

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА –
филиал ФГБОУ ВО
«Иркутский государственный университет путей сообщения»

В. О. КОЛМАКОВ
О. В. КОЛМАКОВ

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания
по выполнению контрольной работы
для студентов заочной формы обучения
специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов
специализация «Электроснабжение железных дорог»

Красноярск
КрИЖТ ИрГУПС
2022

УДК 621.331

К 60

Рецензент:

С. М. Плотников, доктор технических наук, профессор, Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».

Колмаков, В. О. Энергосбережение в системах электроснабжения : методические указания по выполнению контрольной работы для студентов заочной формы обучения специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов специализация «Электроснабжение железных дорог» / В. О. Колмаков, О. В. Колмаков ; КрИЖТ ИрГУПС. – Красноярск : КрИЖТ ИрГУПС, 2022. – 27 с.

Методические указания по выполнению контрольной работы разработаны на основе рабочей программы учебной дисциплины Б1.В.ДВ.05.01 «Энергосбережение в системах электроснабжения».

Рекомендовано к изданию методическим советом КрИЖТ ИрГУПС

Печатается в авторской редакции

© Колмаков В. О., Колмаков О. В., 2022
© Красноярский институт
железнодорожного транспорта, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»	4
ОЦЕНИВАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ	5
ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	5
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ	6
Расчет нагрузок	9
Расчет сопротивления тяговой сети переменного тока	10
Расчет сопротивления тяговой сети двухпутного участка между подстанциями 1 и 2	14
Расчет потерь мощности и энергии.....	20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	23
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ.....	24
Приложение А	26

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания предназначены для изложения требований к выполнению контрольной работы по дисциплине «Энергосбережение в системах электроснабжения» студентов заочной формы обучения специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» специализации №1 «Электроснабжение железных дорог».

Цель методических указаний: оказание помощи студентам в выполнении контрольной работы и осуществлении ее защиты.

Контрольная работа – это:

1) один из видов самостоятельной работы студентов в вузе, направленный на выявление уровня усвоения учебного материала по определенной теме, конкретной учебной дисциплине за определенный период обучения (возможен в тестовой форме);

2) документ, представляющий собой форму отчетности по самостоятельной работе обучающегося в процессе изучения конкретной учебной дисциплины.

Содержание и трудоемкость контрольной работы определяется спецификой конкретной дисциплины в соответствующей рабочей программе для заочной формы обучения. Дисциплина «Энергосбережение в системах электроснабжения» относится к дисциплинам по выбору и изучается на 5 курсе.

ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»

Настоящие методические указания содержат подробный план и описание работ, которые позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по специальности, опытом творческой и исследовательской деятельности.

В результате освоения дисциплины «Энергосбережение в системах электроснабжения» обучающийся должен достигнуть следующих результатов образования:

Обучающийся должен знать:

фундаментальные инженерные теории для расчета параметров и технических характеристик энергосберегающего оборудования в системах электроснабжении при модернизации оборудования тяговых и трансформаторных подстанций, линейных устройств системы тягового электроснабжения.

Обучающийся должен уметь:

разрабатывать организационные и технические мероприятия для

обеспечения энергосберегающей и энергоэффективной работы оборудования при технической эксплуатации тяговых и трансформаторных подстанций, линейных устройств системы тягового электроснабжения.

Обучающийся должен владеть:

методами реализации энергосберегающих технологий эксплуатации, сервисного обслуживания и ремонта оборудования в системах электроснабжения.

ОЦЕНИВАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Контрольная работа выполняется студентом по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель выдает задание на выполнение контрольной работы на установочной сессии и оценивает качество ее выполнения на последующей сессии согласно расписанию занятий в аудитории. Выполнив работу, обучающийся регистрирует ее в деканате заочного обучения и сдает на проверку до начала основной сессии.

Критериями оценки контрольной работы обучающегося являются:

- уровень освоения студентом учебного материала (качество знаний);
- умение использовать теоретические знания в решении практических задач;
- новизна используемого материала;
- обоснованность и четкость изложения ответов;
- оформление письменных работ соответственно требованиям преподавателя.

Формы проведения контроля определяются преподавателем. К ним относятся:

- собеседование;

Оценка качества выполнения контрольной работы является одним из условий получения допуска к экзамену по данной дисциплине.

Фонды оценочных средств, включающие типовые задания, контрольные работы, тесты и методы контроля, позволяющие оценить результаты обучения по данной дисциплине, включены в состав РПД.

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

При выполнении контрольной работы обучающемуся необходимо:

- подобрать литературу по выбранным вопросам контрольной работы и изучить ее;

– решить задачу.

Контрольная работа выполняется на листах формата А4 с соблюдением основных требований ГОСТа и Положения «Требования к текстовой и графической документации. Нормоконтроль» КрИЖТ ИрГУПС, 2019 г. [хх]:

1) параметры страницы: слева – не менее 25 мм, справа – не менее 10 мм, снизу и сверху – не менее 20 мм;

2) шрифт основного текста – Times New Roman 14 кегль;

Контрольная работа включает следующие части:

- титульный лист (Приложение А);
- лист задания с номером варианта и описанием задания;
- содержание или план работы;
- введение;
- выполненные задания;
- заключение;
- список использованных источников.

На титульном листе контрольной работы необходимо указать дату ее выполнения и поставить свою подпись.

