

11/17/3

**Одобрено кафедрой
«Электрификация
и электроснабжение»**

**КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
И ЕГО ПОВЫШЕНИЕ В УСТРОЙСТВАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Задание на контрольную работу
с методическими указаниями**

**для студентов V курса
специальности**

190401.65 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭЛ)

РОАТ

Москва – 2011

Составитель – канд. техн. наук, доц. Г.И. Гатальский

Рецензент – ст. преп. З.А. Фомина

СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Целью контрольной работы является углубление знаний и приобретение студентами-заочниками практических навыков по расчету параметров качества электрической энергии и применению устройств для его повышения.

Контрольная работа состоит из четырех заданий. В первом задании требуется охарактеризовать один из показателей качества электроэнергии и рассмотреть его влияние на работу электроприемников. Второе задание связано с вероятностной оценкой соответствия нормам коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности на вводах тяговой подстанции. В третьем задании требуется определить модуль входного сопротивления от токоприемника электроподвижного состава до шин бесконечно большой мощности. Четвертое задание связано с реализацией схемотехнических решений по снижению несимметрии на тяговых подстанциях переменного тока.

Вариант задания и соответствующие ему исходные данные выбираются по последней или предпоследней цифре учебного шифра студента и приводятся в условиях на каждое задание.

При выполнении контрольной работы следует придерживаться следующих правил:

1. Контрольная работа выполняется либо в рукописном виде, либо печатается на принтере.

2. При выполнении расчетов необходимо вначале привести расчетную формулу, сделать подстановку числовых значений величин, входящих в формулу и затем привести результат.

3. Следует давать расшифровку условных величин, входящих в формулу. При этом расшифровку каждого условного обозначения достаточно привести один раз при первом его использовании. Результаты расчетов приводить с тремя-четырьмя значащими цифрами.

СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ЗАДАНИЕ 1

Требуется дать описание одного из показателей качества электроэнергии (ПКЭ), установленных ГОСТ 1309-97, рассмотреть причины ухудшения заданного ПКЭ и его влияние на работу электроприемников, привести нормы на ПКЭ и оценку его соответствия требованиям ГОСТа, указать способ расчета и методику определения ПКЭ, рассмотреть требования к контролю и средства для измерения ПКЭ, привести способы и средства нормализации заданного ПКЭ.

Параметр качества электроэнергии, который следует рассмотреть, выбирается по последней цифре шифра в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Вариант (последняя цифра шифра)	Показатели качества электроэнергии (ПКЭ)
0	Установившееся отклонение напряжения δU_y
1	Размах изменения напряжения δU_t
2	Доза фликера P_f
3	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U
4	Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$
5	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}
6	Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}
7	Отклонение частоты Δf
8	Длительность провала напряжения $\Delta t_{\text{п}}$
9	Импульсное напряжение $U_{\text{имп}}$ и коэффициент временного перенапряжения $K_{\text{пер } U}$

ЗАДАНИЕ 2

В результате измерений в течение суток на шинах 110 кВ тяговой подстанции получено n значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} , как результат усреднений отдельных значений K_{2Ui} , полученных на интервале времени T_{vs} , равном 3 с.

Выбрав по предпоследней цифре шифра из табл. 2 значения K_{2U} , разнесенные по 8 интервалам, необходимо определить, удовлетворяет ли K_{2U} нормам ГОСТ 13109-97.

Таблица 2

Частота m_N значений K_{2U} по интервалам

Интервал K_{2U}	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0 ÷ 0,5	625	592	602	594	600	588	598	608	595	590
0,5 ÷ 1,0	5626	5610	5580	5570	5600	5590	5608	5585	5604	5610
1,0 ÷ 1,5	8105	7890	7920	7880	8000	7930	7860	7950	7898	7990
1,5 ÷ 2,0	5622	5580	5605	5495	5610	5572	5604	5590	5498	5602
2,0 ÷ 2,5	3890	3734	3787	3820	3753	3805	3792	3810	3760	3790
2,5 ÷ 3,0	2972	2844	2890	2810	2788	2798	2804	2792	2802	2795
3,0 ÷ 3,5	1620	1544	1495	1520	1482	1494	1460	1504	1488	1492
3,5 ÷ 4,0	340	296	302	288	292	304	289	306	286	294

ЗАДАНИЕ 3

Необходимо определить, удовлетворяет ли требованиям ПУ СТЭ модуль входного сопротивления от токоприемника электроподвижного состава до шин бесконечно большой мощности для системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ. Участок двухпутный, рельсы Р-65, питание контактной сети двухстороннее с узловой схемой.

