

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
(РУТ (МИИТ))**

Одобрено кафедрой
«ТЯГОВЫЙ ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ»

Протокол № ____ от _____ 201__ г.

Автор: _____

**ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ С МЕТОДИЧЕСКИМИ
УКАЗАНИЯМИ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Системы управления электроподвижным составом

Уровень ВО: *Специалитет*

Форма обучения: *Заочная*

Курс: *5*

Специальность/Направление: *23.05.03 Подвижной состав железных
дорог (ПСс)*

Специализация/Профиль/Магистерская программа: *(ПЭ)
Электрический транспорт железных дорог*

Москва

Составитель: канд. техн. наук доц. Е.П. Капустина

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В контрольной работе производится расчет ряда параметров электрооборудования, предназначенного для управления тяговыми электрическими машинами восьмиосного электровоза переменного тока. Исходные данные выбираются из табл. 1 по двум последним цифрам учебного шифра.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Номинальная мощность тягового двигателя $R_{дн}$, кВт		700	750	800	850	900	950
Нагрузка на ось $R_{сц}$, кН		220	225	230	235	240	245
Номинальная скорость $V_{н}$, км/ч	Номинальное напряжение $U_{дн}$, В	Последние цифры учебного шифра					
50	900	01	02	03	04	05	06
52	1000	07	08	03	10	11	12
54	1100	13	14	15	16	17	18
56	1200	19	20	21	22	23	24
58	1300	25	26	27	28	29	30
60	900	31	32	33	34	35	36
50	1000	37	38	39	40	41	42
52	1100	43	44	45	46	47	48
54	1200	49	50	51	52	53	54
56	1300	55	56	57	58	59	60
58	900	61	62	63	64	65	66
60	1000	67	68	69	70	71	72
50	1100	73	74	75	76	77	78
52	1200	79	80	81	82	83	84
54	1300	85	86	87	88	89	90
56	900	91	92	93	94	95	96
58	1000	97	98	99	00	—	—

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

На первом листе контрольной работы нужно написать заголовок, отражающий содержание, и привести исходные данные.

Рисунки выполняются карандашом на миллиметровой бумаге. Все рисунки должны быть пронумерованы. Аналогично нумеруются и таблицы. Допускается сквозная нумерация рисунков и таблиц. Страницы нумеруются в правом верхнем углу. Расчеты выполняются в последовательности, приведенной в методических указаниях. На каждом этапе расчета указываются его порядковый номер и наименование рассчитываемой величины. Затем записывается формула или, если требуется, дается ее вывод. В формулах расшифровываются только те символы и числовые коэффициенты, которые не были объяснены на предыдущих этапах расчета или в исходных данных. После этого в формулу подставляются числовые значения переменных и, опуская промежуточные вычисления, приводится результат расчета. Расчеты выполняются с точностью до трех-четырёх значащих цифр.

Литература, которую нужно использовать при выполнении работы, приведена в конце задания.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Номинальный ток двигателя рассчитывается из выражения, характеризующего преобразование потребляемой двигателем электрической мощности в механическую мощность на его валу

$$I_n U_n \eta_{дн} = P_{дн} 10^3, \quad (1.1)$$

где I_n — номинальный ток двигателя, А;

$U_{дн}$ — номинальное напряжение двигателя, В;

$\eta_{дн} = 0,95$ - КПД двигателя в номинальном режиме;

$P_{дн}$ — номинальная мощность на валу, кВт.

У мощных тяговых двигателей грузовых электровозов в номинальном режиме падение напряжения на сопротивлении обмоток r_d составляет около 3% от напряжения на двигателе. Из этого условия определяется r_d

$$I_n r_d = 0,03 U_{дн}. \quad (1.2)$$

Значение удельной ЭДС в номинальном режиме $C_v \Phi_n$ получаем из уравнения

$$U_{дн} = C_v \Phi_n V_n + I_n r_d. \quad (1.3)$$

Зависимость удельной ЭДС от тока возбуждения определяется конструктивными особенностями тягового двигателя. В контрольной работе используем аналитическую зависимость, достаточно описывающую вид кривой намагничивания двигателя НБ-418К6 электровоза ВЛ80°

При нормальном возбуждении ток двигателя и ток возбуждения связаны соотношением

$$I_B = \beta_{HB} I,$$

где $\beta_{HB} = 0,96$ — коэффициент ослабления возбуждения.