Работы, выполненные не по варианту, на рецензирование не принимаются. Объем контрольной работы должен составлять от 10 до 15 страниц.

Список рекомендуемых информационных ресурсов, который является заключительной частью методических указаний по выполнению контрольной работы, должен содержать актуальные источники информации, имеющиеся в библиотеке КрИЖТ ИрГУПС <http://irbis.krsk.irkups.ru/>.

Работа выполняется и сдается в соответствии с «Инструкцией по сдаче, регистрации, проверке, хранению контрольных, расчетно-графических работ, лабораторных работ, отчетов по практике, курсовых работ (проектов) и выпускных квалификационных работ» в установленные учебным процессом сроки. <http://insite.krsk.irkups.ru/polozeniya-reglamentiruyuschie-deyatelnost-krizht-irkups/razrabotannye-v-krizht/deloproizvodstvo/Instrukciya%20po%20sdache%2C%20registracii%2C%20hraneniyu%20kontrolnyh%2C%20rgr%2C%20lr%2C%20otchetov%20po%20praktike%2C%20kursovyh%2C%20VKR.pdf>

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Таблица 1 – Годовые нагрузки на участке железной дороги между подстанциями 1 и 2

Вариант	Участок «Подстанция 1 –	P, кВт	Q, кВАр
----------------	------------------------------------	---------------	--------------------

	подстанция 2»		
1	Подстанция 1 – Подстанция 2	8599	5958
2		7423	5296
3		5217	4248
4		6217	5289
5		9546	7532
6		8621	7512
7		5421	3265
8		8649	7235
9		6215	5421
10		9554	7625
11		8523	6523
12		7523	5412
13		6985	4562
14		7458	5478
15		5214	4125
16		6985	5896
17		8523	4563
18		2589	1236
19		6842	4268
20		9875	7412
21		7854	6541
22		5896	3698
23		8523	6325
24		9513	7531
25		6549	4561
26		7895	5236
27		5285	4654
28		7982	6934
29		5562	4822
30		7283	4681

Таблица 2 – Длины участков

Вариант	Участок	l_{12}	l_{23}	l_{34}	l_{45}	l_{56}
1	Длина, км	3,2	8	33,2	5,5	1,3
2		3,6	5	25	3,4	2,9
3		5,3	8,0	25,7	6,4	2,5
4		9,5,	11,0	34,0	5,7	1,8
5		4,5	9,0	53,0	17,0	7,7
6		3,2	8	33,2	5,5	1,3

Вариант	Участок	l_{12}	l_{23}	l_{34}	l_{45}	l_{56}
7		3,6	5	25	3,4	2,9
8		5,3	8,0	25,7	6,4	2,5
9		9,5	11,0	34,0	5,7	1,8
10		4,5	9,0	53,0	17,0	7,7
11		3,2	8	33,2	5,5	1,3
12		3,6	5	25	3,4	2,9
13		5,3	8,0	25,7	6,4	2,5
14		9,5	11,0	34,0	5,7	1,8
15		4,5	9,0	53,0	17,0	7,7
16		3,2	8	33,2	5,5	1,3
17		3,6	5	25	3,4	2,9
18		5,3	8,0	25,7	6,4	2,5
19		9,5	11,0	34,0	5,7	1,8
20		4,5	9,0	53,0	17,0	7,7
21		3,2	8	33,2	5,5	1,3
22		3,6	5	25	3,4	2,9
23		5,3	8,0	25,7	6,4	2,5
24		9,5	11,0	34,0	5,7	1,8
25		4,5	9,0	53,0	17,0	7,7
26		3,2	8	33,2	5,5	1,3
27		3,6	5	25	3,4	2,9
28		5,3	8,0	25,7	6,4	2,5
29		9,5	11,0	34,0	5,7	1,8
30		4,5	9,0	53,0	17,0	7,7

Таблица 3 – Параметры тяговой сети

Тип тяговой сети	Активное сопротивление		Сопротивление взаимной индукции между 1 и 2 путями
	$R_{кп1}$, Ом/км	$R_{нт1}$, Ом/км	M_{12} , Ом/км
ПБСМ1-95 + МФ100 + Р65 (без усиливающего провода)	0,177	0,575	0,027
ПБСМ1-95+МФ100+А185+ Р65 (с усиливающим проводом)	0,138	0,332	0,035

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

При использовании обычных тяговых трансформаторов расход энергии выше, чем при использовании компенсированных, т. к. потери напряжения и мощности в тяговой сети при обычных трансформаторах превышают соответствующие значения компенсированных.

Определить разницу в потерях при использовании компенсированных и обычных трансформаторов.

Расчет нагрузок

Среднюю активную и реактивную нагрузки на участке между подстанциями 1 и 2 за рассматриваемый период (1 год), определим по данным статистической отчетности об основных показателях работы тяговых подстанций дистанций электроснабжения (приложение 1, таблица 1).

