

Подставив выражение для ω , получим:

$$\nu = \frac{U_a - I_a \cdot r_a}{C_n \Phi}, \quad (4.15)$$

а ЭДС вращения

$$E = C_n \cdot \Phi \cdot \nu. \quad (4.16)$$

Данные расчетов свести в табл. 4.1 и 4.2 и построить зависимости $F_k(\nu)$ и $\nu(I_a)$. Нанести ограничения по теплению, скорости движения и току электропровода. Здесь же построить характеристики ν_{0B1} и ν_{0B2} (рис. 4.1.)

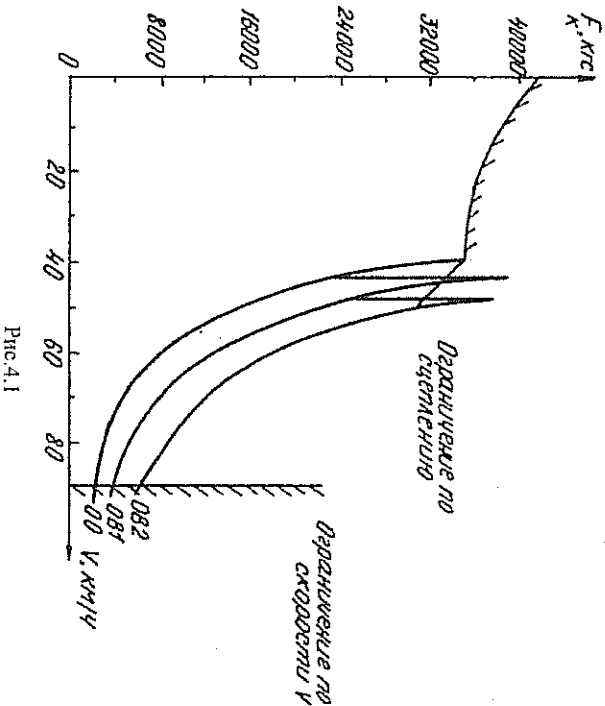


Рис. 4.1

Таблица 4.1

I_a , А	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$C_n \Phi$										
ν_{0B1} , км/ч										
ν_{0B2} , км/ч										
ν_{0B1} , км/ч										
ν_{0B2} , км/ч										
F_k , кгс										
$F_k = F_{k1}, N_{k1}$, кгс										

2 При построении $\nu(I_a)$ учесть, что $1 \text{ м/с} = 3,6 \text{ км/ч}$.

10

Таблица 4.2

(4.3)

ν , км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ν											
F_k , кгс											

5. ПУСК ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Подведенное от контактной сети к ТЭД напряжение уравновешивается ЭДС вращения E и падением напряжения $I \cdot r$ в обмотках электродвигателя:

$$U_a = E + I_a r_a, \quad (5.1)$$

где

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n, \quad (5.2)$$

где C_E – конструктивная постоянная электрической машины, $C_E = C_{n\phi}$;

Φ – магнитный поток, Вб;

n – частота вращения, об/мин.

$$\text{Таким образом, } U_a = C_E \cdot \Phi \cdot n + I_a r_a, \quad (5.3)$$

откуда

$$n = \frac{U_a - I_a (R_a + r_a)}{C_E \Phi}. \quad (5.4)$$

Из этой формулы видно, что регулирование частоты вращения ТЭД возможно

- изменением подводимого к двигателю питающего напряжения;
- изменением сопротивления в цепи ТЭД;
- изменением магнитного потока.

На электровозах постоянного тока изменение подводимого напряжения достигается переключением (перегруппировкой) ТЭД.

При последовательном соединении ТЭД ЭДС напряжение на каждом из них составляет:

$$U_a = \frac{U_{к.с.}}{N_a}, \quad (5.5)$$

где $U_{к.с.}$ – напряжение контактной сети;

N_a – количество ТЭД электровоза.

При пуске электровоза $n = 0$, ЭДС вращения $E = 0$ и, следовательно, ток в цепи ТЭД может быть недопустимо большим. Для ограничения пускового тока до величины $I_{п1} = 1,2 \cdot I_{н1} \dots 1,4 \cdot I_{н1}$ последовательно с ТЭД включают пусковые резисторы $R_{п1}$. Тогда

$$I_n = \frac{U_n}{r_n + R_n}, \quad (5.6)$$

По мере увеличения скорости вращения, а следовательно и ЭДС вращения E , пусковые резисторы выводят из цепи ТЭД таким образом, чтобы среднее значение пускового тока оставалось практически постоянным.

После выведения пусковых сопротивлений при последовательном соединении ТЭД напряжение на двигателях станет

$$U_n = \frac{U_{к.с}}{N_n} = U_c. \quad (5.7)$$

Этому напряжению соответствует скоростная характеристика С-соединения. С целью дальнейшего увеличения скорости движения производят перегруппировку ТЭД на последовательно-параллельное соединение. Для поддержания тока I_n неизменным в цепь ТЭД вновь вводят пусковые резисторы, сопротивление которых постепенно уменьшают. В конце пуска на СП-соединении напряжение на ТЭД становится

$$U_n = \frac{2 \cdot U_{к.с}}{N_n} = U_{сп}. \quad (5.8)$$

Этому напряжению соответствует скоростная характеристика СП-соединения. Для дальнейшего увеличения скорости двигатели перегруппировывают в параллельное П-соединение, но, так как номинальное напряжение ТЭД электровозов постоянного тока составляет 1500 В, ТЭД при параллельном соединении группируются в $N_n/2$ ветвей и напряжение на каждом ТЭД в конце пуска составляет:

$$U_n = \frac{U_{к.с}}{2} = U_n. \quad (5.9)$$

При переходе на параллельное соединение ТЭД в их цепь вводятся R_n . Приложенному напряжению U_n соответствует скоростная характеристика П или ПП. Для дальнейшего повышения скорости движения применяется ослабление возбуждения ОВ, т.е. уменьшение магнитного потока Φ :

$$F = C_F \cdot I \cdot \Phi \cdot \eta. \quad (5.10)$$

При неизменном токе якоря ТЭД последовательного возбуждения ослабление Φ вызовет уменьшение силы тяги, чтобы увеличить ток якоря, при ослаблении возбуждения параллельно обмотке возбуждения включают шунтирующий резистор $R_{ш}$. Это обеспечивает уменьшение тока возбуждения I_b , следовательно и Φ , а также увеличение тока якоря I .

$$C_n = \frac{2 \cdot \mu \cdot C_n}{D_k} = \frac{2 \cdot \mu \cdot P \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D_k}. \quad (4.6)$$

Если силу тяги электродвигателя $F_{кл}$ отнесём к ободу колеса, умножить на количество ТЭД (N_n), получим силу тяги электровоза:

$$F_k = N_n \cdot F_{кл}. \quad (4.7)$$

При этом максимально возможная сила тяги электровоза по условиям сцепления

$$F_{к.сч} = F_{сч} \cdot N_n \quad (4.8)$$

где $F_{сч}$ — максимально возможная сила сцепления колеса с рельсом,

$$F_{сч} = \psi \cdot m_{з0} \cdot g; \quad (4.9)$$

$$F_{к.сч} = \psi \cdot m_{з0} \cdot g \cdot N_n = \psi_k \cdot g \cdot m_z, \quad (4.10)$$

где $m_z \cdot g$ — вес электровоза;

ψ_k — коэффициент сцепления электровоза.

Расчётный коэффициент сцепления электровоза¹

$$\psi_k = a + \frac{b}{c + dv}. \quad (4.11)$$

Наибольшая сила тяги, которую может развить электровоз по условиям сцепления, соответствует точке пересечения тяговой характеристики $F_k(v)$ с кривой ограничения по сцеплению $F_{к.сч}(v)$. Эту величину называют расчётной силой тяги $F_{кр}$. При этом скорость электровоза при номинальном напряжении на тяговых двигателях U_n не должна быть меньше расчётной v_p на расчётном подъёме с расчётным весом поезда.

Если движущее колесо перекачивается по рельсу без проскальзывания, то скорость движения локомотива равна линейной скорости на ободе колеса:

$$v = \frac{\omega_k \cdot D_k}{2}, \quad (4.12)$$

где ω_k — угловая скорость колеса,

$$\omega_k = \frac{\omega}{\mu}, \quad (4.13)$$

где μ — передаточное число зубчатой передачи от вала ТЭД к колёсной паре.

Подставляя ω_k в формулу определения v , убеждаемся, что скорость электровоза пропорциональна угловой скорости якоря ТЭД:

$$v = \frac{D_k \cdot \omega}{2 \cdot \mu}. \quad (4.14)$$

¹ Плоск А.В. Электрические железные дороги. — М., 1993. — С. 33 (табл.2, 3).

4. СИЛА ТЯГИ ЭЛЕКТРОВОЗА И ЕЁ РЕАЛИЗАЦИЯ

Тяговый электропривод – устройство, предназначенное для передачи вращающего момента тягового электродвигателя на движущие колёса электровоза и преобразовании вращающего момента в силу тяги. Основными элементами тягового электропривода являются ТЭД, колёсная пара, зубчатая передача. Зубчатая передача состоит из малой шестерни, насаженной на вал ТЭД, и большого зубчатого колеса, напрессованного на ось колёсной пары. Отношение числа зубьев большого колеса и малой шестерни называется передаточным числом μ .

К колёсной паре прикладывается вращающий момент от тягового двигателя через зубчатую передачу

$$M_{\kappa} = M_{\mu} \cdot \mu, \quad (4.1)$$

где M – вращающий момент на валу ТЭД;

μ – передаточное число зубчатой передачи;

$\mu_3 = 0,975$ – КПД зубчатой передачи.

Под действием M_{κ} и силы сцепления колеса с рельсом колесо *перекатывается* по рельсу, а ось колёсной пары, перемещаясь, передаёт на буксу горизонтальную силу:

$$F_{\kappa a} = \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{D_{\kappa}}, \quad (4.2)$$

где D_{κ} – диаметр колеса.

Силу $F_{\kappa a}$ называют силой тяги, отнесённой к ободу колеса.

Максимально возможное значение силы тяги F по условиям сцепления колёсной пары с рельсом $F_{\text{сц}}$ прямо пропорционально силе нажатия колёсной пары на рельс и определяется формулой:

$$F_{\text{сц}} = \psi \cdot n_{\text{зв}} \cdot G, \quad (4.3)$$

Коэффициент пропорциональности ψ между силой нажатия колёсной пары на рельс $n_{\text{зв}}$ и максимальной силой $F_{\text{сц}}$ называется коэффициентом сцепления.

Зависимость между силой тяги, отнесённой к ободу колеса, и вращающим моментом электродвигателя

$$F_{\kappa a} = \frac{2 \cdot M_{\kappa} \cdot \mu \cdot \eta_2}{D_{\kappa}}, \quad (4.4)$$

Подставляя выражение M из формулы (4.4), получим:

$$F = C_{\eta} \cdot \Phi \cdot I_{\text{д}} \cdot \eta_2, \quad (4.5)$$

где C_{η} – постоянная привода (постоянный коэффициент, характеризующий тяговый привод), для системы единиц СИ

Степень ослабления возбуждения зависит от величины $R_{\text{пр}}$, обуславливающей соотношение токов $I_{\text{н}}$ и I , и называется коэффициентом ослабления возбуждения β . Для ЭПС железных дорог $\beta = \frac{I_{\text{н}}}{I} \geq 0,3$.