Соответствующие исходные данные, выбираемые по последней цифре шифра, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вариант (последняя цифра шифра)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Виды подвесок и проводов		ТП		ТПУ		ТПУЭ (ЭУП)		ТП		ТПУ	
Марки проводов	Т	М95	МСН70	ПБСМ70	МСН120	ПБСМ95					
	П	МФ100	МФ100	МФ100	МФ100	МФ100					
	У	-	А185	А185	-	А185					
Погонное индуктивное сопротивление тяговой сети x_{22} , Ом/км		0,263		0,212		0,160		0,263		0,217	
Погонное индуктивное сопротивление тяговой сети x_{21} , Ом/км		0,387		0,308		0,250		0,390		0,319	
Мощность к.з. на шинах 110 кВ подстанции в режиме минимума системы, МВА		400		600		800		500		700	
Тип трансформатора подстанции		ТДТНЖ-40000/110	ТДТНЖУ-40000/110	ТДТНЖ-25000/110	ТДТНЖ-40000/110	ТДТНЖУ-25000/110					
Расстояние между тяговыми подстанциями, $l_{\text{пст}}$, км		50		60		80		55		65	

В данной таблице приняты следующие обозначения для разных видов тяговой сети [8]:

ТП (рис. 1, а) – несущий трос (Т), контактный провод (П), рельсовый путь ($h_{\text{T}}=7,1$ м, $h_{\text{П}}=6$ м);

ТПУ (рис. 1, б) – то же с усиливающим проводом (У) ($h_{\text{У}}=8$ м);

ТПУЭ (ЭУП) (рис. 1, в) – несущий трос (Т), контактный провод (П), усиливающий провод (У), экранирующий (Э) (обратный) провод, подключенный параллельно рельсам ($h_{\text{T}}=7,1$ м, $h_{\text{П}}=6$ м, $h_{\text{Э}}=8,5$ м, $h_{\text{У}}=8$ м).

Этот тип тяговой сети называют также системой ЭУП (система с экранирующим и усиливающим проводами).

Среднее расстояние на прямых участках пути от усиливающего провода У до оси пути (по горизонтали) - 5 м, от обратного (экранирующего Э) до оси пути - 4,1 м.

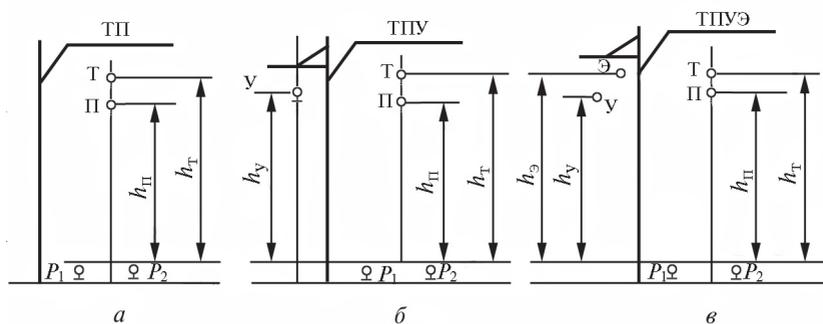


Рис. 1. Расположение проводов для разных видов контактных подвесок

ЗАДАНИЕ 4

В данном задании необходимо выполнить схемотехнические решения по повышению качества электрической энергии за счет снижения несимметрии на тяговых подстанциях переменного тока СТЭ 25 кВ с помощью трансформаторных приставок – двухфазных симметрирующих трансформаторов (ДСТ). Также необходимо построить векторные диаграммы группы понижающий трансформатор – ДСТ, составить схему подключения трехфазного трансформатора и ДСТ к ОРУ - 27,5 кВ, рассчитать и построить зависимость коэффициента несимметрии тока по обратной последовательности от соотношения токов нагрузки левого и правого плеча питания. В завершении необходимо составить схему подключения (фазировки) перевода в симметрирующий режим трех тяговых подстанций заданного типа.

Соответствующие исходные данные выбираются по предпоследней цифре шифра и приведены в табл. 4.

Таблица 4

Вариант (пред- последняя цифра шифра)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип тяговых подстанций (по ПУ СТЭ) со схемой подключения «обратный» винт	I - I - II		II - III - III			III - III - II		II - I - I		
Фазы понижа- ющего транс- форматора A_T , B_T , C_T подклю- чаемые к фазам питающей сети A, B, C для соот- вешующих ти- пов подстанций (I, II, III)	I II A - A_T A - A_T B - B_T B - C_T C - C_T C - B_T		II III A - A_T A - B_T B - C_T B - C_T C - B_T C - A_T			III II A - B_T A - A_T B - C_T B - C_T C - A_T C - B_T		II I A - A_T A - A_T B - C_T B - B_T C - B_T C - C_T		
Тип понижающих трансформаторов на тяговых под- станциях	ТДТНЖ- 40000/110		ТДТНЖУ- 25000/110			ТДТНЖ- 25000/110		ТДТНЖУ- 40000/110		
Доля тяговой нагрузки плеча питания подстан- ции от номиналь- ного тока вто- ричной обмотки трансформатора	0,65		0,5			0,4		0,6		
Фазовый угол между на- пряжением и током плеч пи- тания при ДСТ	37°		35°			36°		38°		

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

ЗАДАНИЕ 1

Как указывалось выше, в данном задании требуется охарактеризовать один из нормируемых ГОСТ 13109-97 пока-

зателей качества электроэнергии (ПКЭ). При этом под качеством электроэнергии понимается степень соответствия электрических параметров нормируемым значениям.

