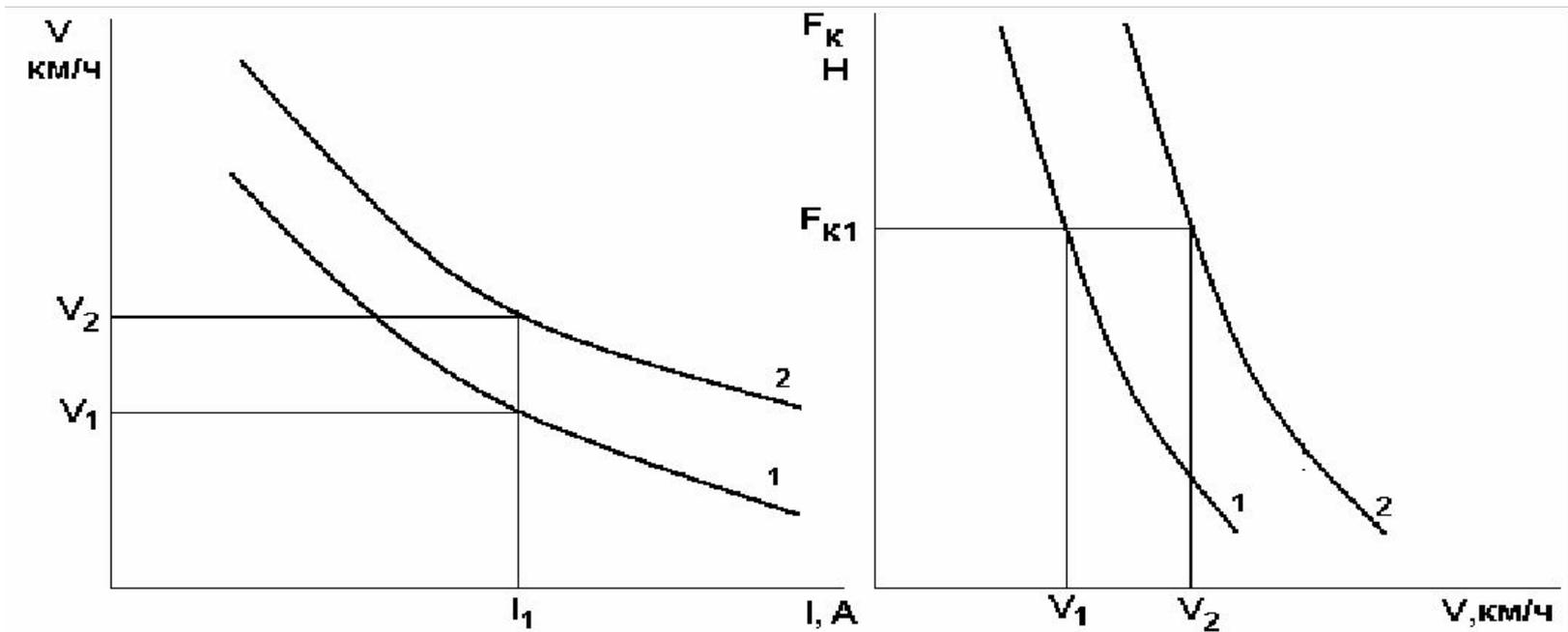
Рисунок 41 - Результаты экспериментального определения коэффициента сцепления

41. Тяговые характеристики ЭПС пост. тока при различных видах возбуждения



43. Регулирование скорости ЭПС постоянного тока

При работе тягового двигателя или электровоза каждому значению тока или силы тяги соответствует определённая скорость. В условиях эксплуатации необходимо получать различные скорости при любой силе тяги, т.е. регулировать скорость. Для этого недостаточно иметь одну тяговую характеристику, а требуется их семейство.



Такое семейство можно получить, изменяя параметры уравнения для скорости $V = \frac{U - Ir}{C_v \Phi}$. Аргументом здесь является ток I , а параметры -

это напряжение U , сопротивление r и магнитный поток Φ . Отсюда - три способа регулирования скорости:

1. Изменением напряжения U , подводимого к двигателям;
2. Изменением сопротивления r в цепи тягового двигателя;
3. Изменением магнитного потока Φ в двигателе.

44. Регулирование скорости изменением напряжения

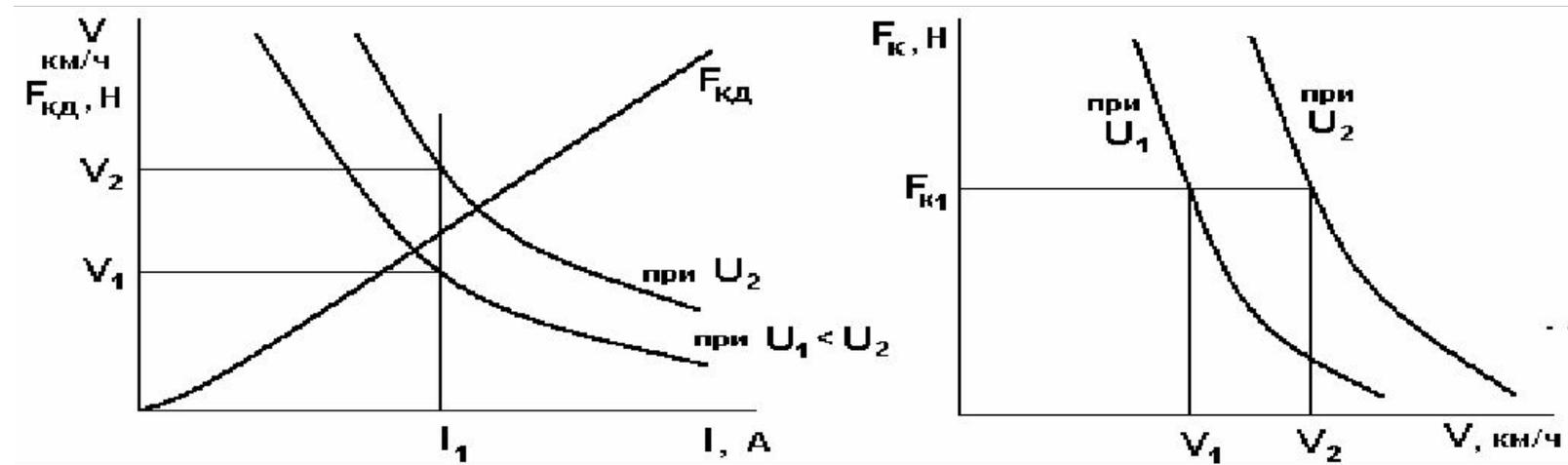
При напряжении U_1 скорость $V_1 = \frac{U_1 - Ir}{C_v \Phi}$, при напряжении U_2

скорость $V_2 = \frac{U_2 - Ir}{C_v \Phi}$. При равных значениях токов и магнитных потоков

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{U_2 - Ir}{U_1 - Ir}$. Учитывая, что $Ir \ll U$, получим $\frac{V_2}{V_1} \approx \frac{U_2}{U_1}$, т.е.

скорость движения при одинаковом токе пропорциональна подведенному напряжению. Зависимость силы тяги двигателя определяется одним и тем же выражением $F_{кд} = C_F \Phi I \eta_F$.

Имея скоростные характеристики при разных напряжениях, можно построить соответствующие тяговые характеристики.



Изменением напряжения, подаваемого на тяговые двигатели, можно получить множество тяговых характеристик электровоза. На ЭПС постоянного тока напряжение на каждом двигателе можно менять, включая разное их число под напряжение контактной сети (см. слайд).

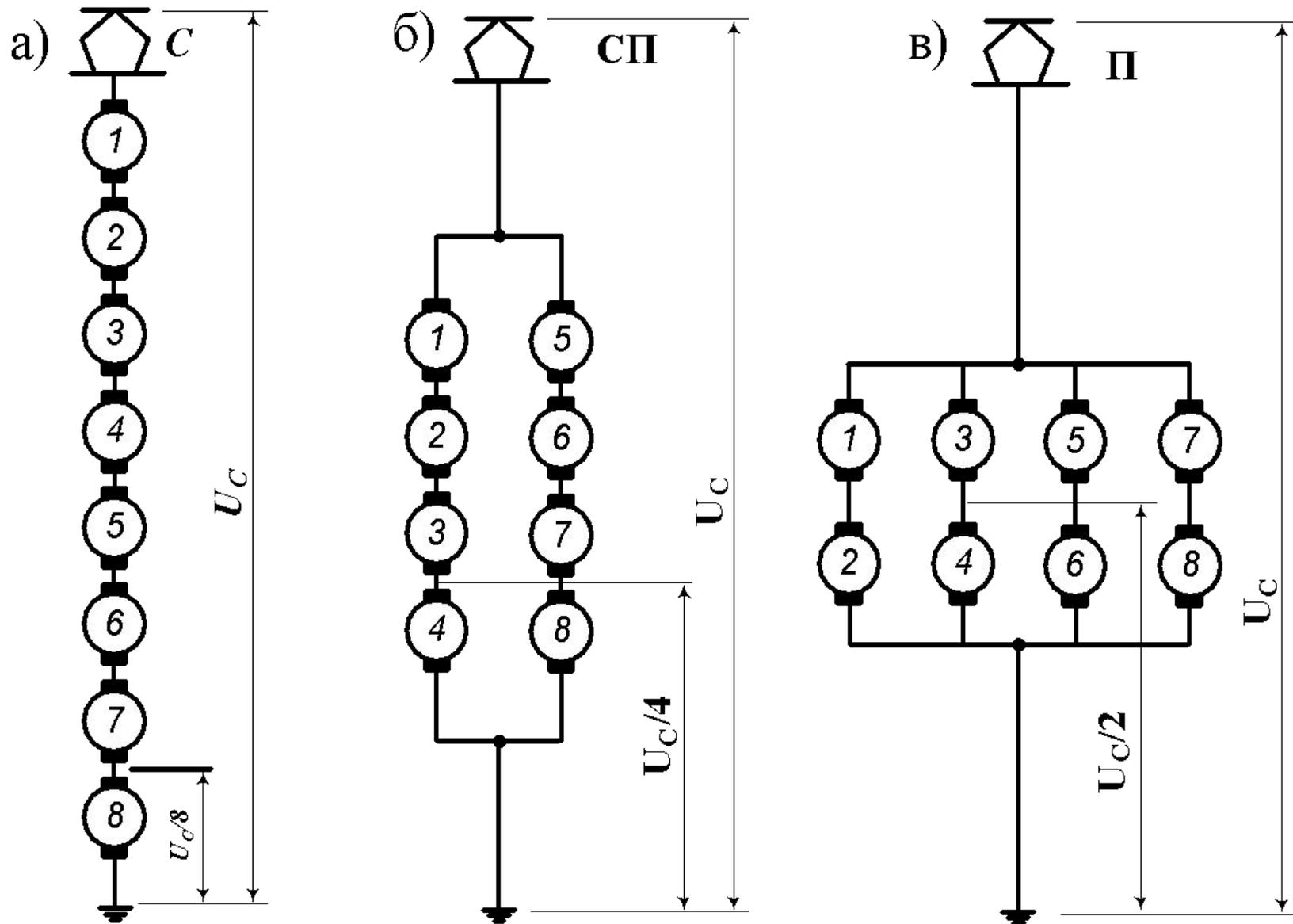
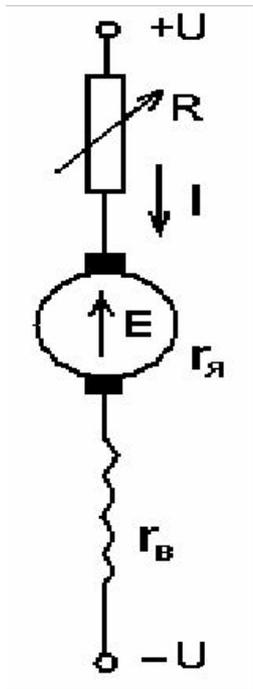


Рисунок 45 – Способы включения тяговых электродвигателей на восьмиосных электровозах при последовательном соединении (а), последовательно-параллельном (б) и параллельном (в)

46. Регулирование скорости изменением сопротивления



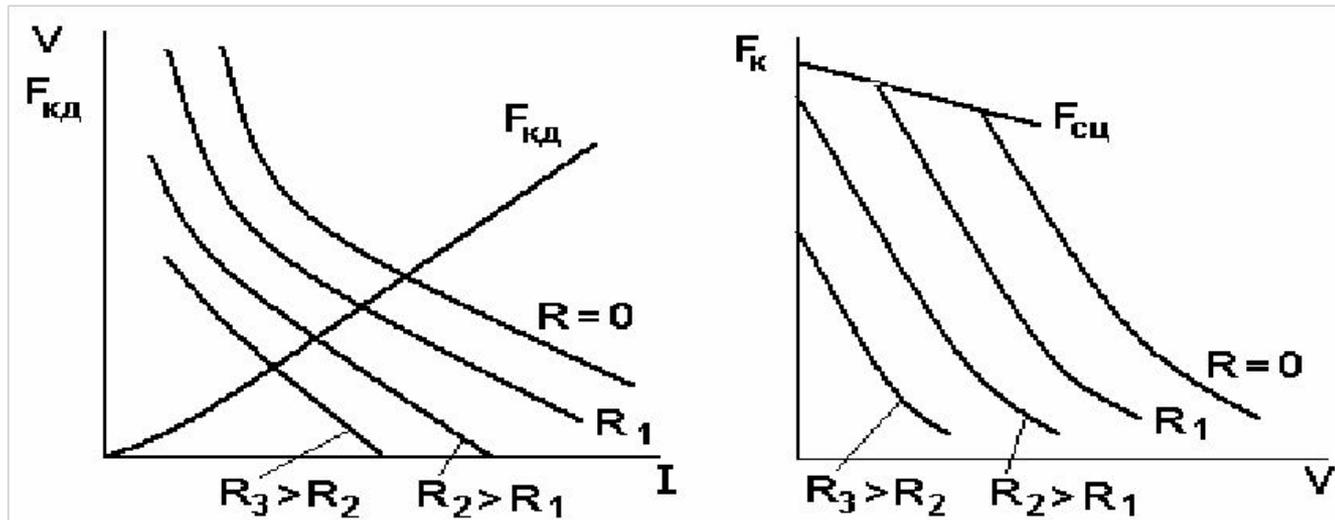
При включении резистора R последовательно в цепь тягового двигателя скорость поезда определится по формуле

$$V_R = \frac{U - I(r + R)}{C_v \Phi}, \text{ где } r - \text{сопротивление обмоток}$$