Максимальный пусковой ток электровоза (двигателя) I_{max} ограничивается сцеплением колёс с рельсами или допустимой перегрузкой по току,

$$\left. \begin{array}{l} I_{\text{max}} \leq I_{\text{сц}} \\ I_{\text{max}} \leq K_{\text{пз}} \cdot I_{\text{н}} \end{array} \right\}, \quad \text{т.е.} \quad (5.11)$$

где $K_{\text{пз}}$ – коэффициент эксплуатационной перегрузки, для электровозов $K_{\text{пз}} \approx 1,2 \dots 1,4$;

$I_{\text{сц}}$ – наибольшая величина тока, допустимого по условиям сцепления, $I_{\text{сц}}$ берётся по кривой $F(I)$ для силы тяги:

$$F_{\text{сц}} = \frac{\psi \cdot m_{\text{з}} \cdot G}{N_{\text{д}}}, \quad (5.12)$$

где ψ – расчётный коэффициент сцепления; выбирается наименьшее значение.

Средний пусковой ток

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{\text{max}}}{1 + K_{\text{пд}}}, \quad (5.13)$$

где $K_{\text{пд}}$ – коэффициент неравномерности пуска по току на первых позициях регулирования напряжения. Для электровозов при пуске с одинаковыми колебаниями тока на всех позициях ($\Delta I = \text{const}$) $K_{\text{пд}} = 0,05 \dots 0,06$.

Минимальный пусковой ток

$$I_{\text{мин}} = (1 - K_{\text{пд}}) \cdot I_{\text{п}}, \quad (5.14)$$

Сопротивление пусковых резисторов

$$R_{\text{п0}} = \frac{U_{\text{д}}}{I_{\text{max}}} - r_{\text{д}}; \quad (5.15)$$

$$U_{\text{д}} = \frac{U_{\text{к.с.}}}{N_{\text{д}}}, \quad (5.16)$$

Току переключения ступени резистора соответствует скорость электровоза V_1 ,

$$V_1 = \frac{U_{\text{д}} - I_{\text{max}} \cdot (R_{\text{п}} + r_{\text{д}})}{C_{\eta} \cdot \Phi}, \quad (5.17)$$

а ЭДС ТЭД при этом

$$E_1 = C_n \cdot \Phi \cdot \nu_1 \quad (5.18)$$

Пусковые резисторы второй ступени будут иметь сопротивление

$$R_{n1} = \frac{U_n - E_1}{I_{\max}} - r_n \quad (5.19)$$

и соответствующие ν_2, E_2 и т.д. до выхода на автоматическую характеристику серийного соединения тяговых двигателей С.

При перегруппировке двигателей в СП-соединение сопротивление пусковых резисторов

$$R_{c,n} = \frac{2U_{к.с} - E_n}{N_n \cdot I_{\max}} - r_n \approx R_{n1} \quad (5.20)$$

Расчет ступеней реостата для одной группировки тяговых двигателей

Задача расчета – при заданных коэффициентах и пределах колебаний тока от $I_{\min}$ до $I_{\max}$ определить число реостатных ступеней и сопротивления каждой из них.

На диаграмме (рис. 5.1) построение предельных прямых $\nu(r)$, соответствующих $I_{\min}$ и $I_{\max}$, производится по двум точкам. Для $I_{\min}$ координаты первой точки $\nu = \nu_a''$ и $r = 0$, т.е.

$$\nu_a'' = \frac{U_n - I_{\min} \cdot r_n}{C \Phi} \quad (5.21)$$

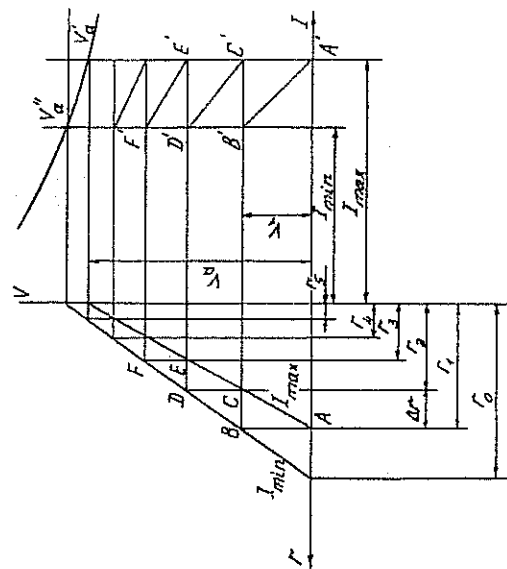


Рис. 5.1

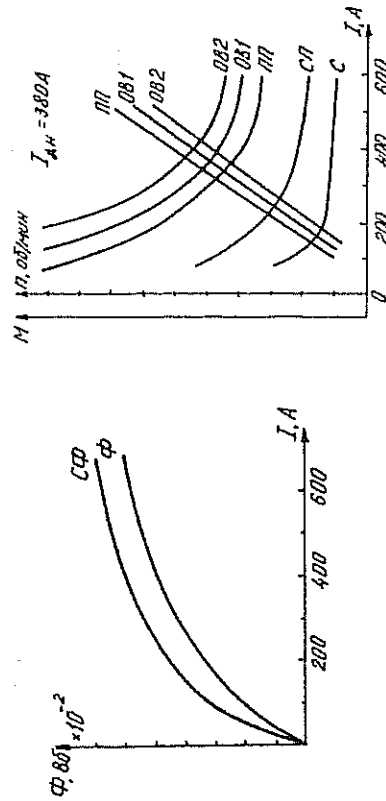


Рис. 3.1

Рис. 3.2

$$I_n = \left(\frac{I}{I_n} \right) \cdot I_n; \quad (3.19)$$

$$\Phi = \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right) \cdot \Phi_n. \quad (3.20)$$