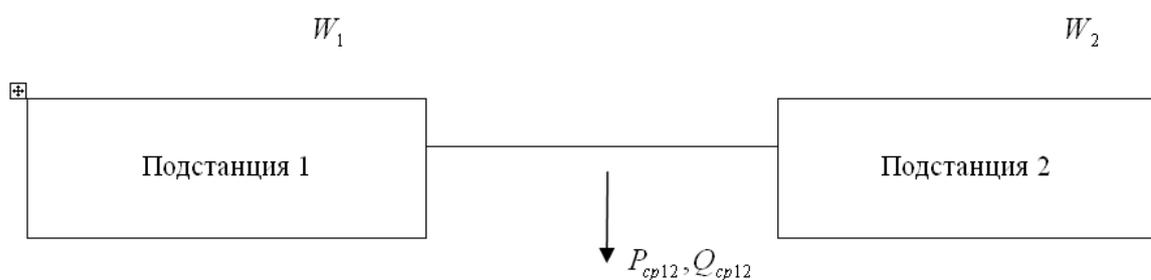


Рисунок 1 – Схема рассматриваемого участка железной дороги

Среднюю нагрузку, приходящуюся на участок железной дороги, определим по формуле, кВт

$$S_{cp} = \frac{(W_1 + W_2)/2}{8760} \quad (1)$$

где W_1, W_2 - энергия, потребляемая на тягу поездов за год тяговыми подстанциями, питающих рассматриваемый участок железной дороги.

Используя выражение (1) определим среднюю активную нагрузку на тягу поездов, приходящуюся на участок ЖД между подстанциями 1 и 2, кВт

$$P_{cp12} = \frac{(W_{a1} + W_{a2})/2}{8760} = \frac{(72910310 + 77740197)/2}{8760} = 8599 \quad (2)$$

где W_{a1} - активная энергия, потребляемая на тягу поездов за год тяговой подстанцией 1, кВт·ч;

W_{a2} - активная энергия, потребляемая на тягу поездов за год тяговой подстанцией 2, кВт·ч;

8760 - количество часов в году, ч.

Используя выражение (2), определим среднюю реактивную нагрузку на тягу поездов, приходящуюся на участок ЖД между подстанциями 1 и 2, кВАр:

$$Q_{cp12} = \frac{(W_{p1} + W_{p2})/2}{8760} = \frac{(677445552 + 366229369)/2}{8760} = 5958, \quad (3)$$

где W_{p1} - реактивная энергия, потребляемая на тягу поездов за год тяговой подстанцией 1, кВАр·ч;

W_{p2} - реактивная энергия, потребляемая на тягу поездов за год тяговой подстанцией 2, кВАр·ч.

Потребление активной электроэнергии на участке ЖД определим по формуле, кВтч:

$$W = P_{cp} \times 8760 \quad (4)$$

где P_{cp} - средняя активная нагрузка, приходящаяся на участок ЖД, кВт.

Согласно выражению (4), потребление активной электроэнергии на участке между подстанциями 1 и 2, кВтч:

$$W_{12} = P_{cp} \times 8760 = 8599 \times 8760 = 75327240$$

Результаты расчета нагрузок и потребления активной электроэнергии участка железной дороги между подстанциями 1 и 2 сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчета нагрузок участка железной дороги между подстанциями 1 и 2

Участок	P, кВт	Q, кВАр	W, кВт·ч
Подстанция 1 – подстанция 2	8599	5958	75327240

Расчет сопротивления тяговой сети переменного тока

Схема расположения проводов тяговой сети однопутного участка и расстояния между ними указаны на рисунке 2.

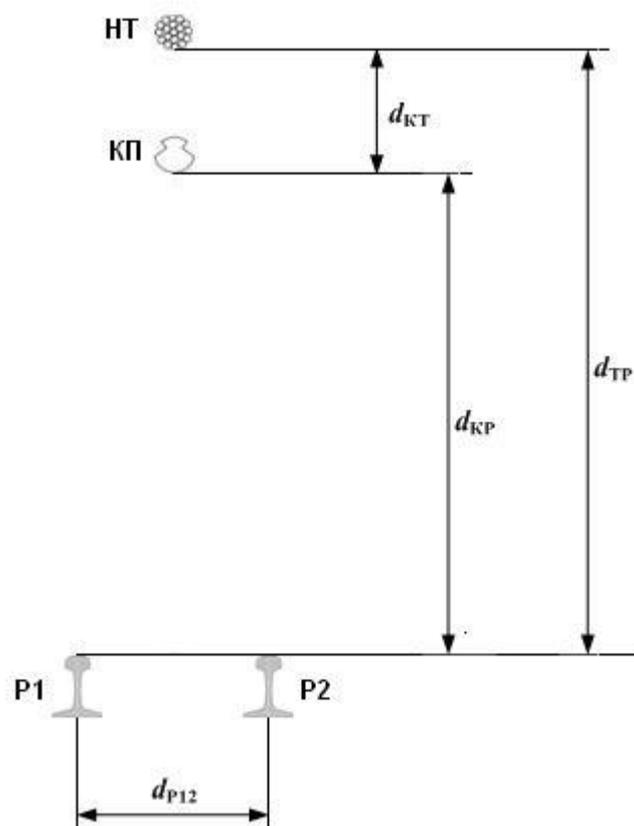


Рисунок 2 – Схема расположения проводов тяговой сети однопутного участка
КП – контактный провод; *НТ* – несущий трос; *Р1, Р2* – рельс 1 и 2.