Электропотребители предназначены для работы при определенных номинальных параметрах по напряжению, частоте, синусоидальности тока и др. При работе электроприемников возможно отклонение от этих параметров. Параметры качества электроэнергии и нормы на них установлены соответствующими документами.

Существуют как национальные, так и международные стандарты на качество электроэнергии. В каждой стране эти нормы диктуются как техническими, так и организационно-экономическими особенностями.

Научными и практическими аспектами выработки международных норм в области электромагнитной совместимости (ЭМС) занимаются Международный электротехнический комитет (МЭК), Международный союз по производству и распределению электроэнергии, Европейский комитет по нормированию в области электротехники.

Россия, сотрудничая с этими организациями, вместе с тем располагает собственной нормативно-технической базой в области ЭМС. Основным стандартом в области качества электроэнергии, действующим в России и принятым в странах СНГ, является ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

В ГОСТ 13109-97, в отличие от всех предшествующих о качестве электроэнергии (ГОСТ 13109-67, ГОСТ 13109-87, ГОСТ 13109-87*), впервые в отечественной практике был принят трехсторонний подход к решению проблем ЭМС электрической сети и технических средств, подключенных к ней.

Этот подход состоит в установлении допустимых уровней эмиссии электромагнитных помех (ЭМП) техническими средствами различного вида, допустимых уровней ЭМП, поступающих со стороны электрических сетей и допустимых уровней ЭМП в сетях (норм ПКЭ).

Снижение качества электроэнергии приводит к ряду отрицательных последствий электромагнитного и технологического характера – таких, как: увеличение потерь активной мощности и электроэнергии, сокращение срока службы электрооборудования, нарушение нормального хода технологических процессов потребителей.

При выполнении данного задания контрольной работы вначале следует, в соответствии с табл. 1, выбрать соответствующий ПКЭ. Далее, руководствуясь [1; 3; 4; 5;12], следует последовательно выполнить нижеприведенные пункты задания:

1. Описать заданный ПКЭ и привести выражения для его определения.
2. Рассмотреть причины ухудшения данного ПКЭ.
3. Охарактеризовать влияние ПКЭ на работу электропотребителей.
4. Привести нормы на заданный ПКЭ и оценку его соответствия требованиям ГОСТа.
5. Указать способ определения (расчета) заданного ПКЭ.
6. Рассмотреть требования к контролю ПКЭ и привести технические средства для его измерения.
7. Охарактеризовать способы и средства повышения заданного ПКЭ.

ЗАДАНИЕ 2

В данном задании требуется произвести оценку соответствия коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} нормам ГОСТа.

Процесс изменения электрических параметров рабочего режима в системах электроснабжения является, как правило, случайным. Это связано со случайным характером изменения нагрузок и соответственно, вызывает случайный характер изменения ПКЭ. В связи с этим для оценки соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ применяют вероятностно-статистические методы.

Как устанавливает ГОСТ 13109-97, качество электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обрат-

ной последовательности K_{2U} соответствует нормам, если наибольшее из всех измеренных в течение 24 часов значение K_{2U} не превышает предельно допустимого значения, а значение K_{2U} , соответствующее вероятности 0,95 за установленный период времени, не превышает нормально допустимого значения.

Таким образом, в данной задаче необходимо определить значение K_{2U} , соответствующее интегральной вероятности 0,95.

Для решения поставленной задачи предварительно необходимо произвести статистическую обработку исходных данных, представленных в табл. 2. При этом можно воспользоваться литературой по теории вероятностей и математической статистики, например [11].

Как следует из исходных данных (табл. 2), количество интервалов $N=8$. Значения интервалов K_{2U} с шириной интервала $h=0,5$ (столбец 2, табл. 5), середины интервалов (столбец 3, табл. 5), частота m_N (количество значений K_{2U} по интервалам) на основании табл. 2 – приведены в столбце 4 табл. 5. Последующие расчеты будем представлять далее в соответствующих столбцах табл. 5.

Вначале определяем общее количество значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} по выражению

$$n = \sum_{i=1}^N m_N .$$

Разделив частоту m_N значений K_{2U} в каждом интервале на их общее число n , получаем относительную частоту или частость r_N , соответствующую данному интервалу:

$$r_N = \frac{m_N}{n} .$$

Полученные значения r_N заносим в столбец 5 табл. 5.