Точки зависимости $C_v \Phi / C_v \Phi_H$ от I_B / I_{BH} , приведены в табл. 2.

Таблица 2.

$I_B / I_{BH} = I / I_H$	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
$C_v \Phi / C_v \Phi_H$	0,435	0,712	0,389	1	1,07	1,12	1,15

Сила тяги двигателя зависит от произведения тока двигателя на магнитный поток

$$F_d = 3,6 C_v \Phi I \eta_F \quad (1.4)$$

где F_d — сила тяги двигателя, кН;

$\eta_F = 0,9$ — коэффициент, учитывающий потери силы тяги, вызванные механическими и магнитными потерями в тяговом двигателе, а также потерями в передаче.

В контрольной работе зависимость потерь от скорости не учитывается и величина η_F принимается постоянной.

Сила тяги двигателя грузового электровоза ограничивается силой сцепления колес с рельсами.

$$F_{сц} = \psi P_{сц},$$

где $P_{сц}$ — нагрузка на ось, кН.

Коэффициент сцепления ψ зависит от скорости движения поезда. Для электровозов переменного тока максимальная сила тяги, которая может быть реализована при скорости равной нулю

$$F_{d \max} = 0,36 P_{сц} \quad (1.5)$$

Для последующих расчетов нужно знать допустимое значение силы тяги двигателя при трогании на первой позиции $F_{д1}$. При этой силе тяги ускорение одиночного электровоза на площадке должно составлять около 0,4 м/с. Ограничение важно для выполнения маневров, особенно в тех случаях, когда электровоз нужно передвинуть на небольшое расстояние. Значение $F_{д1}$ определяется из уравнения движения одиночного электровоза, имеющего массу M_s ,

$$F_s - W_0 = M_s (1 + \gamma) \frac{dv}{dt}, \quad (1.6)$$

где $F_s = N_d F_d$ — сила тяги электровоза;

N_d — число двигателей электровоза;

W_0 — основное сопротивление движению электровоза;

$\gamma = 0,25$ — коэффициент инерции вращающихся частей.

Преобразование (1.6) дает

$$F_{д1} = P_{сц} \left[(1 + \gamma) 102 \frac{dv}{dt} + w_0^1 \right], \quad (1.7)$$

где $w_0^1 = 2$ — удельное основное сопротивление движению электровоза, Н/кН.

Оформление раздела 1

- 1.1. Номинальный ток двигателя I_n .
 - 1.2. Сопротивление обмоток двигателя r_d .
 - 1.3. Номинальная удельная ЭДС $C_v \Phi_n$.
 - 1.4. Номинальный ток возбуждения $I_{вн}$.
 - 1.5. Зависимость удельной ЭДС от тока возбуждения (кривая намагничивания). Значение $C_v \Phi$ рассчитайте для токов двигателя, приведенных в табл. 2 в относительных величинах.
 - 1.6. Зависимость силы тяги двигателя от тока двигателя (электротяговая характеристика). Значения F_d рассчитайте для токов двигателя, приведенных в табл. 2 в относительных величинах.
- Результаты расчетов по п. п. 1.5, 1.6 сведите в таблицу, в которой приведите расчетные значения I , I_v , $C_v \Phi$ и F_d . Графики зависимостей $C_v \Phi(I_v)$ и $F_d(I)$ постройте на листах формата А4.
- 1.7. Максимальная сила тяги двигателя при нулевой скорости $F_{d \max}$.
 - 1.8. Расчетная сила тяги двигателя при трогании на первой позиции $F_{д1}$.
 - 1.9. Максимальный ток двигателя при нулевой скорости $I_{\max}$ и ток двигателя при трогании на первой позиции $I_{тр1}$. Значения токов определяются из графика зависимости $F_d(I)$ по рассчитанным значениям $F_{d \max}$ и $F_{д1}$. Расчетные точки покажите на графике.