Эквивалентное активное сопротивление контактной сети однопутного участка

$$R_{KC} = \frac{(R_{KP} \times R_{HT} + 0,126)}{R_{KP} + R_{HT} + 0,504/(R_{KP} + R_{HT})} \times l \quad (5)$$

где l - длина участка контактной сети, км;

R_{KP} - активное сопротивление КП, Ом/км;

R_{HT} - активное сопротивление НТ, Ом/км.

Эквивалентное реактивное сопротивление контактной сети однопутного участка, Ом:

$$X_{KC} = \left(\frac{0,355 \times (R_{KP}^2 + R_{HT}^2) + 0,09}{(R_{KP}^2 + R_{HT}^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times l \quad (6)$$

где X_{KP} - сопротивление контактного провода, Ом/км;

X_{HT} - реактивное сопротивление несущего троса, Ом/км.

Эквивалентное активное сопротивление рельса, Ом:

$$R_{pэ} = 0.5 \times R_{pa} \times 1 \quad (7)$$

где $R_{pa}=0,19$ - активное сопротивление 1 км одиночного рельса, Ом/км.

Эквивалентное реактивное сопротивление рельса рассчитывается по формуле:

$$X_{pэ} = (0,375 \times R_{pa} + 0,0628 \ln(\frac{d_{кр}}{P_{pэ1}})) \times 1 \quad (8)$$

где $d_{кр}$ - высота эквивалентного контактного провода относительно уровня головки рельса (УГР);

$P_{pэ1}$ - радиус окружности, равный площади сечения рельса:

$$P_{pэ1} = \sqrt{P_p \times d_{p12}} \quad (9)$$

где $d_{p12} = 1440$ мм - расстояние между осями рельсов;

P_p - радиус рельса:

$$P_p = \sqrt{\frac{S_{p65}}{\pi}} \quad (10)$$

где $S_{p65} = 82,6$ см² - площадь рельса Р65.

Результирующее сопротивление тяговой сети однопутного участка:

$$Z_{10} = Z_{1RC} + j Z_{1p} \quad (11)$$

Тогда результирующее сопротивление тяговой сети двухпутного участка:

$$Z_o = \frac{Z_o^{(1)} \times Z_o^{(2)}}{Z_o^{(1)} + Z_o^{(2)}} \quad (12)$$

Рассчитаем сопротивление тяговой сети двухпутного участка для заданного типа подвески. Расчёт сопротивлений контактной сети производится только для главных путей, боковые пути на станциях не берут во внимание, так как сопротивление на боковых путях большой роли в расчётах не играет.

Параметры тяговой сети приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры тяговой сети

Тип тяговой сети	Активное сопротивление		Сопротивление взаимной индукции между 1 и 2 путями
	$R_{\text{КП1}},$ Ом/км	$R_{\text{НТ1}},$ Ом/км	$M_{12},$ Ом/км
ПБСМ1-95 + МФ100 + Р65 (без усиливающего провода)	0,177	0,575	0,027
ПБСМ1-95+МФ100+А185+ Р65 (с усиливающим проводом)	0,138	0,332	0,035

Общее значение сопротивления контактного провода и несущего троса без усиливающего провода с учётом сопротивления взаимной индукции между 1 и 2 путями, Ом/км:

$$R_{\text{КП}} = R_{\text{КП1}} + M_{1,2} = 0,177 + 0,027 = 0,204; \quad (13)$$

$$R_{\text{НТ}} = R_{\text{НТ1}} + M_{1,2} = 0,575 + 0,027 = 0,602 \quad (14)$$

Общее значение сопротивления контактного провода и несущего троса с усиливающим проводом А185 и с учётом сопротивления взаимной индукции между 1 и 2 путями, Ом/км:

$$R_{\text{КПУ}} = R_{\text{КПУ1}} + M_{1,2у} = 0,138 + 0,035 = 0,173; \quad (15)$$

$$R_{\text{НТУ}} = R_{\text{НТУ1}} + M_{1,2у} = 0,332 + 0,035 = 0,367 \quad (16)$$

Далее расчёт сопротивлений производится для пяти участков перегона между подстанциями 1 и 2, рисунок 3.

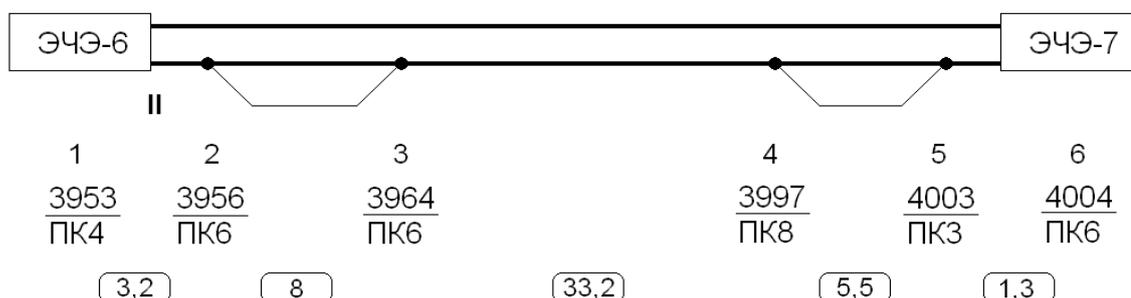


Рисунок 3 – Схема участка контактной сети между подстанциями 1 и 2

Расстояния участков перегона между подстанциями 1 и 2 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – длины участков железной дороги