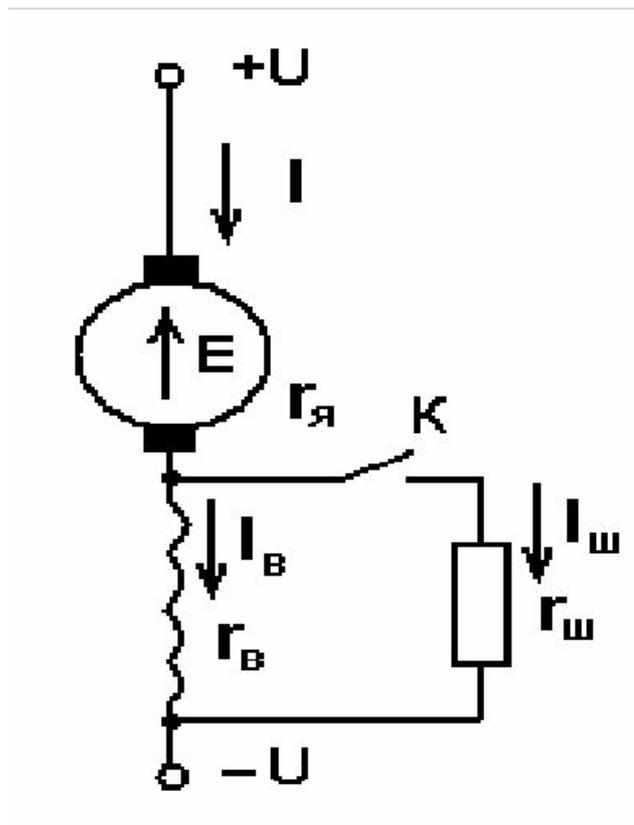
двигателя. Из формулы видно, что с ростом сопротивления числитель, а следовательно и скорость, уменьшаются.

Способ связан с потерями энергии в реостате и применяется только при пуске ЭПС.

Изменяя сопротивление в цепи двигателя, можно получить ряд скоростных характеристик двигателя и тяговых характеристик электровоза.



47. Регулирование скорости изменением магнитного потока



Обмотку возбуждения двигателя шунтируют специальным резистором.

При отключённом контакторе $I = I_{\epsilon}$. Это режим полного возбуждения ПВ.

При включении контактора $I = I_{\epsilon} + I_{ш}$.

Ток обмотки якоря I делится на две части: ток возбуждения I_{ϵ} и ток шунта $I_{ш}$.

Это режим ослабленного возбуждения ОВ.

Отношение тока возбуждения к току якоря называют коэффициентом ослабления

возбуждения $\beta = \frac{I_{\epsilon}}{I}$. Коэффициент β всегда

меньше 1.

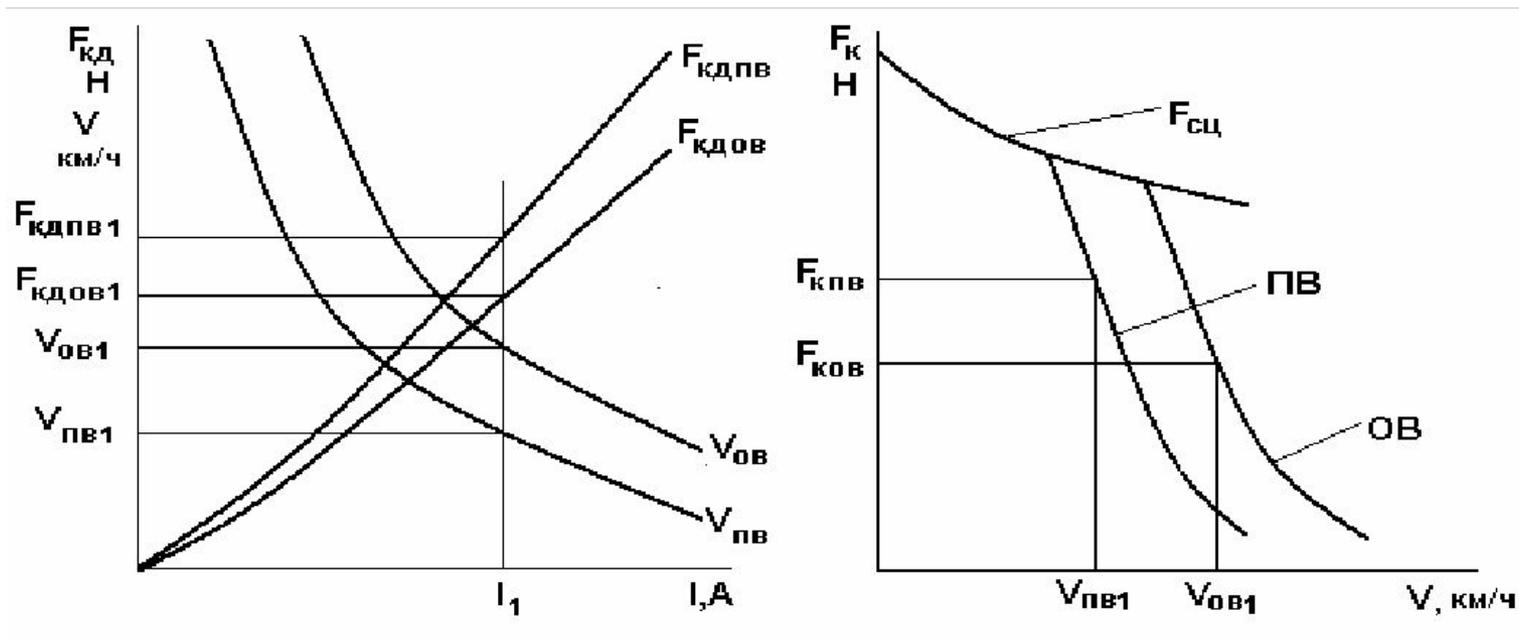
В режиме ПВ скорость равна $V_{пв} = \frac{U - I(r_a + r_{\epsilon})}{C_v \Phi_{пв}}$, а сила тяги равна

$$F_{кдпв} = C_F \Phi_{пв} I \eta_F.$$

В режиме ОВ скорость равна $V_{ов} = \frac{U - I(r_a + \beta r_{\epsilon})}{C_v \Phi_{ов}}$, а сила тяги равна

$$F_{кдоэ} = C_F \Phi_{ов} I \eta_F.$$

48. По приведенным выражениям можно построить электромеханические характеристики тяговых двигателей при ПВ и ОВ (график слева).



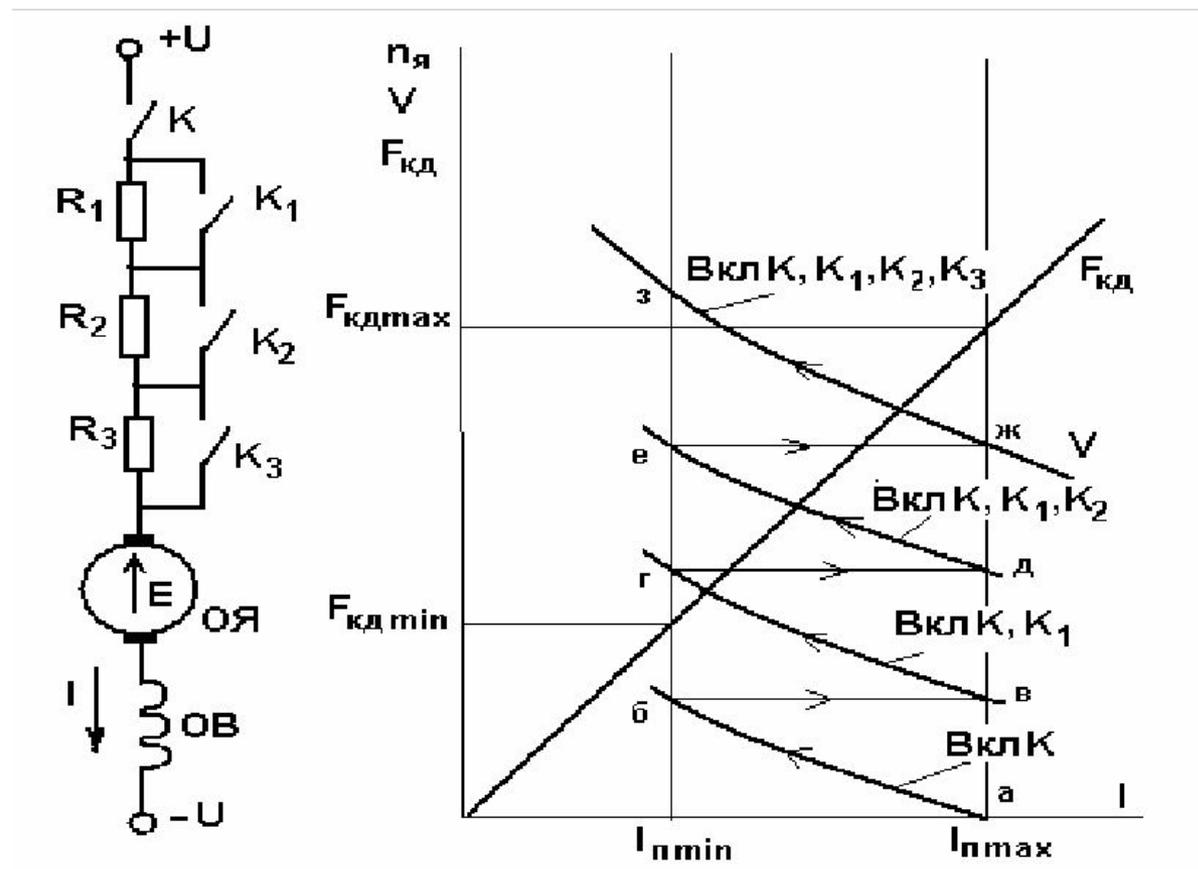
Из сравнения кривых видно, что при некотором значении тока I_1 ослабление магнитного потока ведет к росту скорости и снижению силы тяги от одного двигателя.

Имея электромеханические характеристики ТЭД, можно построить тяговые характеристики электровоза при ПВ и ОВ (график справа).

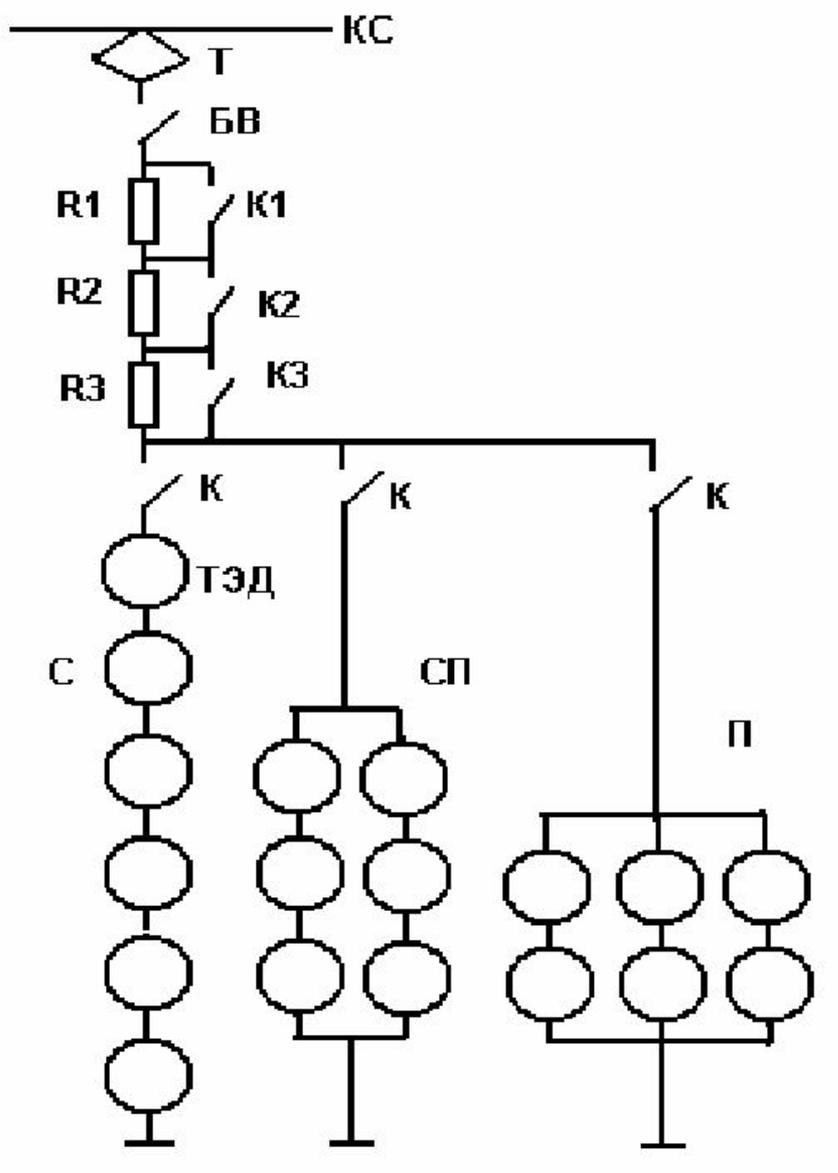
Таким образом, изменение магнитного потока двигателей позволяет получить ряд электромеханических характеристик ТЭД и тяговых характеристик ЭПС. На практике применяют до пяти ступеней ослабления возбуждения при каждом соединении ТЭД (см. тяговую характеристику электровоза постоянного тока).