Данные расчетов свести в табл. 3.1 и построить зависимости $\Phi(I)$ (рис. 3.1), $i(I), M(I)$ (рис. 3.2) для заданного тягового двигателя, для полного поля и ОВ1; ОВ2.

В табл. 3.1 в графе I_n обязательно должен быть указан номинальный ток якоря электродвигателя.

Таблица 3.1

I/I_n	0,30	0,40	0,60	0,80	1,00	1,2	1,4	—	—
Φ/Φ_n	0,56	0,68	0,83	0,93	1,00	1,05	1,1	—	—
I, A									
$\Phi, Вб$									
$C\Phi$									
I, A	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$C\Phi, Вб$									
$n, об/мин$									
$C\Phi$									
β_1									
β_2									
ОВ1, об/мин									
ОВ2, об/мин									
$M_n, кгм$									
$M_{n1}, кгм$									
$M_{n2}, кгм$									

аает завод-изготовитель. Обычно допускается 1,5-кратная перегрузка ТЭД в течение нескольких минут. Номинальный ток якоря ТЭД рассчитывается по следующей формуле:

$$I_a = \frac{P \cdot 10^3}{U_{дн} \cdot \eta_{дн}} \quad (3.18)$$

где $\eta_{дн}$ — КПД ТЭД.

Электромеханические характеристики тягового электродвигателя представляют собой зависимость вращающего момента M и угловой скорости ω от тока I_a , потребляемого ТЭД.

При последовательном возбуждении обмотки якоря и полюсов включены последовательно в общую цепь и ток возбуждения равен току якоря ($I_a = I_d$). При этом возбуждении магнитный поток полюсов Φ зависит от тока I_a и определяется магнитными свойствами стали ТЭД. Зависимость $\Phi(I_a)$ подобна кривой намагничивания ферромагнитных материалов. При сравнительно небольших токах возбуждения магнитный поток Φ прямо пропорционален I_d . При увеличении тока наступает магнитное насыщение стали и рост Φ замедляется.

Таким образом, в ненасыщенной системе ТЭД возрастание тока приводит к пропорциональному увеличению магнитного потока, а вращающий момент вырастает пропорционально квадрату тока.

При насыщении магнитной системы ТЭД увеличение тока приводит к незначительному возрастанию магнитного потока. Поэтому при больших токах I_d зависимость $M(I_d)$ близка к линейной.

Частота вращения ТЭД последовательного возбуждения уменьшается с ростом тока якоря вследствие увеличения Φ (см. формулу (3.15)).

С уменьшением частоты вращения ток серийных ТЭД возрастает; сопротивление r_d мало, поэтому при $\omega = 0$ и $U_{дн}$ ток двигателя достигает значения $I_d = U_{дн}/r_d$, которое более чем в 10 раз превышает I_n . Такой режим работы недопустим, поэтому при пуске ТЭД пусковой ток ограничивают пусковыми резисторами.

При расчете кривой намагничивания удобно пользоваться относительными величинами, т.е. ток и магнитный поток выражены в долях от значений этих величин при номинальном режиме.

В табл. 3.1 приведены данные кривой намагничивания в относительных единицах для двигателей с коэффициентом насыщения магнитной цепи, равным 1,85.

Кривая намагничивания тягового двигателя в абсолютных единицах получается путем умножения относительных величин на соответствующие значения I_n , $C\Phi_n$.

$$\text{координаты второй точки } v=0, r=r_0 = \frac{U}{I_{\min}} - r_n.$$

При $I_{\max}$ координаты первой точки $v=v'_0$ и $r=0$:

$$v'_0 = \frac{U - I_{\max} \cdot r_n}{C\Phi} \quad (5.22)$$

$$\text{координаты второй точки } v=0, r=r_1 = \frac{U}{I_{\max}} - r_n.$$

Согласно этому построению, в момент пуска электроваза при $v=0$ устанавливается ток $I_{\max}$, то есть сопротивление первой ступени двигателя равно r_1 , далее при постоянном r_1 скорость растет и ток уменьшается (отрезки АВ и А'В'). В точке В, то есть при скорости v' и токе $I_{\min}$ нужно выключить первую ступень пускового реостата. Чтобы ток не превысил значение $I_{\max}$, сопротивление выключаемой ступени должно быть Δr , а осевшее сопротивление второй ступени r_2 . Значению r_2 соответствует точка С, которая находится на пересечении прямой, проходящей через (.)В параллельно оси r , с прямой $r(v)$, соответствующей $I_{\max}$ в левой части рисунка.

Построение продолжают в том же порядке. Отрезки r_3, r_4, r_5 и так далее соответствуют сопротивлениям третьей, четвертой и пятой ступеней. В соответствии с ломаной АВСDEF используется допустимый диапазон тока определяется ломаной А'В'С'Д'Е'Г' и так далее.

На последней реостатной ступени при снижении тока до $I_{\min}$ может получиться $v'_a \neq v'_a$. Такой режим пуска отбрасывается от оптимального, при котором на каждой ступени полностью используется допустимый диапазон колебаний тока. Изменив пределы отклонения тока, можно достигнуть равенства $v'_a = v'_a$.

