

11/16/5

**Одобрено кафедрой
«Электрификация
и электроснабжение»**

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Задание на контрольную работу
с методическими указаниями
для студентов V курса**

специальности

**190401. 65 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА (ЭЛ)**

РОАТ

Москва – 2011

Составитель – канд. техн. наук, проф. Р.В. Шиловская

Рецензент – ст. преп. З.А. Фомина

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Для приведенной схемы присоединения тяговых подстанций к ЛЭП (рис. 1*) определить:

1. Токи обратной последовательности, потребляемые подстанциями от ЛЭП.
2. Напряжения обратной последовательности на шинах 220 кВ всех трех подстанций, коэффициенты несимметрии напряжений.
3. Определить графически ток обратной последовательности для расчетной подстанции.

Исходные данные

1. Напряжение линии электропередачи 220 кВ;
2. Сопротивление одного километра ЛЭП

$$Z_0 = 0,131 + j0,434.$$

3. Активные P и реактивные Q составляющие нагрузок плеч подстанций (рис. 1) взять из табл. 1 приложения в зависимости от последней цифры учебного шифра.

4. Номер расчетной подстанции выбрать из табл. 2 приложения по предпоследней цифре учебного шифра.

5. Расстояния l_1, l_2, l_3 выбрать из табл. 3 приложения в зависимости от цифры, указывающей сотни в учебном шифре студента.

Если учебный шифр студента состоит из одной или двух цифр, то недостающие цифры заменяются нулями.

* Рисунки помещены в конце работы.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Тяговые подстанции питают через контактную сеть и рельсы электроподвижной состав, который представляет собой однофазные нагрузки.

Тяговые подстанции присоединяются к двум зонам тяговой сети, расположенным справа и слева от нее. Если подстанция тупиковая, то она питает только одну зону. Присоединение подстанции к контактной сети называют «плечом питания». В первом случае, следовательно, будут два плеча, а во втором – одно.

Из сказанного следует, что трехфазные тяговые трансформаторы и трехфазная питающая подстанции сеть будут нагружены несимметричной нагрузкой [1]. Наибольшая несимметрия получается при одноплечной нагрузке.

В линии передачи, питающей несколько тяговых подстанций, при рациональном присоединении их несимметрия токов на отдельных участках ее уменьшается.

В схеме рис. 1 все подстанции имеют двухплечную нагрузку.

На схеме показан ряд локомотивов, нагружающих плечи тяговых подстанций. По нагрузкам, создаваемым отдельными локомотивами, зная их расположение, можно найти нагрузки плеч. В контрольной работе, однако, для уменьшения рутинной работы нагрузки плеч задаются своими активными и реактивными составляющими. Они, как указывалось, выбираются из табл. 1 приложения в зависимости от учебного шифра студента.

Вследствие несимметрии нагрузок линии передач, электрических станций на вводах тяговых и районных подстанций создается несимметрия напряжений. Для ее уменьшения тяговые подстанции подключаются к ЛЭП так, чтобы по возможности равномерно загрузить три фазы внешнего электроснабжения. Одна из таких схем приведена на рис. 1.

На этой схеме средняя, менее нагруженная фаза трансформатора, поочередно присоединяется к разным фазам ЛЭП

(В, С и А). За счет этого не снижается несимметрия на участке l_3 в ЛЭП, но на участках l_2 и особенно l_1 она, как правило, уменьшается.

В задании для упрощения расчетов рассматривается одностороннее питание ЛЭП от электростанции и присоединение всех тяговых подстанций к одной цепи ЛЭП. В действительности, во многих случаях тяговые подстанции присоединяются к разным цепям двухцепной линии передачи, что несколько затрудняет симметрирование нагрузок в ней.

Кроме того, при выводе формул сделаны следующие допущения:

- 1) напряжение на шинах 220 кВ электростанции симметрично;
- 2) токи и напряжения синусоидальны;
- 3) намагничивающие токи трансформаторов пренебрежимо малы.

Еще одним упрощением является неучет симметричной районной нагрузки, которая, как правило, имеется на подстанциях и питается от третьих (не показанных на рис. 1) обмоток трансформаторов.

Прежде чем перейти непосредственно к методике выполнения контрольной работы, напомним некоторые общие сведения из теории расчета трехфазной системы с несимметричными нагрузками.

Из теоретической электротехники [2] известно, что трехфазная несимметричная система токов или напряжений может быть разложена в общем случае на три составляющие: систему прямой последовательности, систему обратной последовательности и систему нулевой последовательности.

В рассматриваемом случае одна из обмоток трансформаторов (тяговая) соединена в треугольник, поэтому ток нулевой последовательности отсутствует.

По заданию требуется определить напряжения обратной последовательности и коэффициенты несимметрии напряжений на шинах 220 кВ тяговых подстанций.