49. Ступенчатый реостатный пуск

В цепь ТЭД включают несколько резисторов и затем последовательно выводят их контакторами. Резисторы рассчитывают так, чтобы не допустить значительного уменьшения тока и силы тяги а также сильных толчков силы тяги. Разгон идёт по характеристикам аб, вг, де, жз. Величину $I_{н\max}$ выбирают так, чтобы сила тяги $F_{кд\max}$ не превосходила силы сцепления колёс с рельсами $F_{ксы}$. Для плавного пуска ограничивают разность токов, вводя коэффициент неравномерности пуска $K_n = (I_{н\max} - I_{н\min}) / 2I_{н\max}$, который принимают в пределах 0,04 – 0,08.



50. Пуск ЭПС постоянного тока



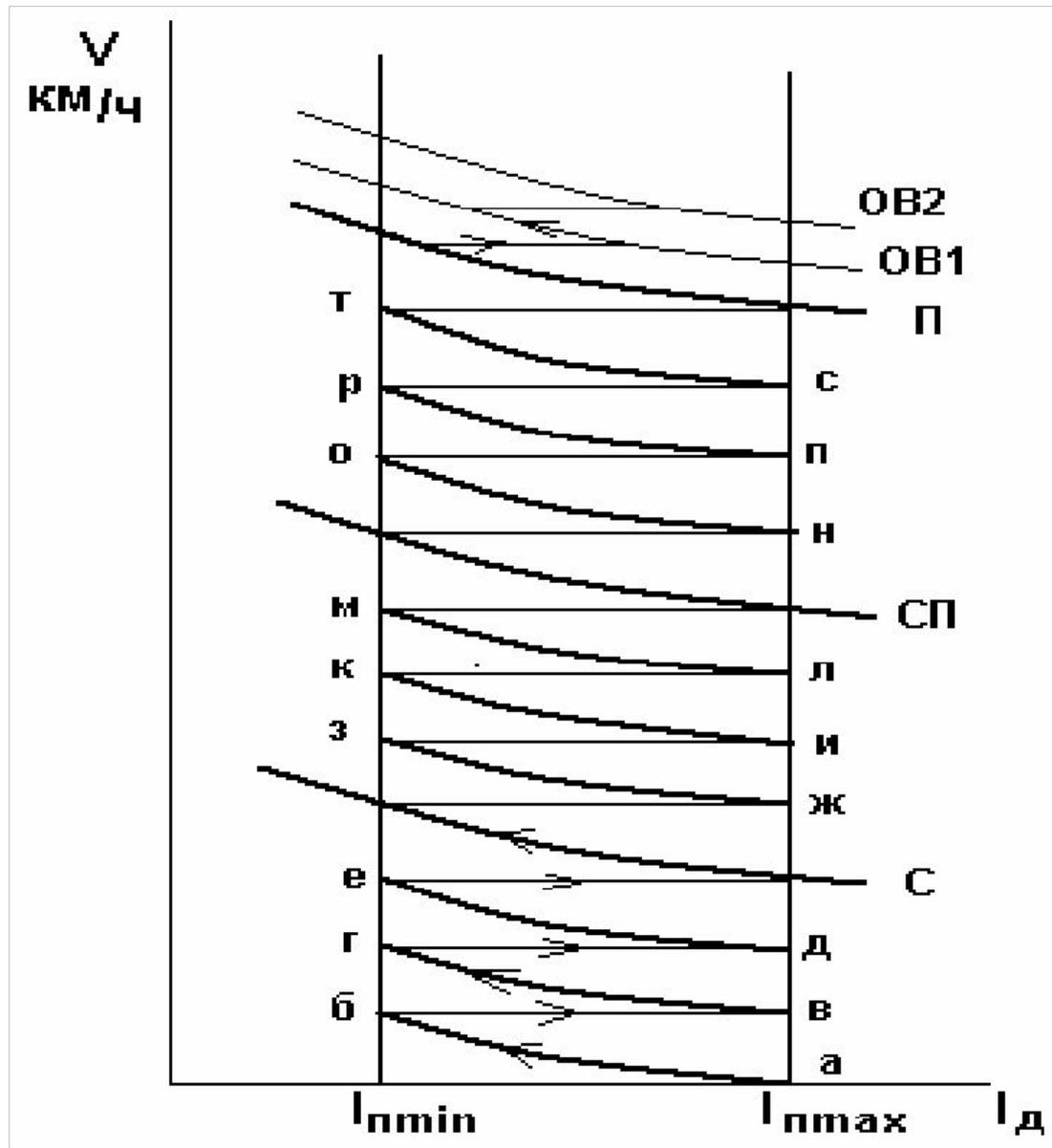
Применяют ступенчатый реостатный пуск.

1. Собирают схему последовательного соединения С. Выводя резисторы контакторами К1,К2,К3, разгоняют ЭПС до естественной характеристики С по переходным характеристикам аб, вг, де (см. следующий слайд).

2. Собирают схему СП с резисторами. Выводя их последовательно, разгоняют ЭПС до естественной характеристики СП по переходным характеристикам жз, ик, лм.

3. Собирают схему П с резисторами. Выводя их последовательно, разгоняют ЭПС до естественной характеристики П по переходным характеристикам но, пр, ст.

51. Пусковая диаграмма ЭПС постоянного тока.



52. Характеристики ЭПС переменного тока

Силовая схема ЭПС переменного тока была рассмотрена ранее (см. слайд 14).

Выпрямленное напряжение на тяговых двигателях равно

$$U_d = U_{d0} - I_d (R_s + r) - \Delta U_v,$$

где U_{d0} - выпрямленное напряжение при холостом ходе,

I_d - выпрямленный ток,

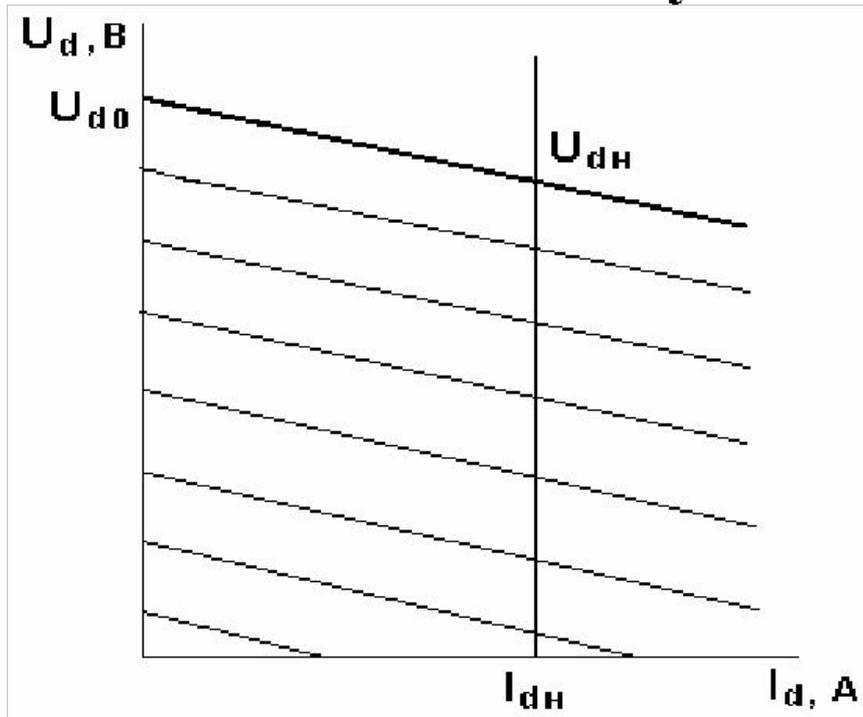
R_s - эквивалентное сопротивление преобразовательной установки, r - сопротивление обмоток двигателей,

ΔU_v - падение напряжения в вентилях .

Эквивалентное сопротивление зависит от индуктивного сопротивления трансформатора и дросселя и активного сопротивления всех элементов установки.

Зная параметры выпрямительной установки, можно рассчитать по этой формуле зависимость выпрямленного напряжения от тока. Такая зависимость $U_d = f(I_d)$ называется внешней характеристикой.

53. Внешние характеристики преобразовательной установки



Каждая характеристика соответствует определённому положению переключателя, т.е. числу витков обмотки трансформатора. Внешнюю характеристику, соответствующую высшей ступени регулирования, называют номинальной. На ней можно отметить точку номинального напряжения $U_{дн}$ при номинальном токе и точку напряжения при холостом ходе $U_{д0}$.

Скорость движения ЭПС регулируют двумя способами: изменением напряжения и ослаблением возбуждения. По мере роста скорости переключают отпайки трансформатора и переходят с одной характеристики на другую. Для дальнейшего увеличения скорости используют ослабление возбуждения.

По электрохимическим характеристикам тяговых двигателей $F_{кд} = f(I)$ и $V = f(I)$ строят тяговые характеристики ЭПС $F_k = f(I)$, см. слайд 54.

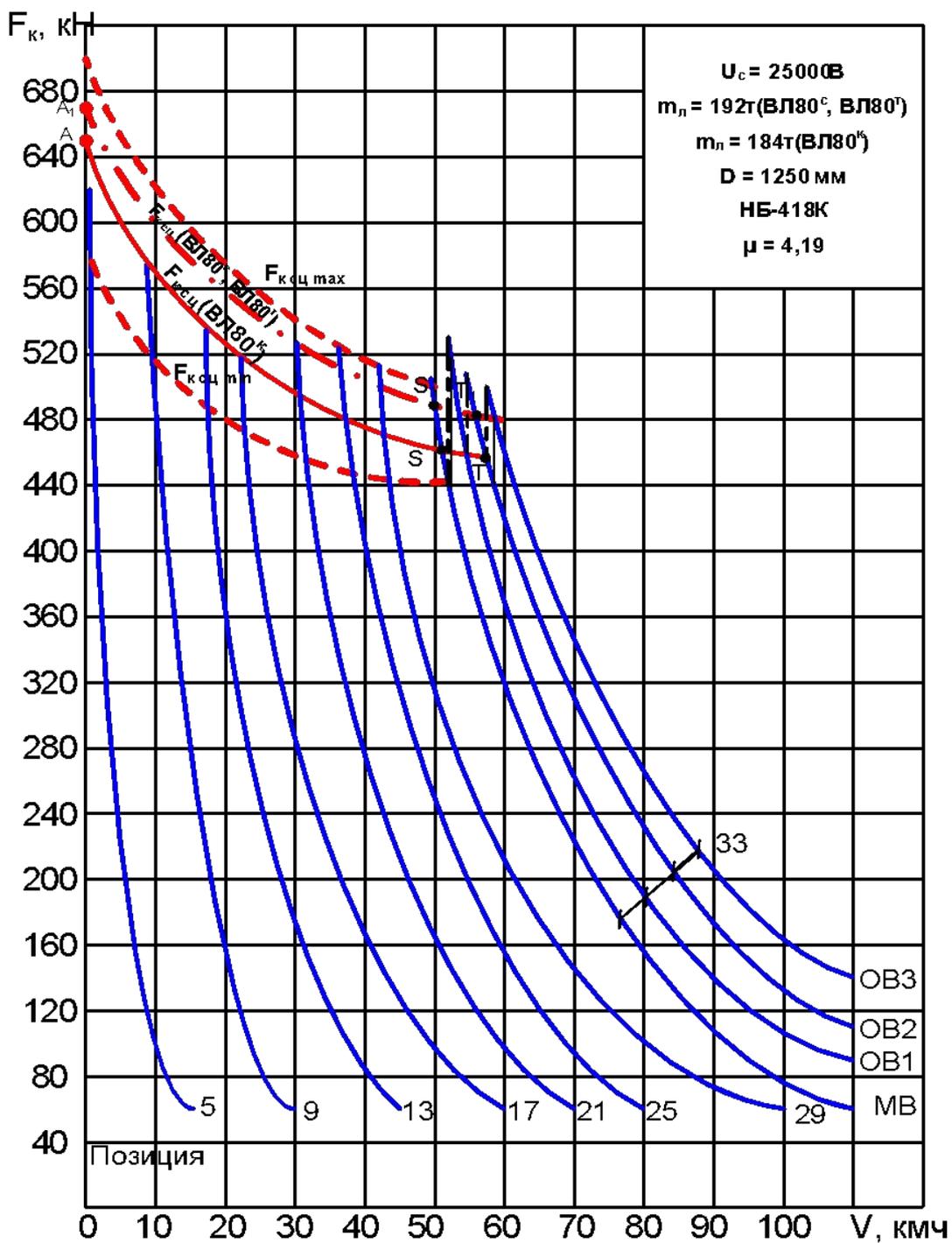


Рисунок 54 – Тяговые характеристики электровозов ВЛ80^С, ВЛ80^Т, ВЛ80^К

55. Тяговые расчёты

Выполняют как при проектировании, так и при эксплуатации ж.д. На основе тяговых расчётов составляют графики движения поездов, определяют пропускную способность линий, определяют мощность тяговых подстанций и сечение проводов контактной сети.

Основные задачи тяговых расчётов:

1. Расчёт сил, действующих на поезд.
2. Определение массы состава или выбор типа локомотива при заданной массе.
3. Решение тормозных задач
4. Построение кривых движения поезда $V(s)$ и $t(s)$.
5. Построение кривой потребляемого тока и расчёт расхода электроэнергии на перемещение поезда.