Поделив r_N на ширину интервала h_N , получаем эмпирическую плотность p_N^* :

Таблица 5

N	Интервал K_2	Середина интервалов K_{2U}	Частота m_N	Частость r_N	Плотность		Функция распреде- ления $F(K_{2U})$
					эмпириче- ская p_N^*	теоретичес- кая $p(K_{2U})$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0 – 0,5	0,25					
2	0,5 – 1,0	0,75					
3	1,0 – 1,5	1,25					
4	1,5 – 2,0	1,75					
5	2,0 – 2,5	2,25					
6	2,5 – 3,0	2,75					
7	3,0 – 3,5	3,25					
8	3,5 – 4,0	3,75					

$$p_N^* = \frac{r_N}{h_N}.$$

Полученные значения эмпирической плотности p_N^* заносим в столбец 6 табл. 5.

Затем, для определения теоретической плотности распределения $p(K_{2U})$, находим значения его параметров.

При решении данной задачи принято, что закон изменения коэффициента напряжения по обратной последовательности подчиняется закону распределения Релея, который используется во многих инженерных задачах.

Плотность вероятности закона распределения Релея, применительно к данной задаче, определяется выражением:

$$p(K_{2U}) \begin{cases} \frac{K_{2U}^2}{\sigma_r^2} \cdot e^{-\frac{K_{2U}^2}{\sigma_r^2}} & \text{при } K_{2U} > 0 \\ 0 & \text{при } K_{2U} \leq 0 \end{cases}$$

Плотность распределения Релея содержит лишь один параметр «масштаба» σ_r , который может быть определен из уравнения для математического ожидания:

$$\bar{K}_{2U} = \int_0^{\infty} K_{2U} p(K_{2U}) dK_{2U} = \int_0^{\infty} \frac{K_{2U}^2}{\sigma_r^2} \cdot e^{-\frac{K_{2U}^2}{\sigma_r^2}} dK_{2U} = \sigma_r \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1,25 \sigma_r.$$

Отсюда имеем:

$$\sigma_r = \bar{K}_{2U} / 1,25.$$

Математическое ожидание \bar{K}_{2U} находим по выражению:

$$\bar{K}_{2U} = \sum_1^N h_{cpN} \cdot r_N.$$

где h_{cpN} — значение \bar{K}_{2U} для середины N -го интервала.

Итак, найдя параметр распределения σ_r , можно на основании вышеприведенного аналитического выражения закона распределения Релея найти значения теоретической плотности распределения $p(K_{2U})$. Задаваясь значениями K_{2U} в диапазоне $0 \div 4$ с шагом, равным например 0,25, находим значения теоретической плотности распределения и заносим их в столбец 7 табл. 5. При этом отметим, что при $K_{2U} = 0$ значение $p(K_{2U}) = 0$.

Далее определяем интегральную функцию распределения Релея:

$$F(K_{2U}) = \int_0^{\infty} p(K_{2U}) dK_{2U} = 1 - e^{-\frac{K_{2U}^2}{\sigma_r^2}}.$$

Для этого, задаваясь значениями K_{2U} в диапазоне $0 \div 4$ с шагом, равным например 0,25, находим значения интегральной функции распределения $F(K_{2U})$ и заносим их в столбец 8 табл. 5.

На этом расчетная часть задания заканчивается.

Далее следует построить графики зависимостей: гистограмму частот r_N , теоретическую плотность распределения

Релея $p(K_{2U})$ и интегральную функцию распределения $F(K_{2U})$ в зависимости от K_{2U} (в диапазоне от 0 до 4).

По интегральной функции распределения $F(K_{2U})$ графически находим значение K_{2U} , соответствующее вероятности 0,95. На основании найденного значения K_{2U} делаем вывод о соответствии или несоответствии коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} нормам. Если значение K_{2U} , соответствующее вероятности 0,95, превышает норму, то следует указать мероприятия по снижению несимметрии на тяговой подстанции.

ЗАДАНИЕ 3

Электромагнитная совместимость (ЭМС) электроподвижного состава (ЭПС) с системой тягового электроснабжения (СТЭ) обеспечивается рядом показателей, приводимых в [2, п. 10.12]. Одним из таких показателей является модуль входного сопротивления СТЭ на основной частоте при напряжении 25 кВ от токоприёмника ЭПС переменного тока до шин бесконечно большой мощности, значение которого необходимо и определить в данной задаче.

Напряжение СТЭ, поступающее на понижающий трансформатор ЭПС переменного тока, имеет искажения, вызванные коммутацией его выпрямительной установки. Так как на интервале коммутации продолжительностью γ имеет место короткое замыкание, то напряжение на входе выпрямителя определяется отношением индуктивностей питающей системы и трансформатора [6, с. 303]. При этом, чем меньше индуктивное сопротивление питающей сети, тем меньше искажение кривой напряжения.