2. РАСЧЕТ ЧИСЛА ВИТКОВ ОБМОТОК ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Число витков обмотки трансформатора рассчитывается таким образом, чтобы на 33-й позиции (согласное включение нерегулируемой и всей регулируемой обмотки) напряжение на двигателях было равно заданному номинальному значению $U_{дн}$ при номинальном токе двигателей I_n .

Напряжение на двигателе U_d зависит от тока двигателя из-за зависимости от тока потерь в преобразовательной установке электровоза, в которую входят тяговый трансформатор, устройства регулирования переменного напряжения — главный контроллер и переходные реакторы, выпрямительные установки, сглаживающие реакторы.

При холостом ходе среднее значение выпрямленного напряжения U_{d0} связано с действующими значениями переменных напряжений U_{210} и U_{220} , подаваемых на выпрямительные установки соотношением

$$U_{d0} = \frac{0,9U_{210} + 0,9U_{220}}{2} \quad (2.1)$$

Здесь в условные обозначения напряжений добавлен индекс “0”, обозначающий режим холостого хода, при котором токи нагрузки преобразовательных установок равны нулю. Обозначив для 33-й позиции $U_{210} = U_{220}$ как $U_{20н}$, получим

$$U_{дн} = 0,9U_{20н} - \Delta U_{прн}, \quad (2.2)$$

где $\Delta U_{\text{прн}}$ - потери напряжения в преобразовательной установке на 33-й позиции.

Основная составляющая потерь напряжения обусловлена процессом коммутации вентилях [1, §10]. Угол коммутации зависит от реактивного сопротивления трансформатора x_T и от тока нагрузки выпрямительного моста. Кроме того, снижение выпрямленного напряжения под нагрузкой вызывается падениями напряжения на активных сопротивлениях трансформатора r_T и сглаживающего реактора $r_{\text{ср}}$, а также падением напряжения на диодах выпрямительного моста. Падение напряжения на диодах незначительно по сравнению с $U_{20\text{н}}$ и при расчете им можно пренебречь. Суммарные потери напряжения прямо пропорциональны выпрямленному току.

$$\Delta U_{\text{прн}} = I_{\text{н}} N_{\text{д}} R_{\text{эп}}, \quad (2.3)$$

где $N_{\text{д}}=2$ — число двигателей, питающихся от одной выпрямительной установки;

$R_{\text{эп}}$ — эквивалентное сопротивление преобразовательной установки на 33-й позиции.

Из (2.2) и (3) для номинального режима

$$U_{\text{дн}} = 0,9U_{20\text{н}} - I_{\text{н}} N_{\text{д}} R_{\text{эп}}, \quad (2.4)$$

Произведение $N_{\text{д}} R_{\text{эп}}$ называется приведенным к одному двигателю эквивалентным сопротивлением преобразовательной установки

$$R_{\text{эп}} = N_{\text{д}} R_{\text{э}}, \quad (2.5)$$

С учетом $R_{\text{эп}}$ преобразуется выражение (4)

$$U_{\text{дн}} = 0,9U_{20\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{эпн}} \quad (2.6)$$

Из (2.6) можно определить переменное напряжение холостого хода, при котором обеспечивается заданное условие расчета — на 33-й позиции при номинальным токе напряжение на двигателях должно быть номинальным

$$U_{20\text{н}} = 1,11(U_{\text{дн}} + I_{\text{н}} R_{\text{эпн}}). \quad (2.7)$$

Зависимость приведенного эквивалентного сопротивления от параметров устройств преобразовательной установки рассмотрена в [1, §10; 3, с. 79-82]

$$R_{\text{эп}} = N_{\text{д}}(0,7x_T + 0,7r_T + 1,04r_{\text{ср}}) \quad (2.8)$$