Общие сведения о движении поезда.

Движение поезда по рельсам состоит из полезного перемещения вдоль оси пути и различных колебательных движений, которые накладываются на полезное перемещение.

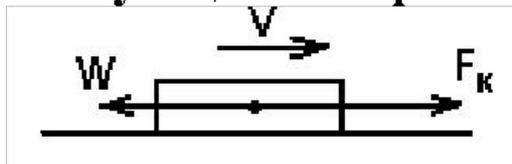
Допущения, принимаемые при выполнении тяговых расчётов.

1. Рассматривают только полезное перемещение вдоль оси пути.
2. Расчёты и выводы делают в предположении, что поезд – твёрдое тело с массой, сосредоточенной в центре масс.

56. Режимы движения поезда

Режим тяги.

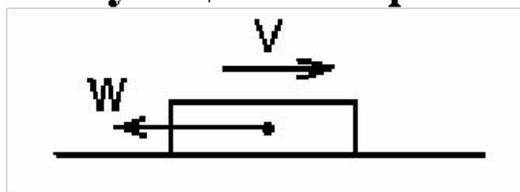
Поезд движется под действием силы тяги F_K и силы сопротивления движению W . Равнодействующая сила равна $F_D = F_K - W$.



Режим выбега.

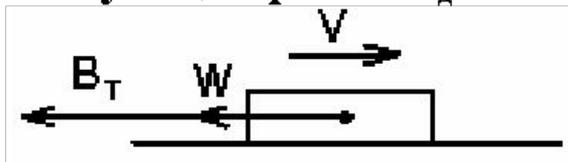
На поезд действует сила сопротивления движению W .

Равнодействующая сила равна $F_D = -W$.



Режим торможения.

На поезд действуют сила сопротивления движению W и сила торможения B_T . Равнодействующая равна $F_D = -W - B_T$.



Силы тяги и торможения являются управляемыми, а сила сопротивления движению – неуправляемая, зависящая от свойств самого поезда и условий его движения.

57. Уравнение движения поезда

Характер движения поезда описывается зависимостями $V(S)$ и $t(S)$, которые называют кривыми движения. Их расчёт выполняют с помощью уравнения движения поезда.

В соответствии со вторым законом Ньютона

$$m \frac{dV}{dt} = F, \quad (1)$$

где m - масса тела, кг; $\frac{dV}{dt}$ - ускорение, м/с²; F - сила, Н

Применительно к поезду

$$(1 + \gamma)m \frac{dV}{dt} = \xi F_{\circ}, \quad (2)$$

где $(1 + \gamma)m$ - приведённая масса поезда,

$(1 + \gamma)$ - коэффициент инерции вращающихся частей,

ξ - постоянный коэффициент, зависящий от системы измерений,

F_{\circ} - равнодействующая приложенных к поезду сил.

Выразим массу поезда через ускорение g и вес поезда $P + Q$:

$$m = \frac{P + Q}{g}$$

и подставим в (2):

$$(1 + \gamma) \frac{(P + Q)}{g} \frac{dV}{dt} = \xi F_{\circ}$$

58.

Обозначая $\frac{g\xi}{1+\gamma} = \zeta$, получим уравнение движения поезда:

$$(P + Q) \frac{dV}{dt} = \zeta F_{\delta} \quad (3)$$

При выполнении тяговых расчётов используют понятие удельной силы, приходящейся на единицу веса поезда:

$$f_{\delta} = \frac{F_{\delta}}{P + Q} \quad (4)$$

При этом уравнение движения поезда получает вид:

$$\frac{dV}{dt} = \zeta f_{\delta} \quad (5)$$

Уравнение движения поезда определяет связь между ускорением и равнодействующей силой и позволяет найти зависимости $V(s)$ и $t(s)$, т.е. построить кривые движения поезда.

Величина и направление равнодействующей силы определяют характер движения поезда.

59. Сопротивление движению поезда

При движении поезда на него действуют силы, препятствующие движению. Равнодействующая этих сил W называется общим сопротивлением движению. Она может быть представлена суммой сил:

$$W = W_0 + W_i + W_r + W_{mp},$$

где W_0 - основное сопротивление движению,

W_i - дополнительное сопротивление от уклона,

W_r - дополнительное сопротивление от кривизны пути в плане,

W_{mp} - дополнительное сопротивление при трогании с места.

Полным называют сопротивление движению, которое испытывает весь поезд, локомотив, состав; обозначение W , Н.

Удельным называют сопротивление, приходящееся на единицу веса поезда (локомотива, состава); обозначение w , Н/кН.

Рассчитав удельное сопротивление, например w_0 , можно найти полное как

$$W_0 = w_0 (P + Q),$$

где P, Q - вес локомотива и состава.

60. Основное сопротивление движению поезда

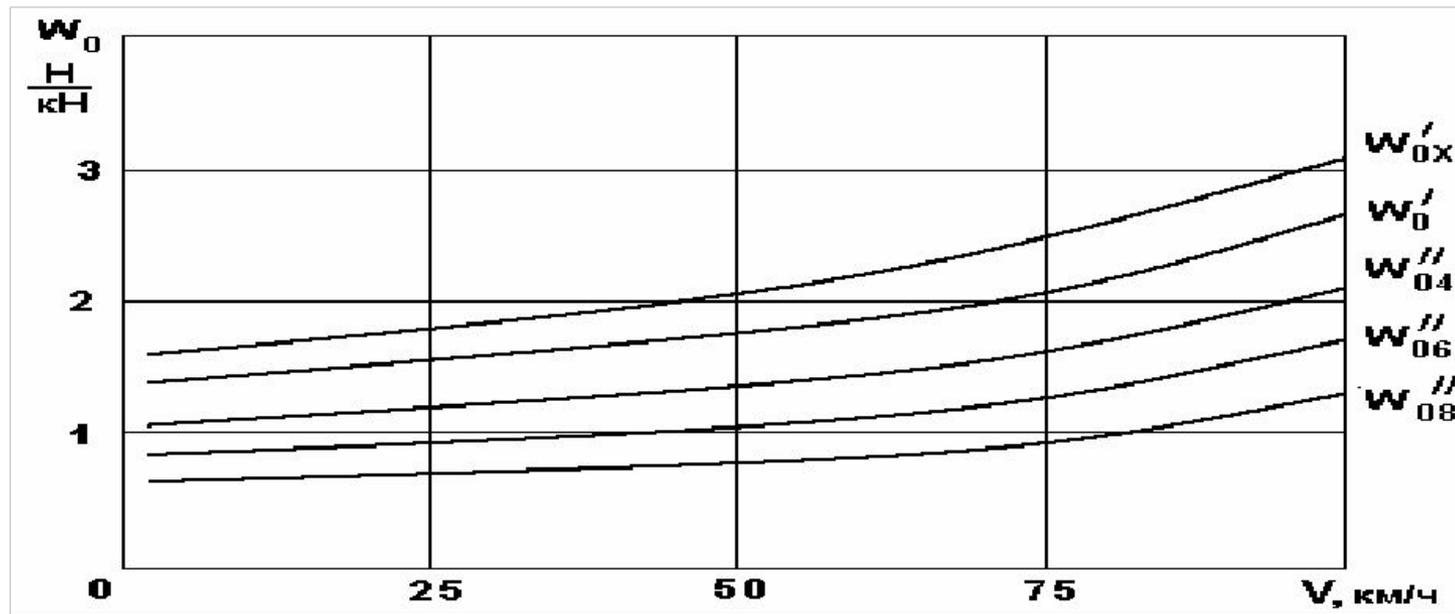
Основным называют сопротивление, которое возникает в результате трения подвижных частей поезда и воздействия воздушной среды при нормальных погодных условиях.

В общем виде уравнение зависимости удельного сопротивления от скорости имеет вид:

$$\omega_0 = a + bV + cV^2,$$

где ω_0 - основное сопротивление движению,

a, b, c - коэффициенты, зависящие от типа подвижного состава.

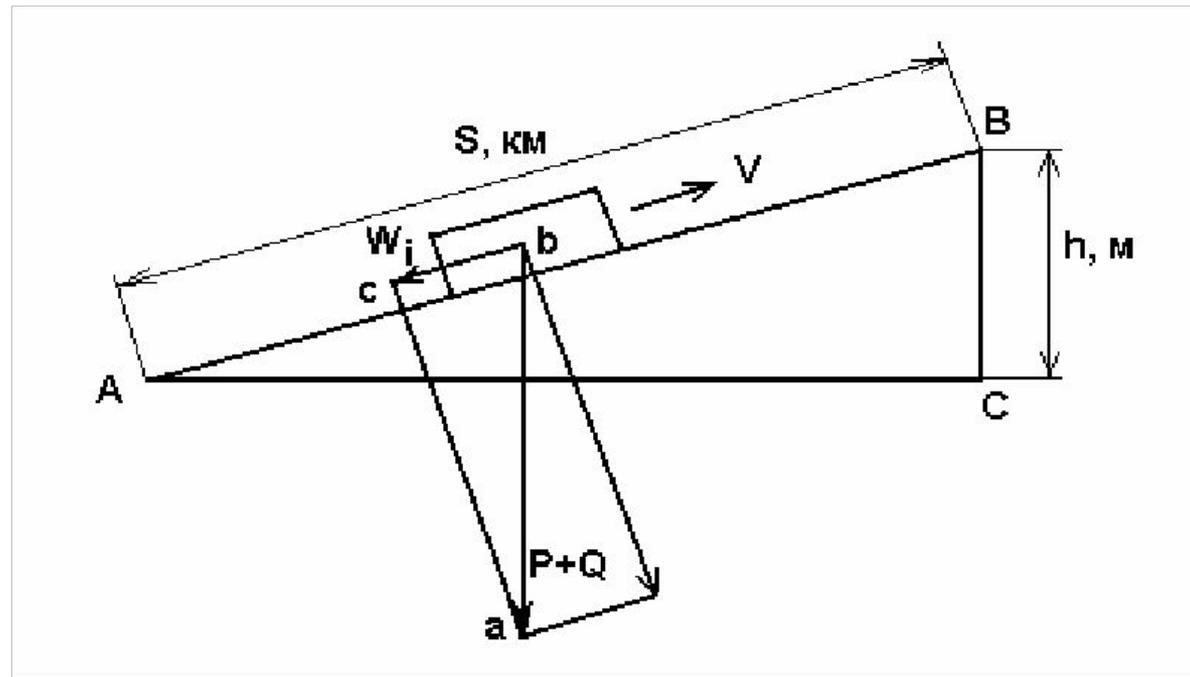


На графике приведены кривые для локомотива на холостом ходе и в режиме тяги w'_{0x} и w'_0 а также для вагонов w''_{04} , w''_{06} , w''_{08} .

61. Сопротивление движению от уклона

Уклон – понятие, обозначающее подъём или спуск. Величина уклона определяется отношением разности высот начала и конца отрезка к его

длине: $i = \frac{h}{S}$, м/км или ‰ (тысячные).



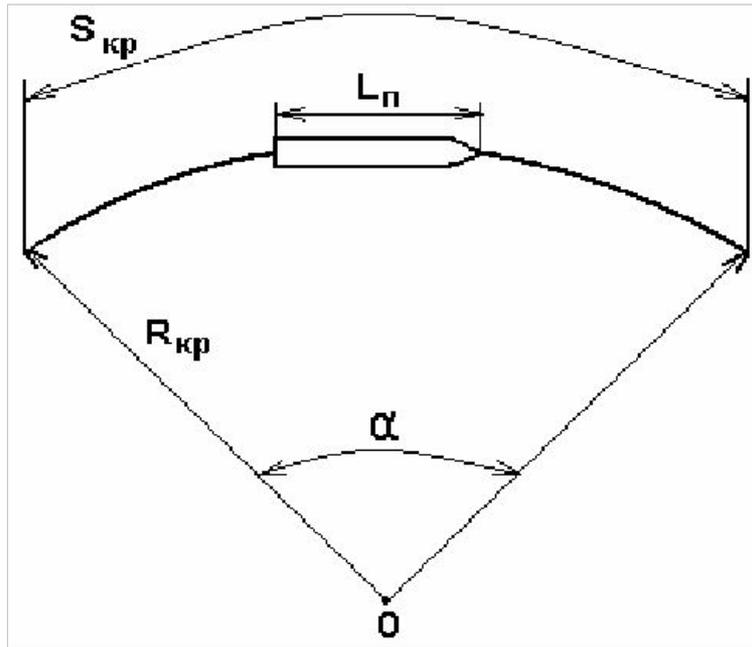
Сопротивление движению от уклона равно W_i , Н; его удельное

значение $w_i = \frac{W_i}{P+Q}$, Н/кН. Из подобия треугольников ABC и abc

следует, что $\frac{h}{S} = \frac{W_i}{P+Q}$, т.е. удельное сопротивление от уклона равно

самому уклону. При движении поезда по подъёму сопротивление движению от уклона действует против, а по спуску – в сторону движения.

62. Сопротивление движению от кривизны пути в плане



При проходе поездом кривых возникает дополнительное сопротивление движению, обусловленное трением бандажей колёсных пар о рельсы, продольным и поперечным скольжением колёс из-за разных расстояний, проходимых наружными и внутренними колёсами.

Удельное сопротивление рассчитывают по эмпирическим формулам: $w_r = \frac{700}{R_{кр}}$ или

$$w_r = 12,2 \frac{\alpha}{S_{кр}}, \text{ если } l_n \leq S_{кр};$$

$$w_r = \frac{700}{R_{кр}} \frac{S_{кр}}{l_n} \text{ или } w_r = 12,2 \frac{\alpha}{l_n}, \text{ если } l_n \geq S_{кр}.$$

Если кривая совпадает с уклоном, то её заменяют фиктивным уклоном i_ϕ и определяют приведённый уклон $i_n = i_d + i_\phi$.