Качество потребляемого тока из питающей сети характеризуется коэффициентом искажения кривой тока, представляющего собой отношение действующего значения первой гармоники сетевого тока $I_{1(1)}$ к полному значению этого тока I_1 [7]:

$$\nu = \frac{I_{1(1)}}{I_1}.$$

Коммутация тока в вентилях, искажающая форму кривой сетевого тока, связана со значительным потреблением реактивной мощности преобразовательными установками. Потребление реактивной энергии характеризуется коэффициентом мощности, представляющим собой отношение активной мощности P_1 , потребляемой из сети, к полной (кажущей) мощности S_1 [7]:

$$\chi = \frac{P_1}{S_1}.$$

Активная мощность передается только первой гармоникой $I_{1(1)}$, сдвинутой относительно напряжения сети U_1 на угол $\varphi_{(1)}$. Угол $\varphi_{(1)}$ зависит от угла коммутации γ и реактивной составляющей тока холостого хода трансформатора выпрямительной установки, и его значение может быть принято равным половине угла коммутации, т.е.:

$$\varphi_{(1)} = \frac{\gamma}{2}.$$

С учетом сдвига первой гармоники тока и его искажения, коэффициент мощности выпрямителя [7]:

$$\chi = \frac{I_{1(1)}}{I_1} \cos \varphi_{(1)} = \nu \cos \frac{\gamma}{2}.$$

В свою очередь угол коммутации γ зависит от индуктивности анодной цепи вентилях. При работе вентилях на ЭПС в нее входит не только индуктивность самого трансформатора, но индуктивность системы внешнего электроснабжения и тяговой сети, зависящая в свою очередь от многих факторов (расположения ЭПС от тяговой подстанции, расположения проводов контактной сети, схемы её питания и др.).

В результате суммарная индуктивность вызывает довольно значительное увеличение угла коммутации γ , и соответственно, снижается коэффициент мощности ЭПС. В связи с

этим фактический коэффициент мощности электровозов переменного тока при отсутствии каких-либо специальных устройств по его повышению составляет $0,82 \div 0,87$.

С целью уменьшения искажения кривой потребляемого тока и угла коммутации выпрямителей ЭПС и, следовательно, повышения коэффициента мощности ЭПС переменного тока, ПУ СТЭ [2, п. 10.12] нормирует модуль входного сопротивления СТЭ на основной частоте при напряжении 25 кВ от токоприемника ЭПС переменного тока до шин бесконечно большой мощности, который не должен превышать в нормальном режиме работы СТЭ при двусторонней и узловой схеме питания тяговой сети 15 Ом, а в вынужденном режиме работы при односторонней схеме питания тяговой сети – 30 Ом.

Таким образом, в данной задаче на основании исходных данных, приведенных в табл. 3, необходимо по сути дела определить значение индуктивного сопротивления в анодной цепи выпрямителя и сравнить его с вышеприведенными нормируемыми значениями.

Для нахождения этого сопротивления вначале необходимо составить схему замещения. Схема замещения должна включать в себя источник бесконечно большой мощности с внутренним сопротивлением, равным нулю, сопротивление системы внешнего электроснабжения x_s – т.е. сопротивление связи источника бесконечно большой мощности с шинами высокого напряжения тяговой подстанции, сопротивление понижающего трансформатора x_T и сопротивление тяговой сети x_{TC} .

Следовательно, входное сопротивление $x_{вх}$ для фазы будет равно:

$$x_{вх} = x_s + x_T + x_{TC}.$$

При этом сопротивление системы в минимальном режиме x_s , приведенное к стороне 27,5 кВ, составит

$$x_s = \frac{U_H^2}{S_{кз}}$$

где $U_H = 27,5$ кВ;

$S_{кз}$ – мощность короткого замыкания на шинах 110 кВ подстанции в режиме минимума энергосистемы (табл. 3).

Трехобмоточный понижающий трансформатор тяговой подстанции для схемы замещения можно представить в виде одного сопротивления – т.е. как двухобмоточный трансформатор с напряжениями 110 и 27,5 кВ.

Сопротивление понижающего трансформатора тяговой подстанции x_T :

$$x_T = \frac{(1 \pm \alpha) u_k}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$$

где α – заводской допуск на величину напряжения к.з. Это значение равно $\pm 0,05$. В данной задаче можно принять для α среднее значение – т.е. $\alpha=0$ [8];

u_k – напряжение к.з. между обмотками 110 и 27,5 кВ понижающего трансформатора.

Для трансформаторов ТДТНЖ, ТДТНЖУ

$$u_k = 10,5 \%$$

Сопротивление тяговой сети в нормальном режиме работы системы тягового электроснабжения при двухсторонней и узловых схеме питания $x_{Тс(Н)}$ может быть определено так:

$$x_{Тс(Н)} = l_H \cdot x_{22},$$

где l_H – расстояние от тяговой подстанции до электровоза.