Участок	l_{12}	l_{23}	l_{34}	l_{45}	l_{56}
Длина, км	3,2	8	33,2	5,5	1,3

Расчет сопротивления тяговой сети двухпутного участка между подстанциями 1 и 2

Эквивалентное активное сопротивление контактной сети однопутного участка (2-го пути) перегона между подстанциями 1 и 2 согласно выражению (5), Ом:

$$R_{12КС} = \frac{(R_{КП} \times R_{НТ} + 0,126)}{R_{КП} + R_{НТ} + \frac{0,504}{R_{КП} + R_{НТ}}} \times l_{12} =$$

$$= \frac{(0,204 \times 0,602 + 0,126)}{0,204 + 0,602 + \frac{0,504}{0,204 + 0,602}} \times 3,2 = 0,556;$$

$$R_{23КС} = \frac{(R_{КПУ} \times R_{НТУ} + 0,126)}{R_{КПУ} + R_{НТУ} + \frac{0,504}{R_{КПУ} + R_{НТУ}}} \times l_{23} =$$

$$= \frac{(0,173 \times 0,367 + 0,126)}{0,173 + 0,367 + \frac{0,504}{0,173 + 0,367}} \times 8 = 1,029;$$

$$R_{34КС} = \frac{(R_{КП} \times R_{НТ} + 0,126)}{R_{КП} + R_{НТ} + \frac{0,504}{R_{КП} + R_{НТ}}} \times l_{34} =$$

$$= \frac{(0,204 \times 0,602 + 0,126)}{0,204 + 0,602 + \frac{0,504}{0,204 + 0,602}} \times 33,2 = 5,771;$$

$$R_{45KC} = \frac{(R_{КПУ} \times R_{НТУ} + 0,126)}{R_{КПУ} + R_{НТУ} + \frac{0,504}{R_{КПУ} + R_{НТУ}}} \times l_{45} =$$

$$= \frac{(0,173 \times 0,367 + 0,126)}{0,173 + 0,367 + \frac{0,504}{0,173 + 0,367}} \times 5,5 = 0,707;$$

$$R_{56KC} = \frac{(R_{КП} \times R_{НТ} + 0,126)}{R_{КП} + R_{НТ} + \frac{0,504}{R_{КП} + R_{НТ}}} \times l_{56} =$$

$$= \frac{(0,204 \times 0,602 + 0,126)}{0,204 + 0,602 + \frac{0,504}{0,204 + 0,602}} \times 1,3 = 0,226.$$

Общее эквивалентное активное сопротивление контактной сети однопутного участка (2-го пути) между подстанциями 1 и 2, Ом:

$$R_{16KC} = R_{12KC} + R_{23KC} + R_{34KC} + R_{45KC} + R_{56KC} \quad (17)$$

$$R_{16KC} = 0,556 + 1,029 + 5,771 + 0,707 + 0,226 = 8.$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление контактной сети однопутного участка (2-го пути) перегона между подстанциями 1 и 2 согласно выражению (6), Ом:

$$X_{12KC} = \left(\frac{0,355 \times (R_{КП}^2 + R_{НТ}^2) + 0,09}{(R_{КП}^2 + R_{НТ}^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times l_{12} =$$

$$= \left(\frac{0,355 \times (0,204^2 + 0,602^2) + 0,09}{(0,204^2 + 0,602^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times 3,2 = 1,162;$$

$$X_{23KC} = \left(\frac{0,355 \times (R_{КПУ}^2 + R_{НТУ}^2) + 0,09}{(R_{КПУ}^2 + R_{НТУ}^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times l_{23} =$$

$$= \left(\frac{0,355 \times (0,173^2 + 0,367^2) + 0,09}{(0,173^2 + 0,367^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times 8 = 2,624;$$

$$X_{34KC} = \left(\frac{0,355 \times (R_{КП}^2 + R_{HT}^2) + 0,09}{(R_{КП}^2 + R_{HT}^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times l_{34} =$$

$$= \left(\frac{0,355 \times (0,204^2 + 0,602^2) + 0,09}{(0,204^2 + 0,602^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times 33,2 = 12,05;$$

$$X_{45KC} = \left(\frac{0,355 \times (R_{КПУ}^2 + R_{HTУ}^2) + 0,09}{(R_{КПУ}^2 + R_{HTУ}^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times l_{45} =$$

$$= \left(\frac{0,355 \times (0,173^2 + 0,367^2) + 0,09}{(0,173^2 + 0,367^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times 5,5 = 1,804;$$

$$X_{56KC} = \left(\frac{0,355 \times (R_{КП}^2 + R_{HT}^2) + 0,09}{(R_{КП}^2 + R_{HT}^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times l_{56} =$$

$$= \left(\frac{0,355 \times (0,204^2 + 0,602^2) + 0,09}{(0,204^2 + 0,602^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times 1,3 = 0,472.$$