63. Торможение на железных дорогах

Фрикционное (механическое)

С ручным приводом.

С пневматическим приводом.

Торможение использует силу тормозных колодок, прижимаемых к ободам колёс, или диска на оси колёсной пары.

С электромагнитным приводом.

Электромагнитное торможение основано на том, что электромагнит, находящийся на подвижном составе, прижимается к рельсам, и за счёт трения о них происходит торможение.

Механическое торможение является основным видом торможения.

Электрическое

Рекуперативное.

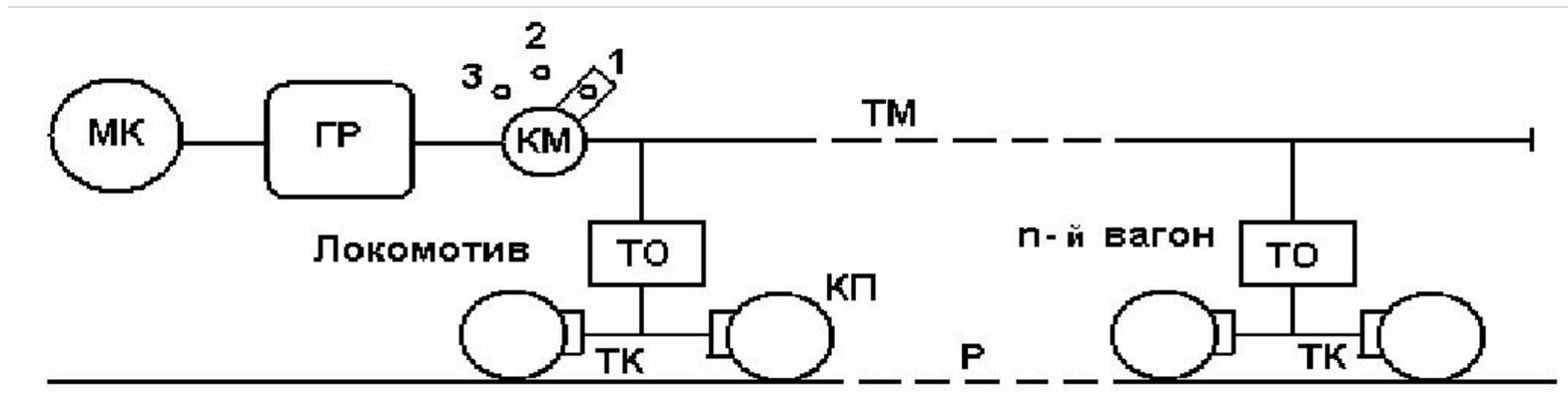
Реостатное.

При рекуперативном торможении энергия вырабатывается двигателями электровоза и возвращается в тяговую сеть.

При реостатном торможении энергия поглощается в резисторах на самом электровозе.

Все локомотивы и вагоны оборудуются автоматическими тормозами, которые должны гарантировать остановку поезда при экстренном торможении на расстоянии 1200 м.

64. Структурная схема автоматического тормоза



Компрессор МК нагнетает воздух в главный резервуар ГР. Кран машиниста КМ в положении 1 (отпуск и зарядка) соединяет ГР с тормозной магистралью ТМ, в которой поддерживается давление воздуха выше атмосферного. При таком давлении в магистрали тормоза не работают.

Положение 2 нейтральное, ГР отделён от ТМ, давление в ней сохраняется, тормоза не работают.

Для торможения поезда КМ устанавливают в положение 3, при котором магистраль отключается от главного резервуара и сообщается с атмосферой. Давление в магистрали падает, тормозное оборудование ТО срабатывает, колодки ТК прижимаются к колёсам, происходит торможение.

В зависимости от степени снижения давления торможение бывает служебное и экстренное.

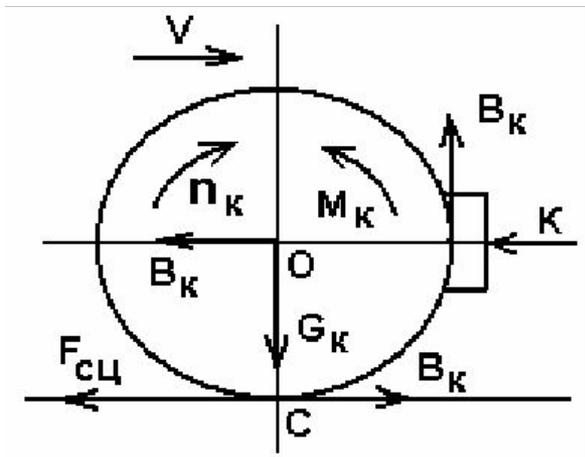
Для последующего отпуска тормозов надо поднять давление в магистрали до прежнего значения. Для этого КМ ставят в положение 1 (отпуск и зарядка). Рассматриваемый тормоз является автоматическим, т.к. при разрыве поезда и разъединении магистрали давление в ней резко падает и тормоз приходит в действие.

65. Образование тормозной силы при механическом торможении.

Механическое торможение реализуют путем прижатия тормозных колодок к ободам колёс. В результате трения колодок о колёса возникает тормозная сила

$$B_k = 1000K\varphi_k,$$

где B_k - тормозная сила, H ; K - сила нажатия колодки на колесо, kH ,
 φ_k - коэффициент трения между колодкой и колесом.



Сила B_k создаёт относительно оси момент M_k , который можно заменить парой сил B_k . Сила B_k в точке O действует от оси через подшипники и буксу на тележку и является тормозящей. Сила B_k в точке C действует от колеса на рельс. В точке C возникает сила сцепления

$$F_{сц} = 1000G_k\psi_k,$$

где G_k - вес на колёсной паре, kH
 ψ_k - коэффициент сцепления.

Если тормозная сила B_k превысит силу сцепления колеса с рельсом, начнётся проскальзывание, или юз. При этом нарушается нормальное торможение, происходит местный износ колеса. Чтобы не возникал юз, необходимо соблюдать условие:

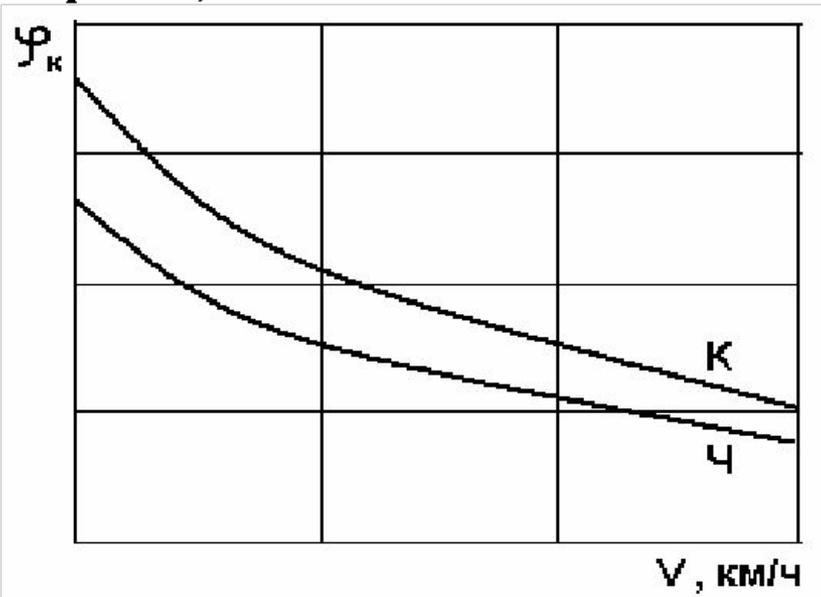
$$B_k < F_{сц}, \text{ или } K\varphi_k < G_k\psi_k$$

66. Коэффициент трения

зависит от скорости движения V и силы нажатия тормозных колодок K :

$$\varphi_k = f(K, V)$$

Для чугунных колодок коэффициент трения сильно зависит от скорости, для композиционных – в меньшей степени.



Для расчётов используют расчётный коэффициент трения, который зависит только от скорости:

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{V + 100}{5V + 100}$$

для чугунных и

$$\varphi_{кр} = 0,36 \frac{V + 150}{2V + 150}$$

для композиционных колодок.

С увеличением скорости движения и нажатия колодок коэффициент трения снижается. Чтобы коэффициент трения получить более высоким, применяют двустороннее нажатие колодок на каждое колесо; при этом уменьшается удельная сила нажатия колодок.

Композиционные колодки обладают более высоким коэффициентом трения, особенно в зоне высоких скоростей, и малым износом.

67. Расчёт полной и удельной тормозной силы поезда

Полную тормозную силу поезда находят по формуле

$$B_T = 1000\varphi_{\text{кр}} \sum_1^n K_{pi}, \text{ Н,}$$

где $\varphi_{\text{кр}}$ - расчётный коэффициент трения,

n - число тормозных осей в поезде,

K_{pi} - расчётная сила нажатия тормозных колодок на одну ось, кН.

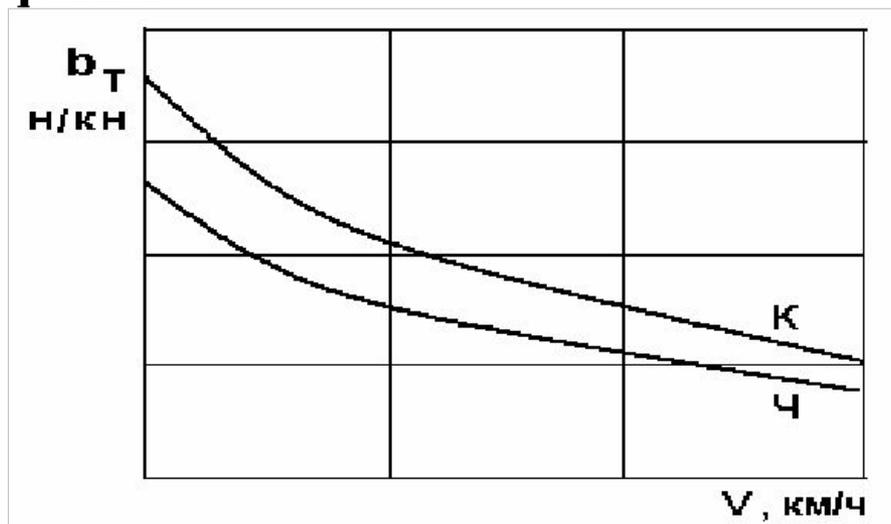
Её значение для разных локомотивов и составов берут из таблиц ПТР.

При решении тормозных задач пользуются удельной тормозной силой

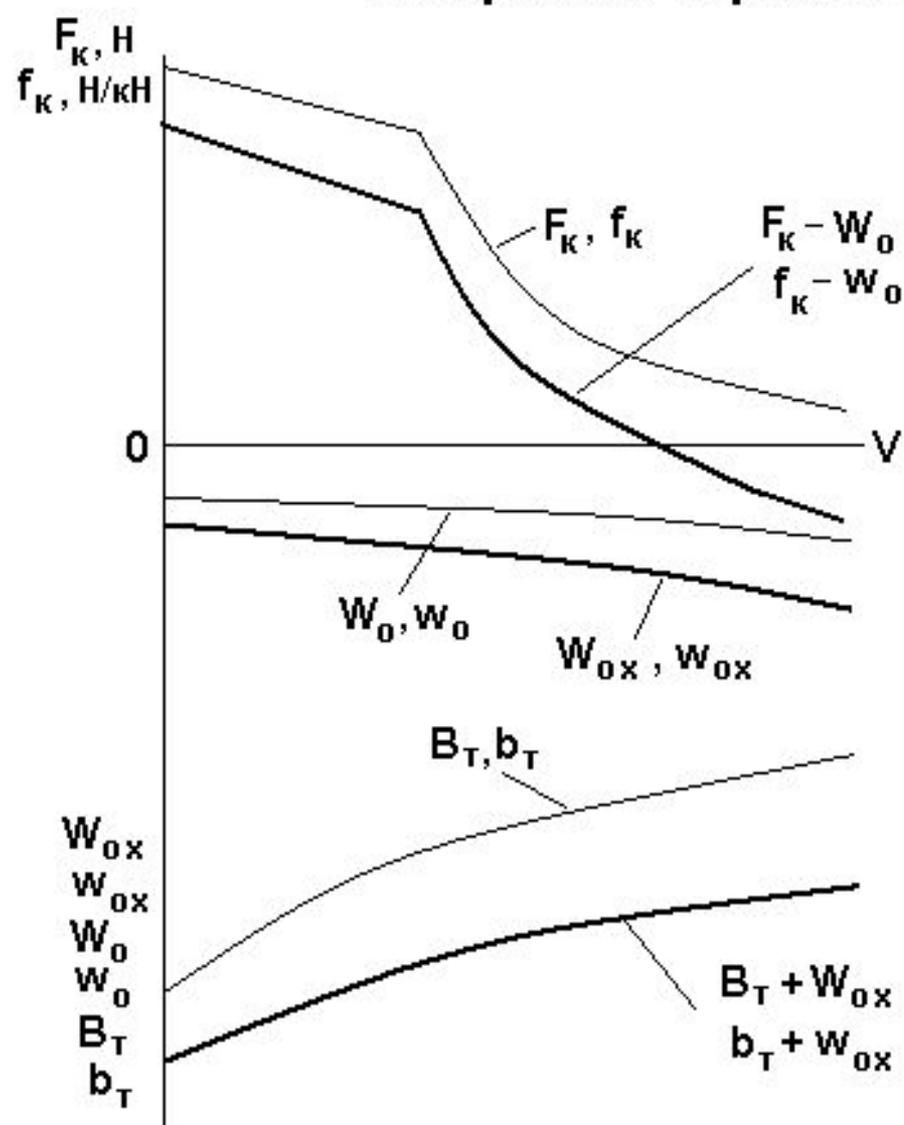
$$b_T = \frac{B_T}{P + Q} = 1000\varphi_{\text{кр}} \frac{\sum_1^n K_{pi}}{P + Q} = 1000\varphi_{\text{кр}} \vartheta_p, \text{ Н/кН,}$$

где ϑ_p - расчётный тормозной коэффициент, который для каждого поезда имеет своё значение.