Учитывая, что питание двухстороннее с узловых схемой, это расстояние следует брать до поста секционирования. При этом принять, что пост секционирования.

ния находится посередине между подстанциями, т.е. l_n будет равно половине расстояния между подстанциями $l_{пст}$ (табл. 3);

x_{22} — значения погонных сопротивлений тяговой сети для контактной сети заданного вида. Для двухпутного участка при узловой схеме питания (т.е. при параллельном соединении контактной сети обоих путей) в соответствии с [8, табл. 4.3, 4.5, 4.6] значения x_{22} приведены в табл. 3.

Для вынужденного режима в соответствии с [2] принято, что временно отключается одна тяговая подстанция и питание осуществляется по одному пути. В этом случае, т.е. при одностороннем питании только по одному пути сопротивление тяговой сети $x_{тс(в)}$:

$$x_{тс(в)} = l_{пст} \cdot x_{21},$$

где $l_{пст}$ — расстояние от тяговой подстанции до электровоза — т.е. это расстояние между подстанциями (табл. 3);

x_{21} — значения погонных сопротивлений тяговой сети для контактной сети заданного вида. Для двухпутного участка, на котором контактная сеть одного пути отключена, в соответствии с [8, табл. 4.3, 4.5, 4.6] значения x_{21} приведены в табл. 3.

Определив значения $x_{вх}$ по вышеприведенным выражениям для нормального $x_{вх(н)}$ и вынужденного $x_{вх(в)}$ режима следует сравнить их с допустимыми значениями (15 и 30 Ом), сделать соответствующие выводы.

ЗАДАНИЕ 4

В данном задании рассматривается вопрос, связанный с повышением качества электрической энергии путем симметрирования электропотребления на тяговых подстанциях

переменного тока СТЭ 25 кВ. Сведения для выполнения данного задания представлены в [2; 3; 9; 10].

Ниже приведены пояснения к данному заданию и порядок его выполнения.

Приоритетным направлением в совершенствовании хозяйства электрификации и электроснабжения в настоящее время является его модернизация. Это связано как со значительным износом основных фондов хозяйства, так и необходимостью повышения экономической эффективности системы электроснабжения железных дорог.

Программа модернизации учитывает как современные технические решения по СТЭ, так и необходимость соблюдения норм на показатели качества электрической энергии. Таким образом, речь идет не только о модернизации электрооборудования, но и совершенствовании СТЭ с целью повышения как эффективности, так и качества электрической энергии.

В данном задании вопрос, связанный с повышением качества электрической энергии на тяговых подстанциях переменного тока, реализуется путем применения симметрирующих трансформаторных приставок в виде двухфазных симметрирующих трансформаторов (ДСТ) [10].

Как известно [3], наиболее эффективным средством снижения несимметрии является применение на тяговых подстанциях трехфазно-двухфазных трансформаторов Скотта. Такой трансформатор состоит из двух однофазных трансформаторов – «базисного» и «высотного». При этом «базисный» трансформатор включается своей первичной обмоткой на линейное напряжение (например U_{BC}), а «высотный» – между фазой А и средним выводом «базисного» трансформатора (U_{A0}). В результате вектора напряжений U_{BC} и U_{A0} взаимно перпендикулярны, и соответственно, вектора вторичных напряжений левого $U_{л}$ и правого $U_{п}$ плеч питания имеют угловой сдвиг 90° .

Как показано в [3], при одинаковой нагрузке и фазовых углах плеч питания левого $I_{л}$ и правого плеча $I_{п}$ тяговой нагрузки – т.е. $I_{л} = I_{п}$ и $\phi_{л} = \phi_{п}$, первичная трехфазная система нагружена симметрично.

Коэффициент несимметрии токов k_{21} , представляющий собой отношение тока обратной последовательности к току прямой последовательности – т.е. $k_{21} = I_2 / I_1$, для схемы с трансформаторами Скотта $k_{21} = |n - 1| / |n + 1|$, где n равно отношению токов плеч питания – т.е. $n = I_n / I_{\text{п}}$.

Однако при применении трехфазно-двухфазных трансформаторов Скотта нерешенным является вопрос питания сторонних и нетяговых ж.д. потребителей.

В связи с тем, что в нашей стране при электрификации железных дорог с середины 50-х годов прошлого века по системе переменного тока предусматривалось питать также примыкающие к ним районы, было решено использовать трехфазные трехобмоточные трансформаторы. Несмотря на ряд преимуществ системы переменного тока 25 кВ перед системой постоянного тока 3 кВ, опыт эксплуатации выявил определенные недостатки системы переменного тока .