При совместном пуске нескольких двигателей сопротивление ступеней реостата зависит от их числа и схем включения. При пуске m последовательно соединенных двигателей целесообразно выполнить расчет для одного двигателя, действительные значения ступеней пуска всех двигателей при этом $r_n = m r_n$.

При пуске P параллельно включенных двигателей общее сопротивление

$$r_n = \frac{r_n}{P}. \quad \text{При } N \text{ двигателей, включенных последовательно-}$$

$$\text{параллельно, } r_n = \frac{m r_n}{P}. \quad \text{Здесь } r \text{ определяется по формуле}$$

$$r = \frac{U - C \cdot \Phi \cdot v}{I_n} - r_n \text{ при } U = \frac{U_1}{p} \quad (5.23)$$

Отрезки A'B', C'D' и так далее в пределах $I_{\max.л.} \dots I_{\min}$ можно замещать отрезками прямых.

6. ПУСК ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На отечественном ЭПС переменного тока для регулирования скорости преимущественное распространение получил способ изменения количества витков вторичной обмотки тягового трансформатора (ТТ), подключаемых к выпрямителю. Напряжение на первичной обмотке ТТ остаётся неизменным и равным $U_{к.с.}$

Для учёта специфики работы ТТ в целях выпрямителей используют показатель, называемый типовой мощностью. Тяговой мощностью однофазного трансформатора называют половину суммы произведений напряжений холостого хода всех обмоток трансформатора на среднеквадратичные токи соответствующих обмоток при номинальной нагрузке.

При расчёте типовой мощности обычно пренебрегают током холостого хода (ХХ) трансформатора, а также потерями в трансформаторе и выпрямителях:

$$S_{\text{тип}} = P_n \cdot N_d \cdot K_{\text{т.м}} \cdot K_m \cdot (1 + 0,7 \cdot U_k) \cdot \eta_{д.н}, \quad (6.1)$$

где P_n — номинальная мощность ТЭД;

N_d — число ТЭД электровоза;

$K_{\text{т.м}}$ — коэффициент тяговой мощности, т.е. отношение типовой мощности к номинальной выпрямленной мощности, $K_{\text{т.м}} = 1,11$;

K_m — отношение суммарной номинальной мощности ТЭД к номинальной мощности тяговой обмотки трансформатора, для всех электровозов $K_m = 1,0$;

$\eta_{д.н}$ — КПД двигателя в номинальном режиме.

Мощность обмоток вспомогательных нужд $S_{\text{всп}}$ принимают равной 7,5...8,5% мощности тяговой обмотки.

Предварительное напряжение XX трансформатора

$$U'_{20н} = 1,1(U_{д.н} + 0,125U_{д.н}) = 1,25U_{д.н} \quad (6.2)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора:

$$X_{\text{тн}} = \frac{(U_x \%) \cdot U'_{20н}}{100 \cdot a_d \cdot I_n \cdot K_{\text{впр}}}, \quad (6.3)$$

где $U_x \% = 10\%$ — реактивные потери напряжения в трансформаторе.

Активное сопротивление трансформатора, приведённое ко вторичной обмотке,

r'_d — сопротивление обмоток двигателя;

$I_d^2 \cdot r'_d$ — тепловые потери электродвигателя.

Подставив $P_{эд} = U_d \cdot I_d$ и $P_{\text{мех}} = E I_d$ и разделив на I_d , получим:

$$U_d = E + I_d \cdot r'_d. \quad (3.13)$$

Это выражение представляет собой уравнение равновесия напряжений в цепи электродвигателя. Напряжение U_d приложенное к электродвигателю, уравновешивается суммой ЭДС вращения E и падения напряжения на обмотках $I_d \cdot r'_d$.

С целью повышения КПД ТЭД обмотки выполняют максимально возможного сечения. У тяговых электродвигателей мощностью свыше 400 кВт величина $I_d \cdot r'_d$ составляет обычно около 4% от приложенного напряжения U_d .

Данные о сопротивлении обмоток ТЭД берутся из справочника или могут быть определены как

$$I_d \cdot r'_d = 0,04 U_{д.н}. \quad (3.14)$$

Из уравнения равновесия напряжений и E получим формулу определения угловой скорости:

$$\omega = \frac{U_d - I_d \cdot r'_d}{C_m \cdot \Phi}. \quad (3.15)$$

Номинальный магнитный поток

$$\Phi_n = \frac{U_{д.н} \cdot (1 - 0,04)}{C_m \cdot n_{д.н}}. \quad (3.16)$$

Таким образом, из формулы (3.15) угловой скорости видно, что ω возрастает при увеличении напряжения U_d уменьшении сопротивления r'_d и магнитного потока Φ . Частота вращения вала ТЭД рассчитывается по формуле, об/мин,

$$n = \frac{\omega \cdot 60}{2\pi}. \quad (3.17)$$

Номинальный режим работы ТЭД определяется нагреванием электродвигателя в процессе работы под действием потерь энергии. Для каждого типа электродвигателя завод-изготовитель устанавливает номинальный режим работы, при котором обмотки электродвигателя в течение одного часа нагреваются до предельно допустимой температуры. Напряжение, мощность, потребляемый ток и частота вращения, соответствующие номинальному режиму, называют номинальными и обозначают в индексе буквой n (U_n, I_n).