Зависимость тормозной силы от скорости подобна зависимости коэффициента трения.



68. Зависимости равнодействующих сил от скорости на прямом горизонтальном участке пути



На поезд действуют силы
(полные и удельные значения)

в режиме тяги

$$F_d = F_k - W_0; f_d = f_k - w_0;$$

в режиме холостого хода

$$F_d = W_{0x}; f_d = w_{0x};$$

в режиме торможения

$$F_d = B_T + W_{0x}; f_d = b_T + w_{0x}.$$

Сведём эти силы на один график,
откладывая вверх ускоряющие
силы F_k, f_k , а вниз - замедляющие

$$B_T, b_T, W_0, w_0, W_{0x}, w_{0x}.$$

69. Диаграмма удельных сил

Полученный ранее график повернём на 90° и оставим удельные силы.

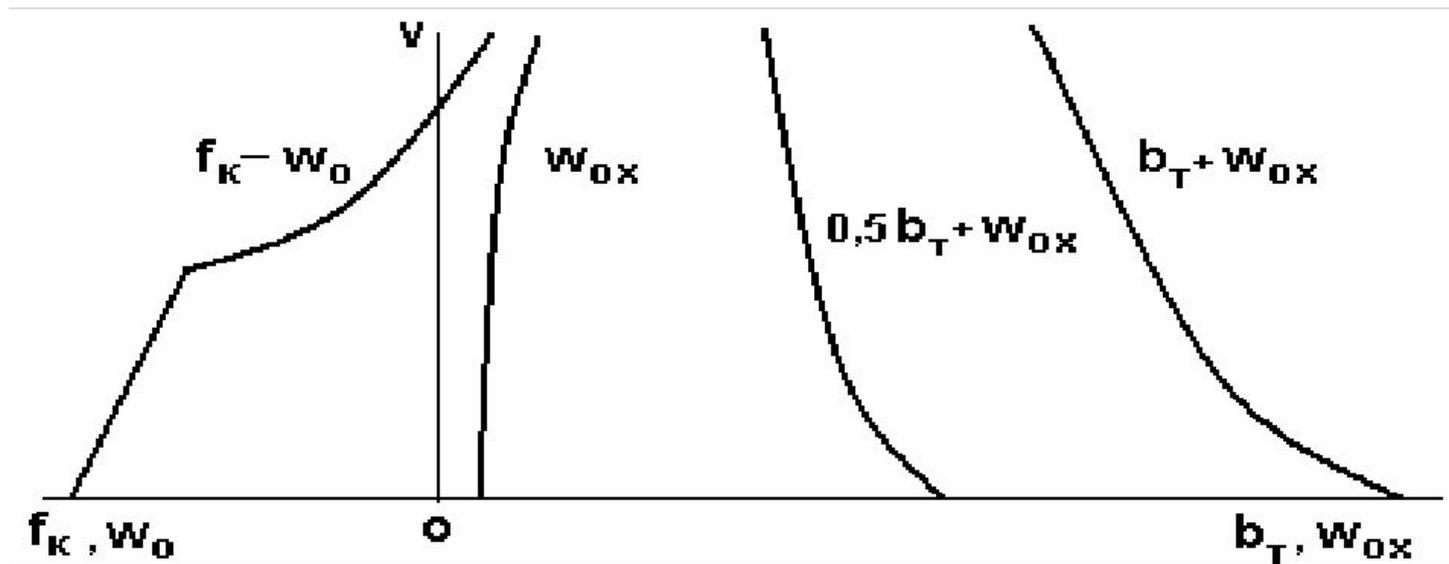


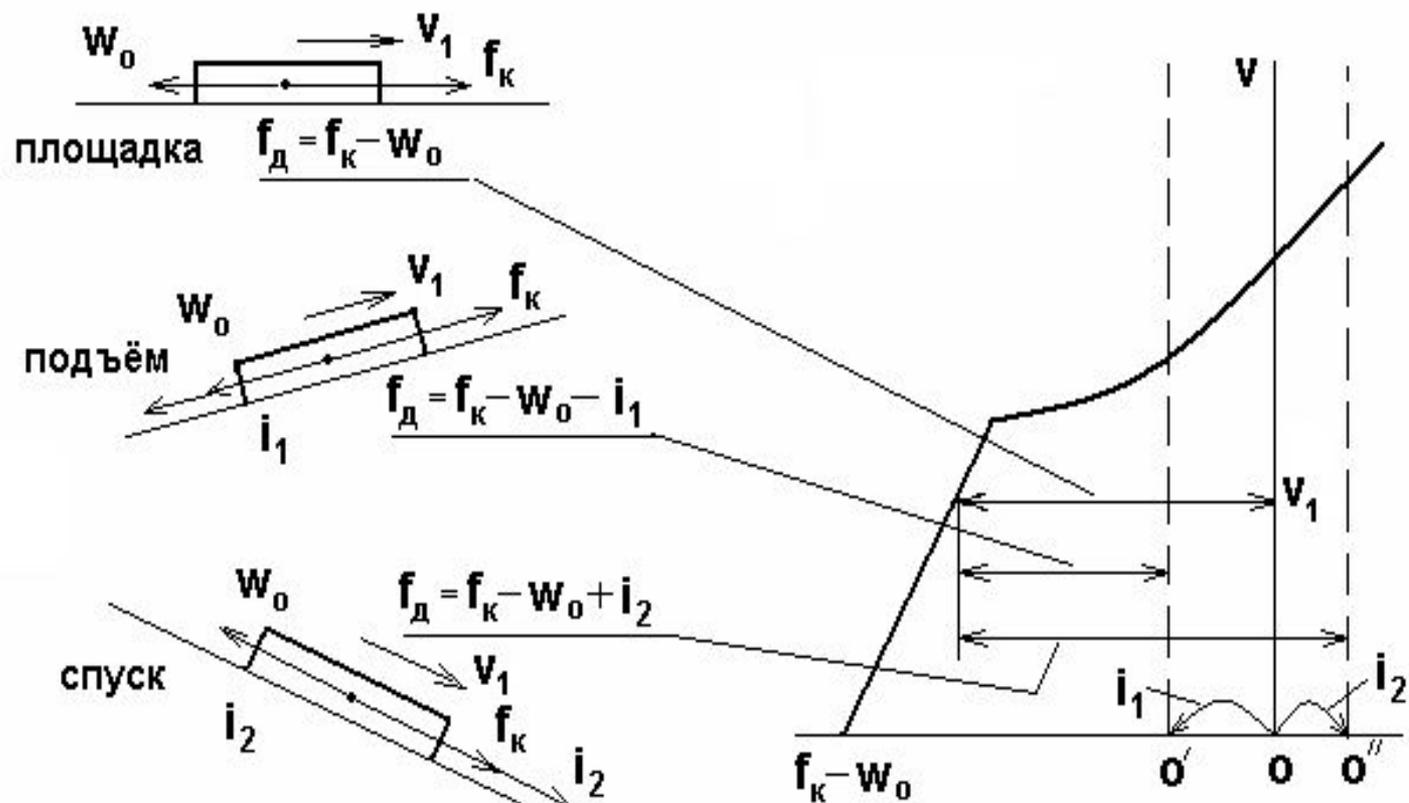
Диаграмма удельных сил – это зависимость от скорости равнодействующих удельных сил в режимах тяги, выбега и торможения на прямом горизонтальном участке пути, т.е. при отсутствии уклонов и кривых.

Кривая $f_k - w_0$ соответствует режиму тяги, w_{0x} - режиму выбега, $0,5 b_T + w_{0x}$ - режиму служебного торможения, $b_T + w_{0x}$ - режиму экстренного торможения.

Диаграмма удельных сил позволяет определить установившуюся скорость движения поезда, величину удельной силы при любой скорости, характер движения поезда при разных скоростях, решить уравнение движения поезда при разных скоростях.

70.Использование диаграммы удельных сил

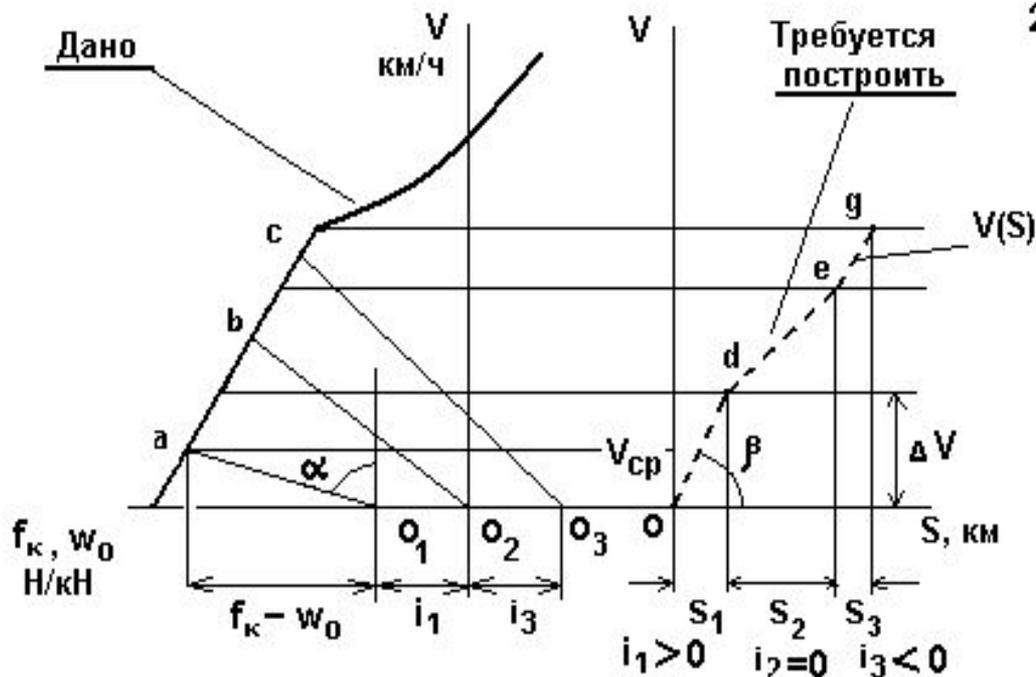
Диаграмма построена для прямого горизонтального участка пути, но по ней можно определять силы при движении поезда и на уклонах.



При использовании диаграммы удельных сил на уклонах ось скорости сдвигают на величину уклона влево на подъёмах и вправо на спусках.

72. Графический способ определения скорости движения поезда в режиме тяги

1. Размещаем рядом диаграмму удельных сил и оси скорости и пути, например, для режима тяги. Отметим элементы профиля пути и уклоны S_1, i_1 ; S_2, i_2 ; S_3, i_3 .



2. Возьмём интервал $\Delta V \leq 10$ км/ч, среднюю скорость в интервале V_{cp} , отметим точку a на кривой, отложим влево уклон i_1 , проведём луч $o_1 a$, отметим угол α .

3. Проведём отрезок od как перпендикуляр к лучу $o_1 a$, отметим угол β .

По построению $\angle \alpha = \angle \beta$.

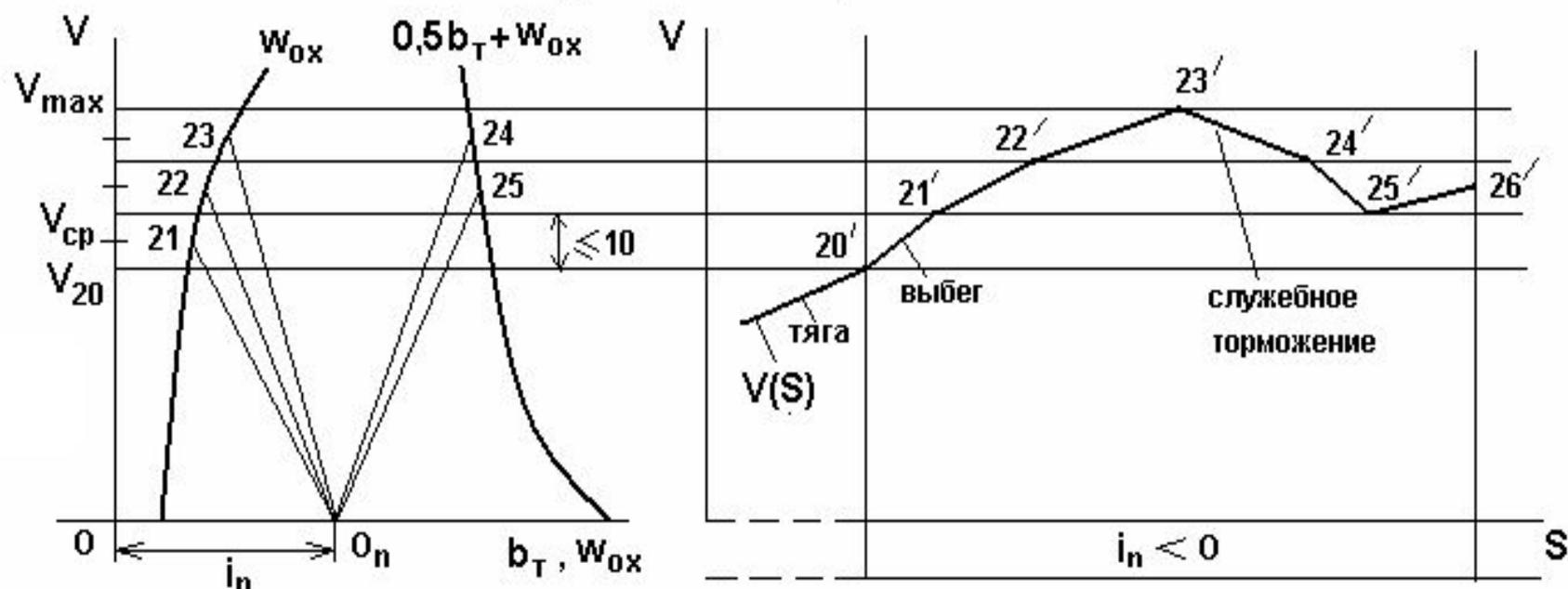
Но $\angle \alpha \equiv f_k - w_0$, а $\angle \beta \equiv \Delta V$, следовательно $f_k - w_0 \equiv \Delta V$.