Так, однофазные тяговые нагрузки (электроподвижной состав – ЭПС) приводят к тому, что в трехфазном трансформаторе две фазы являются наиболее нагруженными, а одна – наименее нагруженной. В результате неполно используются мощности трансформаторов, а появляющиеся токи и напряжения обратной последовательности ухудшают качество электрической энергии и повышают её потери в питающей сети и трансформаторах подстанций.

Также вынужденно приходится применять схемы неодинакового присоединения подстанций к фазам внешнего (питающего) напряжения – т.н. схемы «винта» (прямого или обратного), направленные на симметрирование нагрузок по системе внешнего электроснабжения. Однако эти схемы недостаточно эффективны и, кроме того, вынуждают сооружать при питании контактной сети от каждой подстанции нейтральные вставки.

Плохо используются мощности тяговых подстанций, так как при принятом двухстороннем питании тяговых нагрузок (ЭПС) участвуют только две подстанции, что ведет к завышению установленной мощности подстанций.

Кроме того, неодинаковые углы сдвига между векторами токов и напряжений фаз трансформаторов (на отстающей фазе

такой угол достигает 56°), вызывают повышенные потери напряжения в этих фазах. Также, наличие уравнивающих токов в тяговых сетях из-за неравенства напряжений на вводах тяговых подстанций, ведет к дополнительным потерям энергии.

В связи с вышеупомянутыми недостатками СТЭ 25 кВ МИИТом и ВНИИЖТом было предложено обеспечить формирование напряжений плеч питания тяговой нагрузки с 90° сдвигом с помощью симметрирующих трансформаторных приставок.

В этом случае, как и для трансформаторов Скотта, нагрузка в системе внешнего электроснабжения будет симметричной. При оснащении всех тяговых подстанций такими приставками нет необходимости подключать тяговые подстанции к сетям внешнего электроснабжения с чередованием фаз. При этом используемая мощность трансформаторов подстанций увеличивается на 32 %, угол между напряжением и током отстающей фазы снижается с $56^\circ \div 57^\circ$ до $36^\circ \div 37^\circ$, что при токах плеч около 1000 А увеличивает напряжение на плече отстающей фазы на 2700 ÷ 3000 В. Потери мощности в меди трансформатора снижаются на 25 ÷ 100 %, а также снижаются уравнивающие токи и потери от них.

Схемы трансформаторных приставок могут быть различными, однако экономически наиболее целесообразными являются приставки, которые двумя первичными обмотками, соединенными по схеме открытого треугольника, подключаются к тяговой обмотке трансформатора подстанции, а две вторичные обмотки, соединенные в неполную звезду, питают одно плечо тяговой нагрузки.

Такая трансформаторная приставка, называемая двухфазным симметрирующим трансформатором (ДСТ), представляет собой трехстержневую магнитную систему. При этом две первичные обмотки, расположенные на стержнях А и С соединены в открытый треугольник, а две вторичные обмотки, находящиеся на тех же стержнях, соединены в неполную звезду. Схема ДСТ приведена в [10, рис. 1]. Номинальное напряжение каждой из вторичных обмоток 15,9 кВ, и так как они соединены в неполную звезду, то угол между их напряжениями равен 120° , а линейное выходное напряжение равно: $15,9 \cdot \sqrt{3} = 27,5$ кВ.

Векторная диаграмма группы из трехфазного понижающего трансформатора и ДСТ приведена в [10, рис. 2]. Как видно из этой диаграммы, от обмотки понижающего трансформатора питается одно плечо тяговой нагрузки (например левое), а к началам вторичных обмоток a_d и c_d ДСТ, соединенных в неполную звезду, подключается тяговая нагрузка другого плеча (правого).

В результате получается, что угол между напряжениями питания левого U_d и правого U_n плеч питания равен 90° . Тем самым группа из трехфазного тягового трансформатора и ДСТ обладает симметрирующим эффектом, аналогичным системе Скотта.

Коэффициент несимметрии токов такой подстанции с ДСТ аналогичен вышеприведенному для трансформаторов Скотта.

С учетом питания одного плеча тяговой нагрузки, системы ДПР и ТСН подстанции, ОРУ - 27,5 кВ необходимо дополнить ещё одной шиной, к которой подключается вторичная обмотка ДСТ. Пример такой схемы приведен в [10, рис. 4].

В принципе на подстанциях возможна установка двух ДСТ, в результате чего достигается полное взаимное резервирование как тягового, так и симметрирующего трансформатора. В данной задаче следует предусмотреть установку только одного ДСТ на заданных по исходным данным подстанциях (табл. 4), который будет включен при работе любого трансформатора соответствующей тяговой подстанции.