Режим работы ТЭД при мощности, большей номинальной, называют перегрузкой. Допустимые значения и длительность перегрузки устанавли-

$$I_1 = \frac{I_a}{2a},$$

где I_1 – ток в проводнике обмотки якоря.
Вращающий момент ТЭД:

$$M = F_1 \cdot 0,5 \cdot D_a \cdot N \cdot \alpha_a, \quad (3.3)$$

где $0,5 D_a$ – плечо силы F_1 относительно оси якоря;
 N – число проводников обмотки якоря.

Подставив в формулу момента M величины F_1, B, S_w, I_1 , получим:

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (3.4)$$

где C_m – постоянный коэффициент, характеризующий обмотку якоря.

Этот коэффициент определяется по формуле для системы СИ:

$$C_m = \frac{P \cdot N}{2\pi \cdot a}, \quad (3.5)$$

или для системы единиц, применяемых на железной дороге:

$$C_m = \frac{P \cdot N}{60 \cdot a}.$$

В каждом проводнике вращающегося якоря индуцируется ЭДС:

$$E = \bar{B} \cdot l_a \cdot \bar{v}_a \cdot \sin \alpha_2, \quad (3.6)$$

где v_a – скорость движения проводника якоря относительно магнитного поля;

α_2 – угол между векторами B и v_a , $\sin \alpha_2 = 1$.

Скорость v_a связана с угловой скоростью якоря ω соотношением:

$$v_a = \frac{D_a \cdot \omega}{2}. \quad (3.7)$$

ЭДС вращения, индуцируемая в обмотке якоря,

$$E = \frac{E_1 \cdot N}{2a}. \quad (3.8)$$

С учетом сказанного выше и имея в виду, что $\sin \alpha_2 = 1$,

$$E = \frac{P \cdot N \cdot \omega \cdot \Phi}{2a \cdot \pi}, \quad (3.9)$$

или

$$E = C_m \cdot \omega \cdot \Phi. \quad (3.10)$$

Электрическая мощность, потребляемая ТЭД из сети,

$$P_{эд} = P_{мех} + I_a^2 \cdot r_a, \quad (3.11)$$

где $P_{мех}$ – механическая мощность на валу электродвигателя,

$$P_{мех} = M \cdot \omega = C_m \cdot \omega \cdot \Phi \cdot I_a = E \cdot I_a. \quad (3.12)$$

$$r_m = 0,02 \cdot \frac{U_{20H}}{a_a \cdot I_a \cdot K_{шр}}, \quad (6.4)$$

где 0,02 – падение напряжения на активном сопротивлении трансформатора (2% от U_n);

I_n – номинальный ток ТЭД;

a_a – количество ветвей параллельно включённых двигателей;

$K_{шр}$ – коэффициент выпрямления при однофазном выпрямлении, 0,9.

Номинальное эквивалентное сопротивление преобразовательной установки, приведённое к одному ТЭД,

$$R_{2н} = 2 \cdot (0,7 \cdot X_{ш} + 0,67 \cdot r_m + r_{ср}), \quad (6.5)$$

где $r_{ср} = 0,007$ Ом – активное сопротивление сглаживающего реактора.

Уточнённое номинальное напряжение XX трансформатора определяется следующей формулой:

$$U_{20H} = 1,11 \cdot (U_{дн} + I_{дн} \cdot R_{2н}). \quad (6.6)$$

Число витков вторичной обмотки трансформатора

$$w_2 = \frac{U_{20H}}{E_0} = \frac{U_{20H}}{20}, \quad (6.7)$$

где $E = 20$ В/виток – принятая средняя величина.

С другой стороны,

$$w_2 = w_{рr} + w_{шр} = 2 \cdot w_{рr} + w_{21}, \quad (6.8)$$

где $w_{шр} = w_{рr} + w_{21}$ – число витков нерегулируемой обмотки;

$w_{рr}$ – число витков регулируемой обмотки (должно быть кратно числу секций обмотки);

w_{21} – разность между числом витков нерегулируемой и регулируемой обмоток.

В общем случае при встречно-согласном включении

$$w_2 = 2 \cdot w_c \cdot w_c + w_{21}, \quad (6.9)$$

где $w_c = 4$ – число секций регулируемой обмотки;

w_c – число витков секции.

Принимаем $w_{21} = 0,4 \cdot w_c$ (значение округляется до ближайшего

меньшего целого числа). Тогда

$$w_2 = 2 \cdot 4 \cdot w_c + 0,4 \cdot w_c = 8,4 \cdot w_c, \quad (6.10)$$

откуда расчетное число витков секции $w_{ср} = \frac{w_2}{8,4}$ (округляется до целого

числа). Полное расчетное число витков вторичной обмотки

$$w_{2p} = 8 \cdot w_{cp} + w_{21p}, \quad (6.11)$$

где w_{cp} – расчетное число витков секции.
Расчетная ЭДС на виток должна быть

$$E_{op} = \frac{U_{20n}}{w_{2p}}, \quad (E_{op} = 18...22 \text{ В/виток}). \quad (6.12)$$

Число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{U_{кв}}{E_{op}}. \quad (6.13)$$

Выпрямленное напряжение XX на любой i -й позиции

$$U_{noi} = 0,9 \cdot U_{20i} = 0,9 \cdot \left[w_{21p} \cdot E_{op} + (i-1) \frac{w_c \cdot E_{op}}{K_{cx}} \right], \quad (6.14)$$

где $K_{cx} = 4$ – коэффициент схемы переключения выводов трансформатора с использованием переходного реактора, перекрестного соединения мостов и поочередного переключения секций в каждый полуобмотке трансформатора (ВЛ-80).