Значения x_T и r_T зависят от числа витков вторичной обмотки и, следовательно, меняются от позиции к позиции. Обозначая эти параметры для 33-й позиции $x_{\text{тн}}$ и $r_{\text{тн}}$, получаем

$$R_{\text{эпн}} = N_{\text{д}}(0,7x_{\text{тн}} + 0,7r_{\text{тн}} + 1,04r_{\text{ср}}). \quad (2.9)$$

Номинальное реактивное сопротивление трансформатора

$$x_{\text{тн}} = \frac{1,25U_{\%}U_{\text{д}}}{100N_{\text{д}}I}, \quad (2.10)$$

где $U_{\%} = 10$ — реактивные потери напряжения в трансформаторе, определяемые из опыта короткого замыкания и выраженные в процентах от номинального переменного напряжения.

Коэффициентом 1,25 в (2.10) учитывается соотношение между номинальным напряжением на двигателе и переменным напряжением

холостого хода на 33-й позиции (см. [3, с. 81]). Там же приведено соотношение между $x_{тн}$ и $r_{тн}$

$$x_{тн} = (7,7 \div 8,9)r_{тн}.$$

Для расчета принимаем среднее значение

$$r_{тн} = 0,12x_{тн}. \quad (2.11)$$

Активное сопротивление сглаживающего реактора принимается равным 0,007 Ом, что соответствует сопротивлению реактора электровоза ВЛ80°.

Число витков вторичной обмотки W_2 на 33-й позиции складывается из числа витков регулируемой обмотки W_p и числа витков нерегулируемой обмотки $W_{нр}$, причем $W_{нр} > W_p$. От разности $W_{нр}$ и W_p зависит напряжение на двигателях на первой позиции. Эту разность обозначаем W_{21} . Смысл индекса “21” — число витков вторичной обмотки на первой позиции

$$W_{21} = W_{нр} - W_p. \quad (2.12)$$

Соотношение между напряжением на обмотке трансформатора при холостом ходе и числом витков этой обмотки обозначается E_0 . Величина E_0 зависит от мощности трансформатора. Для тяговых трансформаторов грузовых электровозов $E_0 = 18 \div 22$ В/виток. Для расчета принимаем среднее значение $E_0 = 20$ В/виток. Тогда переменное значение напряжения на первой позиции при холостом ходе определяется выражением

$$U_{201} = E_0 W_{21}, \quad (2.13)$$

а напряжение на двигателе на первой позиции

$$U_{д1} = 0,9U_{201} - I_{тр1}R_{эп1} - \Delta U_{вы}, \quad (2.14)$$

где $R_{эп1}$ — приведенное эквивалентное сопротивление преобразовательной установки на первой позиции;

$\Delta U_{вы}$ — падение напряжения на диодах выпрямительной установки.

На первой позиции $\Delta U_{вы}$ оказывается соизмеримым с напряжением на двигателе $U_{д}$ и поэтому пренебрегать им нельзя. Ориентировочное значение $\Delta U_{вы}$ при токе двигателей, равном току трогания на первой позиции, составляет 10 В.

При нулевой скорости ток двигателя на первой позиции $I_{тр1}$ можно принять около 200А. Учитывая, что при $V = 0$ $U_{д} = I_{гд}$, из (2.13) и (2.14) получаем

$$W_{21} = \frac{I_{тр1}(R_{эп1} + r_{д}) + \Delta U_{вы}}{0,9E_0}. \quad (2.15)$$

При расчете W_{21} принимается $R_{эп1} = 1,3 R_{эпн}$. Увеличение $R_{эп}$ на первой позиции по сравнению с его номинальным значением связано с увеличением потоков рассеяния при встречном включении обмоток [3, с. 82], а также с наличием в цепи протекания тока двигателей полуобмотки переходного реактора.

Результат расчета по формуле (2.15) округляется до ближайшего целого числа.