Общее эквивалентное индуктивное сопротивление контактной сети однопутного участка (2-го пути) от 1 станции до 2 станции, Ом:

$$X_{16KC} = X_{12KC} + X_{23KC} + X_{34KC} + X_{45KC} + X_{56KC} \quad (18)$$

$$X_{16KC} = 1,162 + 2,624 + 12,05 + 1,804 + 0,472 = 18,12$$

Комплексное сопротивление контактной сети однопутного участка (2-го пути) между подстанциями 1 и 2, Ом:

$$Z_{16KC} = R_{16KC} + jX_{16KC} = 8,289 + j18,12 \quad (19)$$

Эквивалентное активное сопротивление рельса марки R65 для участков перегона между подстанциями 1 и 2 согласно (37), Ом:

$$R_{p\dot{a}12} = 0,5 \times R_{pa} \times l_{12} = 0,5 \times 0,19 \times 3,2 = 0,304;$$

$$R_{p\dot{a}23} = 0,5 \times R_{pa} \times l_{23} = 0,5 \times 0,19 \times 8 = 0,76;$$

$$R_{p\dot{a}34} = 0,5 \times R_{pa} \times l_{34} = 0,5 \times 0,19 \times 33,2 = 3,154;$$

$$R_{p\dot{a}45} = 0,5 \times R_{pa} \times l_{45} = 0,5 \times 0,19 \times 5,5 = 0,523;$$

$$R_{p\dot{a}56} = 0,5 \times R_{pa} \times l_{56} = 0,5 \times 0,19 \times 1,3 = 0,124.$$

Общее эквивалентное активное сопротивление рельса марки R65 для перегона между подстанциями 1 и 2, Ом:

$$R_{pэ16} = R_{pэ12} + R_{pэ23} + R_{pэ34} + R_{pэ45} + R_{pэ56} \quad (20)$$

$$R_{pэ16} = 0,304 + 0,76 + 3,154 + 0,523 + 0,124 = 4,864$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление рельса марки R65 для участков перегона между подстанциями 1 и 2 согласно (8), Ом:

$$X_{pэ12} = (0,375 \times R_{pa} + 0,0628 \ln(\frac{d_{KP}}{P_{pэ1}})) \times l_{12}$$

$$X_{pэ12} = (0,375 \times 0,19 + 0,0628 \ln(\frac{6}{0,272})) \times 3,2 = 0,85.$$

где $d_{kp} = 6$ м - высота эквивалентного контактного провода относительно уровня головки рельса (УГР);

$P_{pэ1}$ - радиус окружности, равный площади сечения рельса, согласно (9), м:

$$P_{pэ1} = \sqrt{P_p \times d_{p12}} = \sqrt{0,051 \times 1,14} = 0,272.$$

где $d_{p12} = 1440$ мм - расстояние между осями рельсов;

P_p - радиус рельса, согласно (10), м:

$$P_p = \sqrt{\frac{S_{p65}}{\pi}} = \sqrt{\frac{82,6}{3,14}} = 0,051.$$

где $S_{p65} = 82,6$ см² - площадь рельса Р65.

$$\begin{aligned} X_{pэ23} &= (0,375 \times R_{pa} + 0,0628 \ln(\frac{d_{KP}}{P_{pэ1}})) \times l_{23} = \\ &= (0,375 \times 0,19 + 0,0628 \ln(\frac{6}{0,272})) \times 8 = 2,124; \end{aligned}$$

$$X_{p\dot{3}4} = (0,375 \times R_{pa} + 0,0628 \ln(\frac{d_{KP}}{P_{p\dot{3}1}})) \times l_{34} =$$

$$= (0,375 \times 0,19 + 0,0628 \ln(\frac{6}{0,272})) \times 33,2 = 8,816;$$

$$X_{p\dot{3}45} = (0,375 \times R_{pa} + 0,0628 \ln(\frac{d_{KP}}{P_{p\dot{3}1}})) \times l_{45} =$$

$$= (0,375 \times 0,19 + 0,0628 \ln(\frac{6}{0,272})) \times 5,5 = 1,46;$$

$$X_{p\dot{3}56} = (0,375 \times R_{pa} + 0,0628 \ln(\frac{d_{KP}}{P_{p\dot{3}1}})) \times l_{56} =$$

$$= (0,375 \times 0,19 + 0,0628 \ln(\frac{6}{0,272})) \times 1,3 = 0,345.$$

Общее эквивалентное индуктивное сопротивление однопутного рельса марки R65 для перегона между подстанциями 1 и 2, Ом:

$$X_{p\dot{3}16} = X_{p\dot{3}12} + X_{p\dot{3}23} + X_{p\dot{3}34} + X_{p\dot{3}45} + X_{p\dot{3}56} \quad (21)$$

$$X_{p\dot{3}16} = 0,85 + 2,124 + 8,816 + 1,46 + 0,345 = 13,595$$

Комплексное сопротивление рельса однопутного участка между подстанциями 1 и 2, Ом:

$$Z_{p\dot{3}16} = R_{p\dot{3}16} + jX_{p\dot{3}16} \quad (22)$$

$$Z_{p\dot{3}16} = 4,864 + j13,595$$

Результирующее сопротивление тяговой сети однопутного участка (1-го пути) согласно (11), Ом:

$$Z_{16}^{(1)} = Z_{16кс} + Z_{p\dot{3}16} = 8,289 + j18,12 + 4,864 + j13,595 = 13,153 + j31,715$$