Наибольший эффект симметрирования будет при установке ДСТ на всех тяговых подстанциях электрифицированного участка, однако это связано с большими капитальными затратами. Поэтому симметрирование можно осуществить на отдельных межподстанционных зонах, имеющих наибольшее значение несимметрии напряжения на шинах питающего напряжения.

При этом следует учитывать, что плечо питания, подключенное к ДСТ, не может работать параллельно по контактной сети с подстанцией без ДСТ в связи наличием углового сдвига между напряжениями. Так как на наших электрифицирован-

ных участках ж.д. переменного тока принята параллельная работа подстанций, то для её реализации следует устанавливать ДСТ минимум на двух смежных подстанциях.

В данной задаче рассматривается электрифицированный участок с обычными трехфазными трансформаторами 11-й группы. При этом подключение (фазировка) подстанций к питающей сети осуществляется по схеме «обратный» винт. В такой схеме имеются однотипные (сдвоенные) подстанции на которых осуществляется поворот «винта» в те или другую сторону. Такие сдвоенные подстанции имеют одинаково направленные вектора токов обратной последовательности, и тем самым способствуют повышенным значениям несимметрии напряжения. Поэтому на сдвоенных подстанциях необходимо устанавливать ДСТ в первую очередь.

Установка ДСТ на таких подстанциях может выполняться независимо от перевода других подстанций в симметрирующий режим и в этом случае сохраняется параллельная работа подстанций по контактной сети без изменения фазировки их подключения к ЛЭП.

В данной задаче рассматривается частичное симметрирование подстанций электрифицированного участка с помощью ДСТ только на сдвоенных подстанциях, тип которых, в соответствии с ПУ СТЭ [2], для каждого варианта задания задан в табл. 4.

Рекомендуемая последовательность выполнения данного задания такова:

1. Приводится схема ДСТ и даются его технические данные.
2. Строятся векторные диаграммы для группы трехфазный понижающий трансформатор 11-й группы и ДСТ для заданного типа «сдвоенной» подстанции.
3. Определяются токи плеч питания, исходя из заданной мощности понижающего трансформатора и доли тяговой нагрузки, и строятся в масштабе векторные диаграммы вторичных и первичных напряжений и токов для случая одинаковых токов и фазовых углов (табл. 4) плеч питания. Первичные токи понижающего трансформатора определяются с учетом коэффициента трансформации.

4. Составляется упрощенная электрическая схема подключения трехфазного трансформатора и ДСТ к ОРУ-27,5 кВ для заданного типа (табл. 4) сдвоенной подстанции.

5. Составляется схема фазировки (подключения к ЛЭП) для трех подстанций заданного типа (табл. 4) при частичном переводе в симметрирующий режим электрифицированного участка. Пример фазировки подстанций для электрифицированного участка приведен в [10, рис.5].

6. Рассчитываются значения коэффициента несимметрии токов для ДСТ и трехфазного трансформатора 11-й группы. Коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности k_{21} для ДСТ, как было указано ранее, аналогичен системе Скотта и приведен выше. Для трехфазного трансформатора 11-й группы $k_{21} = \sqrt{(n^2 - n + 1)} / (n + 1)$.

Значения рассчитываются для отношения нагрузок плеч питания тяговой нагрузки n от 0 до 2 с шагом 0,2. По полученным значениям строятся на одном графике зависимости $k_{21}(n)$ для трехфазного трансформатора и ДСТ.

7. Сделать выводы о снижении несимметрии токов на тяговых подстанциях переменного тока при применении ДСТ по сравнению с подстанциями с обычными трехфазными трансформаторами.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.

2. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. (ЦЭ-462). – М.: МПС, 1997. – 79 с.

3. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

4. Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. –М.: Транспорт, 1988. – 326 с.
5. Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. –М.: МЭИ, 2001. – 120 с.
6. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. –М.: Транспорт, 2001. – 464 с.
7. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. –М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
8. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. –М.: Трансиздат, 2005. – 2116 с.
9. Василянский А.М., Мамошин Р.Р., Якимов Г.Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц. //Железные дороги мира, № 8, 2002. – с. 40 – 46.
10. Бородулин Б.М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока. //Вестник ВНИИЖТа, № 2, 2003. – с.14 – 17.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1980. –500 с.
12. Кусков А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях. –М.: Додека XXI век, 2008. – 336 с.

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
И ЕГО ПОВЫШЕНИЕ В УСТРОЙСТВАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Задание на контрольную работу
с методическими указаниями

Редактор Г.В. Тимченко

Корректора Д.Н. Тихонычев

Компьютерная верстка Е. В. Ляшкевич

Тип. зак.	Изд. зак. 98	Тираж 300 экз.
Подписано в печать 19.10.11.	Гарнитура NewtonС	Ризография
Усл. печ. л. 1,75		Формат 60×90 1/16

Редакционный отдел
Информационно-методического управления РОАТ,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати
Информационно-методического управления РОАТ,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2