Регулируемая обмотка имеет четыре секции, все они имеют одинаковое число витков W_c . Суммарное число витков обмотки на 33-й позиции

$$W_2 = W_{np} + W_p = W_{21p} + 2W_p = W_{21p} + 8W_c, \quad (2.16)$$

где W_{21p} — округленный до целого числа результат расчета по формуле (2.15).

В то же время

$$W_2 = \frac{U_{20H}}{E_0}. \quad (2.17)$$

Из (2.16) и (2.17) получаем

$$W_c = 0,125 \left(\frac{U_{20H}}{E_0} - W_{21p} \right). \quad (2.18)$$

Результат расчета по формуле (18) округляется до ближайшего целого числа, округленное значение обозначается W_{cp} — расчетное число витков секции трансформатора.

Расчетное (уточненное с учетом округлений до целого W_{21} и W_c) число витков вторичных обмоток на 33-й позиции

$$W_{2p} = W_{21p} + 8W_{cp} \quad (2.19)$$

Расчетное значение ЭДС обмоток, приходящееся на один виток,

$$E_{op} = \frac{U_{20}}{W_{2p}}. \quad (2.20)$$

По значению E_{op} и напряжению контактной сети $U_{kc} = 25000$ В определяется число витков первичной обмотки трансформатора W_1 и коэффициент трансформации $k_{тн}$ на 33-й позиции.

Для конструктивного расчета трансформатора нужно знать токи первичной и вторичной обмоток $I_{1н}$ и $I_{2н}$ в номинальном режиме. При ориентировочном расчете форма тока вторичных обмоток трансформатора принимается прямоугольной [1, рис. 38], при этом действующее значение переменного тока равно выпрямленному току. При расчете номинального тока первичной обмотки нужно учесть общее количество двигателей, которые получают питание от вторичных обмоток, и полученное значение увеличить на 10% для учета потребления вспомогательных цепей и тока намагничивания трансформатора.

Оформление раздела 2.

- 2.1. Реактивное сопротивление трансформатора на 33-й позиции $x_{тн}$.
- 2.2. Активное сопротивление трансформатора на 33-й позиции $r_{тн}$.
- 2.3. Приведенное эквивалентное сопротивление преобразовательной установки на 33-й позиции $R_{эпн}$.
- 2.4. Расчетная схема для определения напряжения на двигателе.
- 2.5. Переменное напряжение холостого хода на 33-й позиции $U_{20н}$.
- 2.6. Схема соединения обмоток трансформатора на 1 и 33 позициях.

- 2.7. Разность между числом витков нерегулируемой и регулируемой обмоток W_{21} .
- 2.8. Число витков секции регулируемой обмотки W_c .
- 2.9. Суммарное число витков вторичных обмоток на 33-й позиции W_{2p} .
- 2.10. Расчетное значение ЭДС обмоток, приходящееся на один виток, E_{op} .
- 2.11. Число витков первичной обмотки трансформатора W_1 .
- 2.12. Коэффициент трансформации трансформатора $k_{тн}$ на 33-й позиции.
- 2.13. Ток вторичных обмоток в номинальном режиме $I_{2н}$.
- 2.14. Ток первичной обмотки в номинальном режиме $I_{1н}$.

3. ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Как уже отмечалось, среднее значение выпрямленного напряжения и равное ему напряжение на двигателях уменьшаются с увеличением тока двигателей из-за изменения потерь в преобразовательной установке

$$U_d = U_{d0} - IR_{эп}, \quad (3.1)$$

где U_{d0} — выпрямленное напряжение холостого хода;
 $R_{эп}$ — приведенное эквивалентное сопротивление преобразовательной установки.

Зависимость (3.1) называется внешней характеристикой преобразовательной установки.