Выпрямленное напряжение XX на 1-й ступени

$$U_{noi} = 0,9 \cdot E_{op} \cdot w_{21p}. \quad (6.15)$$

Приращение напряжения

$$\Delta U_{no} = 0,9 \cdot \frac{w_c \cdot E_{op}}{4}. \quad (6.16)$$

Выпрямленное напряжение XX на любой позиции будет

$$U_{noi} = U_{noi} + (i-1) \cdot \Delta U_{no}. \quad (6.17)$$

Расчет выполнить до 33-й ступени регулирования.

РАСЧЕТ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПРЯМИТЕЛЯ

С увеличением тока нагрузки выходное напряжение выпрямителя уменьшается вследствие потерь

$$U_{di} = U_{roi} - I \cdot R_{\Sigma i}. \quad (6.18)$$

Значения $R'_{\Sigma i}$ в относительных единицах даны в табл. 6.1. Пересчитать относительные величины в абсолютные и построить $R'_3(U_{в0})$.

Таблица 6.1

$U_{в0}/U_{в0н}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$R'_3/R_{\Sigma н}$	0,109	0,093	0,085	0,084	0,083	0,095	0,109	0,122	0,136
$U_{в0}$									
R'									

конструкционная скорость электроваза, коэффициент ослабления возбуждения β_1, β_2 – по справочнику в соответствии с выбранным типом электроваза.

2.2. Общими для всех вариантов являются следующие данные:
характер движения – магистральное грузовое;
напряжение в контактной сети $U_k = 3000$ В при тяге на постоянном токе и $U_k = 25000$ В при тяге на переменном токе.

3. ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Электродвигатель постоянного тока состоит из неподвижного остова с полюсами, создающими магнитный поток, и вращающегося якоря, преобразующего электрическую энергию в механическую.

На внутренней поверхности остова располагаются две или три пары полюсов с обмотками возбуждения, соединенными так, что при протекании электрического тока по этой цепи северные N и южные S полюса чередуются.

Якорь – стальной цилиндр с продольными пазами, в которых находится обмотка якоря. Обмотка якоря соединяется с источником питания через коллектор и щетки.

При работе электродвигателя по обмоткам протекает электрический ток. Сила взаимодействия токов якоря с магнитным потоком полюсов, вращает якорь. Сила электромагнитного взаимодействия

$$F_1 = \vec{B} \cdot \vec{I}_1 \cdot l_n \cdot \sin \alpha, \quad (3.1)$$

где l_n – длина участка проводника, взаимодействующего с магнитным потоком;

α – угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{I}_1$ ($\vec{B}$ и $\vec{I}_1$ перпендикулярны), $\sin \alpha = 1$;

B – магнитная индукция, $B = \frac{\Phi}{S_n}$ (Φ – магнитный поток; S_n – площадь одного полюса).

Отношение ΣS_n к площади поверхности якоря называется коэффициентом полюсного перекрытия α_s . Тогда площадь одного полюса

$$S_n = \frac{\pi \cdot D_a \cdot l_n \cdot \alpha_s}{2p}, \quad (3.2)$$

где D_a – диаметр якоря;

$2p$ – число полюсов.

Обмотка якоря состоит из N проводников, образующих $2a$ параллельных ветвей. Ток якоря протекает по этим параллельным ветвям.

Таблица 1.1

Тип ТЭД	Номер варианта задания (количество движущих осей, сцепной вес электровоза G , тс)					
ТЛ2К1	1 (8, 160)	8 (6, 126)	15 (4, 88)	22 (12, 270)	29 (8, 188)	36 (6, 147)
НБ-406	2 (12, 240)	9 (8, 168)	16 (6, 132)	23 (4, 92)	30 (12, 282)	37 (8, 196)
ДПЭ-400	3 (4, 82)	10 (12, 252)	17 (8, 176)	24 (6, 138)	31 (4, 96)	38 (12, 294)
НБ-418К	4 (6, 123)	11 (4, 86)	18 (12, 264)	25 (8, 184)	32 (6, 144)	39 (4, 100)
НБ-420А	5 (8, 164)	12 (6, 129)	19 (4, 90)	26 (12, 276)	33 (8, 192)	40 (6, 150)
АЛ4846еТ	6 (12, 246)	13 (8, 172)	20 (6, 135)	27 (4, 94)	34 (12, 288)	41 (8, 200)
АЛ4442нР	7 (4, 84)	14 (12, 258)	21 (8, 180)	28 (6, 141)	35 (4, 98)	42 (12, 300)

Таблица 2.1

Параметр		Тип тягового электродвигателя						
		ТЛ-2К1	НБ-406	ДПЭ-400	НБ-418К	НБ-420А	АЛ 4846еТ	АЛ 4442нР
Номинальный ток	I , А	466	380	290	880	495	500	1210
Магнитная индукция	B , Тл	0,65	0,68	0,711	0,664	0,721	0,715	0,59
Число полюсов	$2p$	6	4	4	6	4	6	6
Число проводников в обмотке якоря	N	1050	812	570	696	696	1044	522
Число параллельных ветвей обмотки якоря	$2a$	6	4	2	6	4	6	6
Диаметр якоря	D , мм	740	660	635	660	660	900	710
Длина якоря	l , мм	430	400	305	385	375	360	350
Номинальное напряжение ТЭД	U , В	1500	1500	1500	950	1500	1500	800
Сопротивление обмоток ТЭД	r , Ом	0,13	0,156	0,24	0,0415	0,125	0,142	0,2
Магнитный поток номинальный	Φ , Вб	0,108	0,141	0,106	0,0884	0,14	0,121	0,0705
Передаточное число	μ	3,826	3,905	4,45	4,19	4,19	1,75	2,64
Диаметр колеса электровоза	D , мм	1250	1200	1200	1250	1250	1250	1250
КПД зубчатой передачи	η_z	0,975	0,965	0,970	0,975	0,975	0,975	0,975

Внешняя характеристика выпрямителя на каждой ступени регулирования определяется двумя точками: U_0 при $I=0$, вторая – при любом значении тока, но лучше при $I = 1,6 \cdot I_1$, что перекрывает весь диапазон изменения тока.