4. Но это же соотношение вытекает из уравнения движения

$$\text{поезда: } \frac{dV}{dt} = \xi f_g \quad \text{или} \quad \Delta V \equiv \xi (f_k - w_0).$$

5. Выводы: Отрезок кривой скорости od можно построить как перпендикуляр к лучу $o_1 a$ на диаграмме удельных сил. При наличии уклона начало координат сдвигают влево на подъёме (o_1) или вправо на спуске (o_3) на величину уклона.

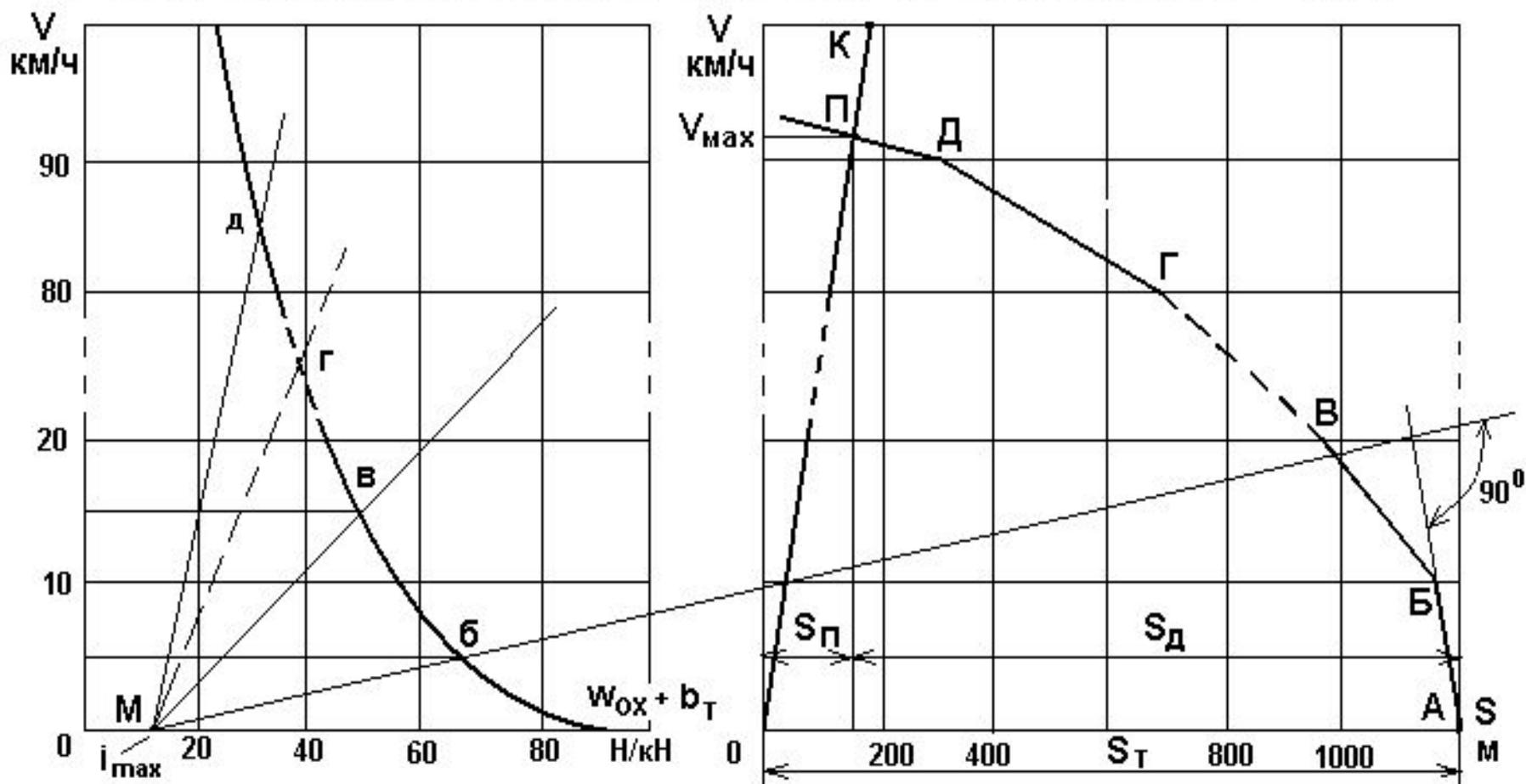
73. Графический способ определения скорости в режиме выбега и служебного торможения



Располагаем диаграмму удельных сил и ранее построенную часть графика $V(S)$ в режиме тяги, отметим точки V_{20} и $20'$.

1. Если впереди крутой спуск, $i_n < 0$, переходим в режим выбега (кривая W_{ox}). Отмечаем ограничение скорости V_{max} по тормозной задаче.
2. Переносим ось скорости вправо на величину уклона i_n , точка 0_n .
3. Откладываем $\Delta V \leq 10$ км/час, отмечаем V_{cp} и точку 21 , проводим луч $0_n - 21$, $\perp 20' - 21'$ и т.д.
4. Достигнув V_{max} (точка $23'$), переходим в режим служебного торможения (кривая $0,5b_T + W_{ox}$).
5. Откладываем интервал от точки $23'$ вниз, отмечаем точку 24 , проводим луч $0_n - 24$ и $\perp 23' - 24'$ и т.д.
6. Снизив скорость на 10-20 км/час, опять переходим в режим выбега и т.д.

71. Решение тормозной задачи (расчёт V_{\max} на уклоне i_{\max})



1. Построить график $W_{ox} + b_T$ слева.

2. Подготовить оси V и S справа.

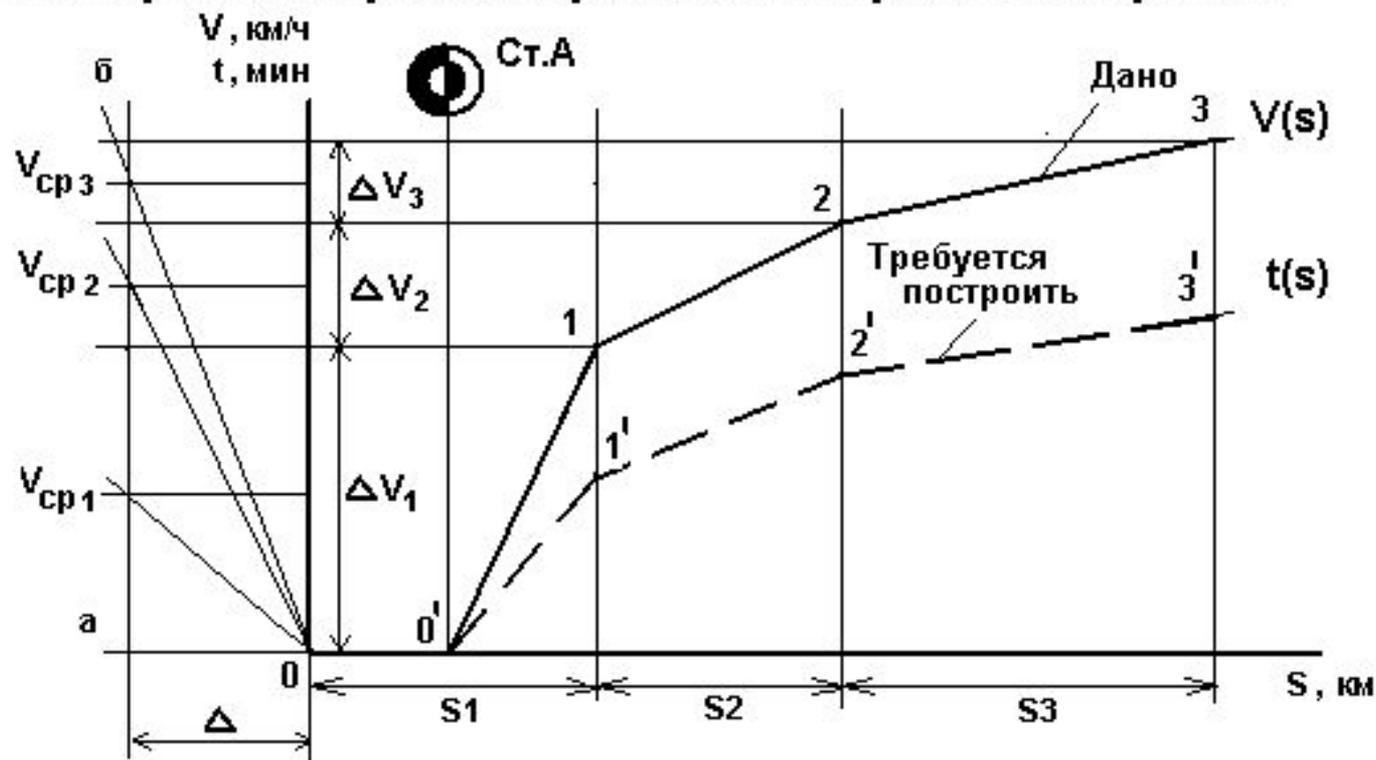
3. Отметить точку M для максимального спуска i_{\max} .

4. Провести лучи $M-б$, $M-в$, $M-г$ и т.д.

5. Рассчитать $S_П$ при $V=100$ км/ч, получить точку $К$, провести линию OK .

6. Провести перпендикуляры $АБ$, $БВ$, $ВГ$ и т.д. к лучам до пересечения в точке $П$, которое даёт V_{\max} .

74. Построение кривой времени по кривой скорости



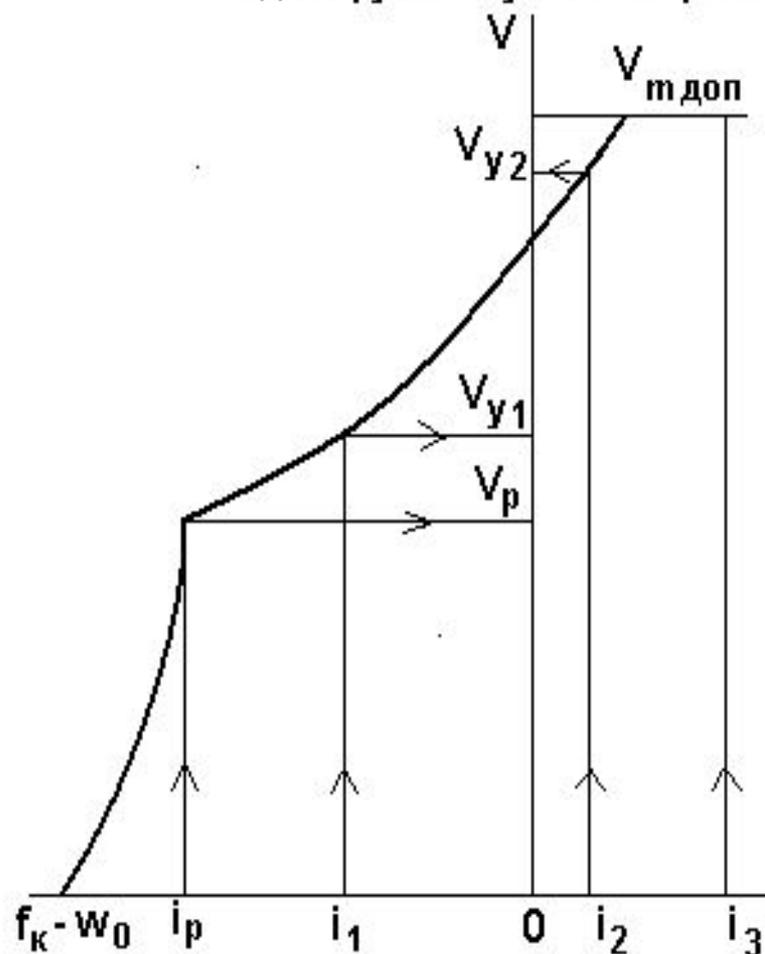
Исходные данные: кривая скорости $V(s)$, построенная ранее.

- Построение:
1. Откладываем влево от начала координат отрезок $\Delta = 30$ мм.
 2. Восстановим перпендикуляр ab .
 3. Отметим интервал скорости ΔV_1 и среднюю скорость $V_{ср1}$.
 4. Проведём луч $0 - V_{ср1}$ и перпендикуляр $0'1'$ в пределах отрезка S_1 .
 5. Проведём луч $0 - V_{ср2}$ и перпендикуляр $1'2'$ в пределах отрезка S_2 и т.д.
 6. Кривая $0'1'2'3'$ — это зависимость $t(s)$.

75. Определение времени хода методом равномерных скоростей

Исходные данные: профиль участка и диаграмма удельных сил для режима тяги.

Для каждого элемента профиля пути находят установившуюся скорость, а для крутых спусков её принимают равной максимально допустимой $V_{\text{м доп}}$.