Значения U_{d0} и $R_{эп}$ меняются от позиции к позиции. На первой позиции величина U_{d0} зависит от разности чисел витков нерегулируемой и регулируемой обмоток

$$U_{d01} = 0,9E_{op}W_{21p}. \quad (3.2)$$

При переходе с позиции на позицию значение U_{d0} изменяется на половину напряжение секции $0,5 U_c$. При холостом ходе напряжение секции

$$U_{c0} = E_{op}W_{cp}. \quad (3.3)$$

При каждом переходе с позиции i на позицию $i+1$ выпрямленное напряжение холостого хода меняется на одну и ту же величину

$$\Delta U_{d0} = U_{d0(i+1)} - U_{d0i} = 0,9 \frac{E_{op}W_{cp}}{4}. \quad (3.4)$$

Выпрямленное напряжение холостого хода на любой i -й позиции

$$U_{d0i} = U_{d01} + (i - 1)\Delta U_{d0}. \quad (3.5)$$

Напряжение на двигателе на i -й позиции

$$U_{di} = U_{d0i} - IR_{эпи}, \quad (3.6)$$

где $R_{эпи}$ — приведенное эквивалентное сопротивление преобразовательной установки на i -й позиции.

В контрольной работе значение $R_{эпi}$ определяется по эмпирической зависимости

$$R_{эпi} = R_{эпн}[2,3(C_{pi} - 0,6)^2 + 0,11C_{pi} + 0,522], \quad (3.7)$$

где $R_{эпн}$ — рассчитанное ранее значение $R_{эп}$ на 33-й позиции;

C_{pi} — коэффициент регулирования напряжения на i -й позиции

$$C_{pi} = \frac{U_{d0i}}{U_{d0}}. \quad (3.8)$$

График зависимости U_{di} (I) представляет из себя прямую линию. Строится он по двум расчетным точкам, которые выбираются таким образом, чтобы характеристики лежали в рабочем диапазоне токов и напряжений. Первой точкой является U_d при $I = 0$, т. е. значение U_{d0i} . Чтобы не получить отрицательных значений расчетных напряжений, вторые точки для начальных позиций 1 — 6 берутся на оси абсцисс, т. е. они отвечают условию $U_{di} = 0$, для которого расчетный ток I_{pi} определяется из (3.6)

$$I_{pi} = \frac{U_{d0i}}{R_{эпi}}. \quad (3.9)$$

Для остальных позиций в качестве расчетного возьмите ток $I_p = 1,75I_n$. Результаты расчета сведите в таблицу, в которой укажите номер позиции, U_{d0i} , C_{pi} , $R_{эпi}$, I_{pi} , U_{di} при I_{pi} .

Оформление раздела 3

3.1. Выпрямленное напряжение холостого хода на первой позиции U_{d01} .

3.2. Приращение выпрямленного напряжения холостого хода при переходе с позиции на позицию ΔU_{d0} .

3.3. Выпрямленные напряжения холостого хода U_{d0i} на позициях 2 — 33.

3.4. Коэффициент регулирования напряжения C_{pi} на позициях 1 — 33.

3.5. Эквивалентные сопротивления преобразовательной установки $R_{эпi}$ на позициях 1 — 33.

3.6. Расчетные токи I_{pi} для позиций 1 — 6.

3.7. Напряжения на двигателе U_{di} при расчетном токе.

При оформлении пунктов 3.3 — 3.7 приведите примеры расчетов для любой одной позиции. Остальные результаты сведите в расчетную таблицу.

3.8. Таблица расчета точек внешних характеристик.

3.9. Графики внешних характеристик преобразовательной установки. Все графики постройте на одном листе формата А4, характеристики пронумеруйте в соответствии с номером позиции.

Основная литература

1. Плакс А.В. Системы управления электроподвижным составом. «Маршрут», 2005.

Дополнительная литература

1. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1980.
2. Проектирование систем управления электроподвижным составом/Н.А. Ротанов, Д.Д. Захарченко, А.В. Плакс, В.И. Некрасов, Ю.М. Иньков. Под ред. Н.А. Ротанова – М.: Транспорт, 1986.
3. Электровоз ВЛ80^с. Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1990.