Эквивалентное активное сопротивление контактной сети однопутного участка (1-го пути) перегона между подстанциями 1 и 2 согласно выражению (5), Ом:

$$\begin{aligned}
R_{16КС} &= \frac{(R_{КП} \times R_{НТ} + 0,126)}{R_{КП} + R_{НТ} + 0,504 / (R_{КП} + R_{НТ})} \times 1_{16} = \\
&= \frac{(0,204 \times 0,602 + 0,126)}{0,204 + 0,602 + \frac{0,504}{0,204 + 0,602}} \times 51,2 = 8,9.
\end{aligned}$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление контактной сети однопутного участка (1-го пути) перегона между подстанциями 1 и 2 согласно выражению (6), Ом:

$$\begin{aligned}
X_{16КС} &= \left(\frac{0,355 \times (R_{КП}^2 + R_{НТ}^2) + 0,09}{(R_{КП}^2 + R_{НТ}^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times 1_4 = \\
&= \left(\frac{0,355 \times (0,204^2 + 0,602^2) + 0,09}{(0,204^2 + 0,602^2) + 0,504} + 0,106 \right) \times 51,2 = 18,59.
\end{aligned}$$

Комплексное сопротивление контактной сети однопутного участка (1-го пути) между подстанциями 1 и 2, Ом:

$$Z_{16КС} = R_{16КС} + jX_{16КС} = 8,9 + j18,59.$$

Результирующее сопротивление тяговой сети однопутного участка (2-го пути) согласно (11), Ом:

$$Z_{16}^2 = Z_{16КС} + Z_{РЭ16} = 8,9 + j18,59 + 4,864 + j13,595 = 13,764 + j32,185.$$

Тогда результирующее сопротивление тяговой сети двухпутного участка согласно выражению (12), Ом:

$$\begin{aligned}
Z_{16}^3 &= \frac{Z_{16}^{(1)} \times Z_{16}^{(2)}}{Z_{16}^{(1)} + Z_{16}^{(2)}} = \frac{(13,153 + j31,715) \times (13,764 + j32,185)}{(13,153 + j31,715) + (13,764 + j32,185)} = \\
&= \frac{(13,153 + j31,715) \times (13,764 + j32,185)}{26,917 + j63,9} = 6,727 + j15,975.
\end{aligned}$$

Результаты расчета сопротивлений тяговой сети участка железной дороги между подстанциями 1 и 2 сведем в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета сопротивлений тяговой сети

Участок	R , Ом	X , Ом
Подстанция 1 – подстанция 2	6,727	15,975

Расчет потерь мощности и энергии

Целесообразность применения ИРМ заключается в том, что подавляющее число потребителей (особенно электроемких) наряду с полезно реализуемой активной мощностью P потребляет значительную реактивную индуктивную мощность Q . Источником активной мощности являются генераторы электрической энергии на электростанциях. Если ИРМ не применяют, то генераторы должны наряду с активной генерировать и через все элементы электрических сетей передавать потребителям реактивную мощность. При этом ток в фазном проводе, А:

$$I = \frac{S}{U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U} \quad (23)$$

а потери мощности во всех трех фазах (при симметричной нагрузке всех фаз), кВт:

$$\Delta P = I^2 \times R_{\Sigma} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \times R_{\Sigma}. \quad (24)$$

где R_{Σ} - суммарное активное сопротивление питающей сети, Ом.

Если непосредственно у потребителя установить ИРМ, генерирующую емкостную мощность, то по питающей сети передается только активная мощность, генераторы и вся сеть разгружаются от реактивной мощности, вырабатываемой теперь для потребителя РМ. В этом случае потери мощности в сети, кВт:

$$\Delta P = I^2 \times R_{\Sigma} = \frac{P^2}{U^2} \times R_{\Sigma}. \quad (25)$$

При этом снижаются потери энергии, а также потери напряжения в питающей сети. Экономически применение ИРМ оправдывается в основном этими факторами.

Потери активной энергии определим по формуле, кВт·ч:

$$\Delta W = \Delta P \times 8760 \quad (26)$$

Расчет потерь мощности производим для двух вариантов. Первый - без учета компенсации реактивной мощности по формуле (24). Второй - с учетом полной компенсации реактивной мощности по формуле (25).

Потери активной мощности без учета компенсации реактивной мощности согласно (24), кВт:

$$\Delta P_{16}^{(1)} = I^2 \times R_{16} = \frac{P_{cp12}^2 + Q_{cp12}^2}{U_{ном}^2} \times R_{16} = \frac{8599^2 + 5958^2}{27,5^2} \times 6,727 = 974.$$

Потери активной энергии без учета компенсации реактивной мощности определим по формуле (26), кВт·ч:

$$\Delta W_{16}^{(1)} = \Delta P_{16}^{(1)} \times 8760 = 974 \times 8760 = 8532240$$

Потери активной мощности с учетом полной компенсации реактивной мощности согласно (25), кВт·ч:

$$\Delta P_{16}^{(2)} = I_a^2 \times R_{16} = \frac{P_{cp12}^2}{U_{ном}^2} \times R_{16} = \frac{9297^2}{27,5^2} \times 5,066 = 658.$$

Потери активной энергии с учета полной компенсации реактивной мощности определим по формуле (26), кВт·ч:

$$\Delta W_{16}^{(2)} = \Delta P_{16}^{(2)} \times 8760 = 658 \times 8760 = 5764080.$$

Снижение потерь активной мощности на участке ЖД между подстанциями 1 и 2 составит, кВт:

$$\Delta P_{16} = \Delta P_{16}^{(1)} - \Delta P_{16}^{(2)} = 974 - 658 = 316,$$

что в процентах составит:

$$\frac{316 \times 100}{8599} = 3,7\%$$

Снижение потерь активной энергии на участке ЖД между подстанциями 1 и 2 составит, кВт·ч:

$$\Delta W_{16} = \Delta W_{16}^{(1)} - \Delta W_{16}^{(2)} = 8532240 - 5764080 = 2768160.$$

Результаты расчета потерь активной мощности и энергии на участке железной дороги между подстанциями 1 и 2 сведем в таблицу 5.