№	Уклон ‰	Длина км	Установив. скорость, км/ч	Время хода Δt_i , мин
1	$i_1 > 0$	S_1	V_{y1}	$\Delta t_1 = \frac{S_1 \cdot 60}{V_{y1}}$
2	$i_2 < 0$	S_2	V_{y2}	$\Delta t_2 =$
3	$i_3 \ll 0$	S_3	$V_{y3} = V_{\text{м доп}}$	$\Delta t_3 =$
---	---	---	---	---
n	i_n	S_n	V_{yn}	$\Delta t_n =$
				$\sum_{i=1}^n \Delta t_i$

Время хода по участку определяют как

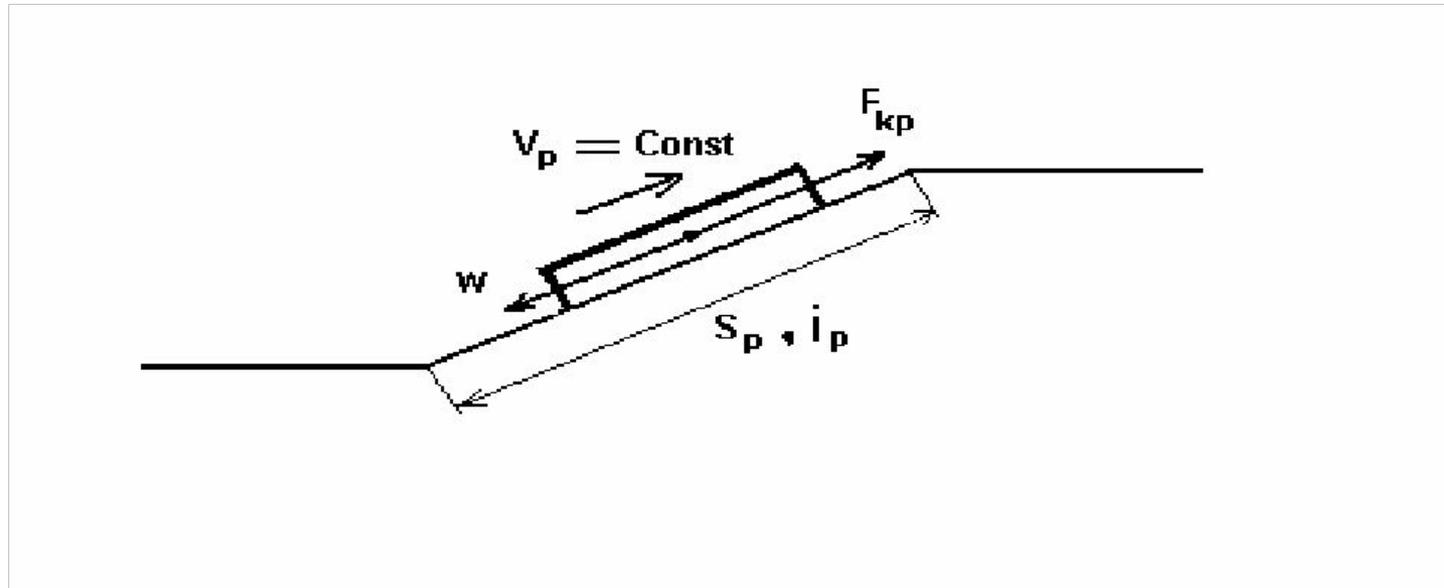
$$t_x = \sum_{i=1}^n \Delta t_i + t_p + t_3, \text{ где } t_p, t_3 - \text{ времена}$$

на разгон и замедление (2 и 1 мин).

Метод приближённый, т.к. реальные скорости движения отличаются от расчётных, особенно при разгоне и замедлении. Поэтому вводят поправки t_p, t_3 .

76. Движение поезда на расчетном подъёме

Расчетный подъём это длинный и крутой подъём с уклоном i_p , который нельзя преодолеть по инерции, т.е. с разгона.



Расчет выполняют при условии, что поезд движется с постоянной расчетной скоростью V_p , локомотив должен развивать при этом расчетную силу тяги $F_{кр}$.

77. Уравнение движения поезда можно представить как

$$(P + Q) \frac{dV}{dt} = \zeta F_{\delta} \quad (1)$$

Если $V_p = \text{const}$, $dV / dt = 0$, $F_{\delta} = 0$,

$$F_{\delta} = F_{кр} - W = 0, \quad (2)$$

$$W = (w_0' + i_p)P + (w_0'' + i_p)Q, \quad (3)$$

где P, Q - вес локомотива и состава, т.

w_0' , w_0'' - удельные сопротивления движению локомотива и состава, Н/кН,

i_p - удельное сопротивление от уклона, Н/кН.

Подставляя (3) в (2), получим:

$$F_{кр} - (w_0' + i_p)P - (w_0'' + i_p)Q = 0 \quad (4)$$

При известном весе состава Q , по этой формуле, задавая ориентировочно вес локомотива, определяют требуемую расчетную силу тяги $F_{кр}$ и выбирают соответствующий локомотив.

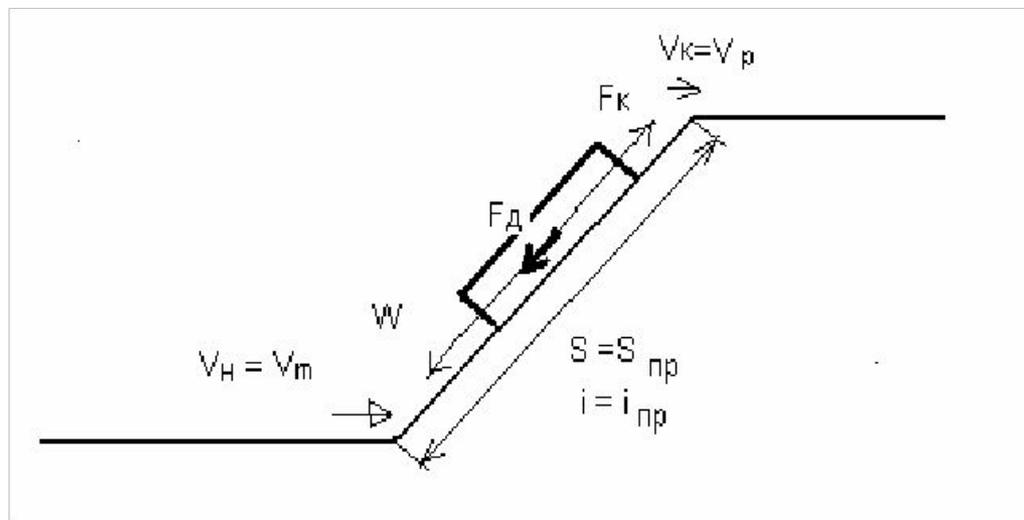
В том случае, когда задан тип локомотива, находят вес состава Q :

$$Q = \frac{F_{кр} - (w_0' + i_p)P}{w_0'' + i_p} \quad (5)$$

Полученное значение округляют до 50 т.

78. Движение поезда на инерционном (проверяемом) подъёме

На участке пути бывает элемент с крутизной, большей, чем на расчетном подъёме, но меньшей длины. Его называют инерционным, или проверяемым. В этом случае проверяют возможность прохождения такого элемента с использованием кинетической энергии поезда.



При решении задачи ставят условие, что скорость движения поезда не должна быть ниже расчетной. Вследствие крутого подъёма сопротивление движения превосходит силу тяги и равнодействующая F_D направлена против движения, следовательно, поезд движется замедленно.

79. Расчет ведут, исходя из того, что кинетическая энергия поезда ΔA_k тратится на работу по преодолению средней равнодействующей силы ΔA_{cp} :

$$\Delta A_k = \Delta A_{cp}, \quad (1)$$

$$\Delta A_k = \frac{(1 + \gamma)(P + Q)(V_k^2 - V_n^2)}{2g}, \quad (2)$$

$$\Delta A_{cp} = F_{\text{дср}} S = (F_k - W)_{cp} S = (f_k - w)_{cp} (P + Q) S \quad (3)$$

Среднюю равнодействующую силу рассчитывают при средней скорости движения.

Приравнявая (2) и (3), получим:

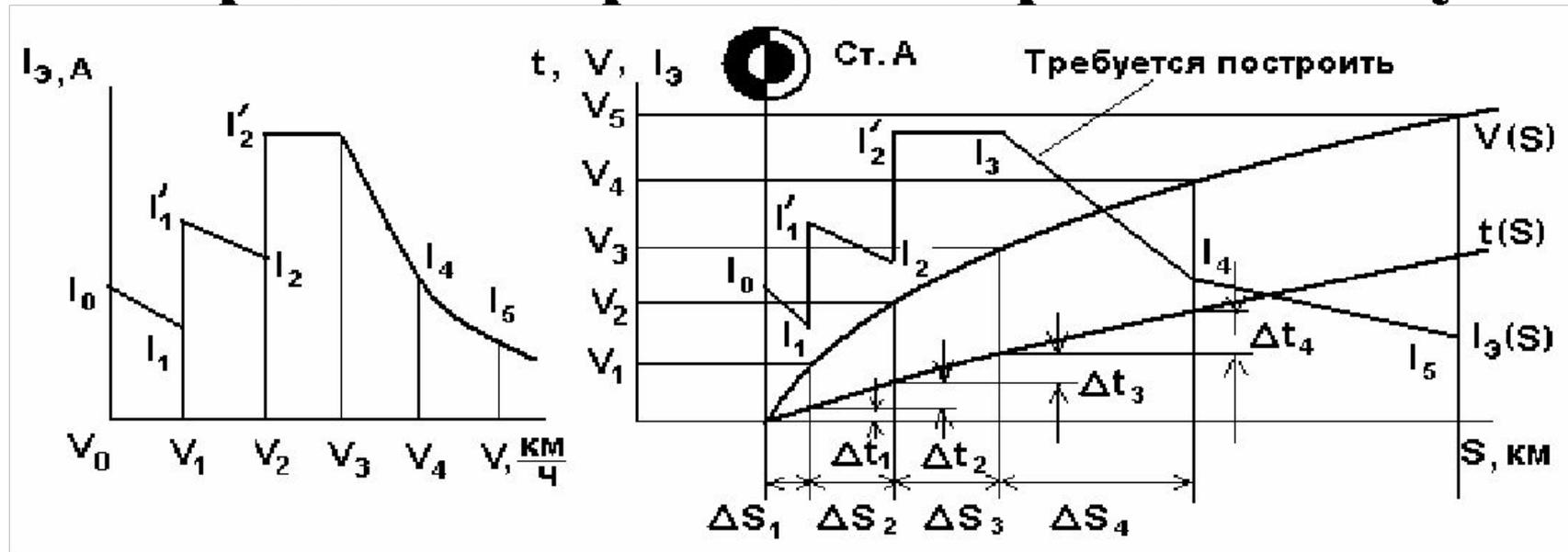
$$S = \frac{(1 + \gamma)(V_k^2 - V_n^2)}{2g(f_k - w)_{cp}} \quad (4)$$

По формуле (4) определяют S, м.

В соответствии с “Правилами тяговых расчетов” принимают $V_k = V_p$, а $V_n = V_{\text{max}}$ на данном участке.

Если $S > S_{\text{пр}}$, поезд преодолевает подъём; если $S < S_{\text{пр}}$, не преодолевает, в этом случае уменьшают массу состава и повторяют расчет.

80. Определение расхода энергии на тягу



Исходные данные.

Кривые $V(S)$, $t(S)$ и токовая характеристика $I_э(V)$ электровоза.

Порядок построения.

- 1. На токовой характеристике отмечают характерные точки и соответствующие им значения скорости и тока: $V_0, V_1, V_2, \dots, I_0, I_1, I_1'$ и т.д.**
- 2. На кривой $V(S)$ отмечаем точки V_1, V_2, V_3, \dots , на оси пути - интервалы $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \dots$, на кривой $t(S)$ - интервалы $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots$.**
- 3. Для каждого значения скорости V_0, V_1, V_2, \dots откладываем значения тока I_0, I_1, I_1', \dots и строим кривую $I_э(S)$ для режима тяги.**
- 4. Составляем таблицу и рассчитываем полный и удельный расходы энергии (см. следующий слайд).**

81. Расчёт расхода электроэнергии на тягу

По данным предыдущего слайда заполняют таблицу:

ΔS_i	$I_{\text{ср}}, A$	$\Delta t_i, \text{мин}$	$I_{\text{ср}} \Delta t_i, A \text{ мин}$
ΔS_1	$I_{\text{ср}1} = \frac{I_0 + I_1}{2}$	Δt_1	$I_{\text{ср}1} \Delta t_1$
ΔS_2	$I_{\text{ср}2} = \frac{I_1' + I_2}{2}$	Δt_2	$I_{\text{ср}2} \Delta t_2$
-----	-----	-----	-----
ΔS_n	$I_{\text{ср}n} = \frac{I_{n-1}' + I_n}{2}$	Δt_n	$I_{\text{ср}n} \Delta t_n$
			$\Sigma I_{\text{ср}i} \Delta t_i$

Расход электроэнергии определяют по формуле $A' = \frac{U_n \sum_1^n I_{\text{ср}i} \Delta t_i}{60 \cdot 1000}$, кВтч

С учётом расхода на собственные нужды локомотива

$A = 1,02A'$ для ЭПС постоянного тока и $A = 1,03A'$ для ЭПС переменного тока.

Удельный расход энергии определяют как $a = \frac{A \cdot 1000}{Q \cdot L_{\text{уч}}}$, Втч / ткм

В формулах U_n - номинальное напряжение на токоприёмнике электровоза: 3000 В для ЭПС постоянного тока и 25000 В для ЭПС переменного тока.