Расчет вторых точек для позиций 1...6 (табл. 6.2) рассчитывать при токах трогания

$$I_{rp} = \frac{U_{00}}{R_z + r_d}, \quad (6.19)$$

где $r_d = \frac{0,04 \cdot U_{00}}{I_{rp}}$ или из справочника.

Таблица 6.2

Номер позиции	U_{00} , В	R_{zp} , Ом	I_{rp} , А	$U_{rp} = U_{00} - I_{rp} \cdot R_{zp}$	$U_{rp} = U_{00} - 1,6 \cdot I_1 \cdot R_{zp}$
1					
2					
3					
...					
n					

Расчет скоростных характеристик провести с учетом внешних характеристик выпрямителя, заданных токов якоря и представлять в виде табл. 6.3.

Таблица 6.3

I , А	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
C_Φ										
v_1 , км/ч										
v_2 , км/ч										
v_3 , км/ч										
...										
v_{33} , км/ч										

Построить скоростные характеристики электровоза и внешние характеристики выпрямителя, нанести ограничения по скорости и току (рис. 6.1).

Максимальная скорость электровоза v_{max} ограничена конструктивными особенностями двигателей и ходовой части. Для отечественных электровозов принимают $v_{max} = (1,9 \dots 2,15) v_n$ или конструктивную скорость $v_{констр}$ для данного электровоза по справочнику.

По значениям F_K max из $F_K(I)$ определяются соответствующие значения тока I_{max} .

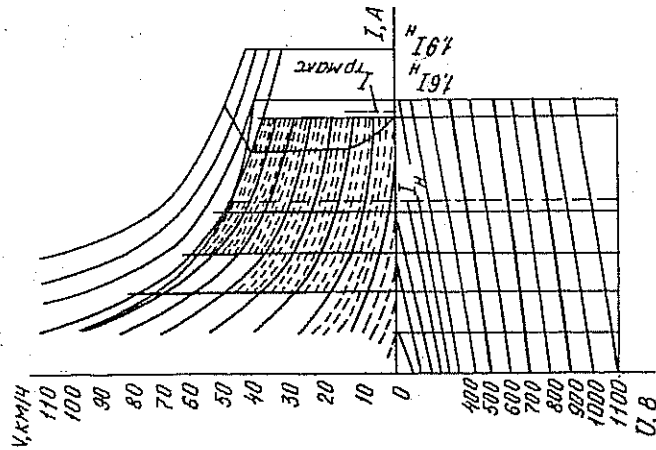


Рис. 6.1

Составители: АРХИПОВ Константин Алексеевич, БОГОЛЮБОВ Юрий Сергеевич,
ТУНЦОВ Илья Николаевич

Редактор Н.В. Фролова
Корректор О.В. Стручина
Технический редактор М.С. Савастеева
Компьютерная верстка С.Ю. Киселев
План 2002 г., № 118

Подписано в печать с оригинал-макета 27.11.03.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага для множ. апп. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 300.
Заказ 4333. Цена 18 р.
Петербургский государственный университет путей сообщения.
190031, СПб., Московский пр., 9.
Типография ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Назначение расчетов

Цели настоящего курсового проекта – привитие навыков расчёта и построения электромеханических характеристик; изучение способов регулирования скорости ЭПС; расчёт и построение пусковой диаграммы электроваза.

1.2. Оформление курсового проекта

1.2.1. Курсовой проект содержит пояснительную записку с приложением диаграмм и графиков, выполненных на миллиметровой бумаге.

1.2.2. Пояснительная записка включает в себя:

заполненный бланк задания на курсовой проект;
исходные данные, выбранные из табл. 1.1, 2.1 настоящих методических указаний в соответствии с шифром задания;
расчетные формулы с выполненными примерами решений, при необходимости – с краткими пояснениями;

таблицы с заданными и вычисленными величинами;

графики и диаграммы функциональных зависимостей;

обоснования применяемых в ходе выполнения работы решений;

выводы по работе;

список использованной литературы.

1.2.3. Пояснительная записка выполняется на стандартных листах бумаги формата А4 (210×297); записи производятся на одной стороне листа чернилами (шариковой ручкой).

1.2.4. Графики и диаграммы выполняются чернилами, тушью, шариковой ручкой или карандашом с соблюдением рекомендуемых масштабов. На графиках аккуратно и четко размечают оси координат с указанием функциональных зависимостей.

1.2.5. При оформлении курсового проекта пояснительную записку, графики, диаграммы сшивают, листы нумеруют.

На титульном листе указывают наименование курсового проекта, фамилию и инициалы исполнителя, учебную группу, дату исполнения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

2.1. Каждому студенту задается номер варианта исходных величин, в соответствии с которым выбираются:

данные по электровазу (1.1), тяговому электродвигателю (табл. 2.1);

библиотека

учебный кабинет

Цена 18 р.

Т 0222
Э45

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«ПЕТЕРБУРГСКИЙ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
МИНИСТЕРСТВА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

Кафедра «Электрическая тяга»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ

Методические указания к курсовому проекту
для специальности «Энергоснабжение железных дорог»

Часть 1

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2003