Таблица 5 - Результаты расчета потерь активной мощности и энергии

Участок	P, кВт	Q, квар	W, кВт·ч	без учета компенсации		с учета компенсации		снижение потерь	
				ΔP, кВт	ΔW, кВт·ч	ΔP,к Вт	ΔW, кВт·ч	ΔP, кВт	ΔP, %
Подстанци я 1 – подстанци я 2	8599	5958	75327240	974	8532240	658	5764080	316	3,7

В результате расчетов получено:

– потери активной энергии за год при существующих трансформаторах – 8532240 кВт·ч, при компенсированных – 5764080 кВт·ч, т. е. при существующем трансформаторе на ЭПС потери энергии на 2768160 кВт·ч больше.

Оценить положительный эффект при использовании компенсированного трансформатора можно, умножив разницу в потерях электроэнергии на ее стоимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящие методические указания ориентированы на достижение определенного результата, служащего показателем сформированности знаний и умений обучающегося в процессе обучения в рамках, соответствующих рабочей учебной программе компетенций.

Таким образом, настоящие методические указания для выполнения контрольной работы студентами осуществляют контролирующую, оценивающую, обучающую, развивающую функции, а также функцию самообразования.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

- 1 Расчет показателей качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока : учебно-методическое пособие / автор-составитель С. И. Макашева ; УМО ж.-д. – Москва : ГОУ "УМЦ ЖДТ", 2005. – 112 с. – (Высшее профессиональное образование). – Текст : непосредственный.
- 2 Ким, К. К. Электрические измерения неэлектрических величин : учебное пособие / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2014. – 136 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 978-5-89035-751-9. – URL: <http://umczdt.ru/books/43/2542/> (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.
- 3 Ким, К. К. Поверка средств измерений электрических величин : учебное пособие / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2014. – 141 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 978-5-89035-753-3. – URL: <https://umczdt.ru/books/41/39330/> (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.
- 4 Ковалев, И. Н. Электроэнергетические системы и сети : учебник / И. Н. Ковалев. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. – 363 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-89035-813-4. – URL: <http://umczdt.ru/books/41/39329/> (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.
- 5 Энергосбережение на предприятиях промышленности и железнодорожного транспорта : учебное пособие для вузов / В. М. Лебедев, С. В. Приходько, С. В. Глухов [и др.] ; ред. В. М. Лебедев. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2017. – 116 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-89035-950-6. – URL: <https://umczdt.ru/books/43/2548/> (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.
- 6 Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог : монография / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, И. А. Любченко, А. В. Черепанов ; под редакцией А. В. Крюкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Директ-Медиа, 2020. – 184 с. – ISBN 978-5-4499-1580-1. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=598052 (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.
- 7 Стрельников, Н. А. Энергосбережение : учебное пособие / Н. А. Стрельников, В. В. Гуров. – Новосибирск : НГУ, 2019. – 72 с. – ISBN 978-5-7782-3884-8. –

URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=576534 (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.

8 Сибикин, Ю. Д. Основы электроснабжения объектов : учебное пособие / Ю. Д. Сибикин, В. В. Гуров. – 3-е изд., стер. – Москва : Директ-Медиа, 2020. – 329 с. – ISBN 978-5-4499-0768-4. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=575058 (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.

9 Климова, Г. Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение : учебное пособие для вузов / Г. Н. Климова. – 2-е изд. – Москва : Юрайт, 2020. – 179 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-00510-3. – URL: <https://urait.ru/bcode/451325> (дата обращения: 25.08.2022). – Текст : электронный.

Приложение А – Оформление титульного листа

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
Красноярский институт железнодорожного транспорта
– филиал Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
(КрИЖТ ИрГУПС)

Факультет «Заочное обучение и дополнительное профессиональное образование»

Кафедра «Системы обеспечения движения поездов»

(Вариант)

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА
по дисциплине «Энергосбережение в системах электроснабжения»

К. 532230 23.05.05

ВЫПОЛНИЛ

студент гр. _____

(И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 2021 г.

ПРИНЯЛ

степень, звание, должность

(И.О. Фамилия)

(оценка)

« ____ » _____ 2021 г.

Красноярск 2022

Учебно-методическое издание

Виталий Олегович КОЛМАКОВ
Олег Витальевич КОЛМАКОВ

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания
по выполнению контрольной работы
для студентов заочной формы обучения
специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов
специализация №1 Электроснабжение железных дорог

Подписано в печать 14.10.2022 г.

Формат бумаги 60×84/16

0,53 авт. л.

1,69 печ. л.

экз.

План издания 2022 г. № п/п КриЖТ ИрГУПС

Протокол № 11 от 30.08.2022 г.

Отпечатано в КриЖТ ИрГУПС
Красноярск, ул. Л. Кецховели, д. 89