Для решения задачи необходимо в первую очередь найти токи обратной последовательности на тяговых подстанциях. В

методе симметричных составляющих для этого используется оператор поворота $a = e^{j120^\circ}$. Этот оператор является единичным вектором (модуль его равен единице), аргумент которого равен 120° .

Напомним, что при умножении векторов перемножают их модули, а аргументы складывают. Из этого следует, что умножение какого-либо вектора на оператор a не меняет его модуль, но поворачивает вектор на 120° против часовой стрелки, при умножении на a^2 вектор поворачивается на 240° или на -120° (на 120° по часовой стрелке). Умножение на a^3 приводит к повороту вектора на 360° , т.е. не меняет положение его на комплексной плоскости.

Полезно вспомнить следующие соотношения, связанные с оператором a :

$$\left. \begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -0,5 + j0,5\sqrt{3} \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = e^{j120^\circ} = -0,5 - j0,5\sqrt{3} \\ a^3 &= e^{j360^\circ} = 1; \quad 1 + a + a^2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Если несимметричная трехфазная система токов задана векторами $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ (рис. 2), то составляющая прямой последовательности фазы a равна [1; 2]:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c). \quad (2)$$

Для остальных фаз:

$$\dot{I}_{b1} = a^2\dot{I}_{a1}, \quad \dot{I}_{c1} = a\dot{I}_{a1}.$$

Симметричная составляющая токов обратной последовательности

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) \quad (4)$$

В системе обратной последовательности чередование фаз обратное по сравнению с системой прямой последовательности (при том же направлении вращения векторов).

Поэтому

$$\dot{I}_{b2} = a\dot{I}_{a2}, \quad \dot{I}_{c2} = a^2\dot{I}_{a2}. \quad (5)$$

Если нагрузки плеч трансформатора заданы, то воспользовавшись формулами, приведенными в [1], можно найти нагрузки фаз трансформатора, а затем по формулам (2) и (4) определить симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательности.

Эта задача, однако, может быть решена проще, если учесть что при симметричных трансформаторах (к ним не относится, например, трансформатор Скотта) несимметрия токов в ЛЭП не зависит от схемы соединения обмоток трансформатора, а определяется только несимметрией нагрузок. Это нетрудно показать.

Рассмотрим с этой целью схему, представленную на рис.3. На этой схеме \dot{I}_a и \dot{I}_c – заданные нагрузки плеч, а $\dot{I}_{aоб}$, $\dot{I}_{bоб}$ и $\dot{I}_{cоб}$ – токи в фазах, соответствующих выводам *a*, *b* и *c* трансформатора.

Известно [1], что:

$$\dot{I}_{aоб} = \frac{2}{3}\dot{I}_a - \frac{1}{3}\dot{I}_c; \quad \dot{I}_{bоб} = -\frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_c); \quad \dot{I}_{cоб} = \frac{2}{3}\dot{I}_c - \frac{1}{3}\dot{I}_a.$$

Подставляя из этих выражений токи $\dot{I}_{aоб}$, $\dot{I}_{bоб}$ и $\dot{I}_{cоб}$ в формулу (4), получим:

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{3}\dot{I}_a - \frac{1}{3}\dot{I}_c - \frac{a^2}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_c) + a \left(\frac{2}{3}\dot{I}_c - \frac{1}{3}\dot{I}_a \right) \right]$$

или

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{3} (2 - a^2 - a) \dot{I}_a + \frac{1}{3} (2a - a^2 - 1) \dot{I}_c \right].$$

Но из последней формулы с учетом соотношений (1) можно найти:

$$-a^2 - a = 1 \quad \text{и} \quad -a^2 - 1 = a.$$

Поэтому последнее выражение приводится к виду

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a \dot{I}_c).$$

Таким же путем можно показать, что ток прямой последовательности

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_c).$$

При выводе этих формул принято, что нагрузка \dot{I}_c находится под напряжением, опережающем на 120° напряжение на нагрузке \dot{I}_a . В общем случае фазы этих напряжений будут зависеть от присоединения первичной обмотки трансформатора к ЛЭП. В зависимости от способа присоединения вывода вторичной обмотки a может соответствовать напряжению фаз ЛЭП $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Это же относится и к выводам b и c .

Для того, чтобы ориентировать ток обратной последовательности относительно векторов напряжений фаз ЛЭП необходимо токи нагрузок \dot{I}_a и \dot{I}_c ориентировать относительно этих же векторов.

Из рис. 1 видно, что в этом случае нагрузки плеч подстанции 1, приведенные к ЛЭП 220 кВ, будут равны:

$$\dot{I}_{A1} = \frac{1}{n} \dot{I}_{n1}; \quad \dot{I}_{B1} = 0; \quad \dot{I}_{C1} = \frac{1}{n} \dot{I}_{n1};$$

для подстанции 2 получим

$$\dot{I}_{A2} = \frac{1}{n} \dot{I}_{л2}; \quad \dot{I}_{B2} = \frac{1}{n} \dot{I}_{н2}; \quad \dot{I}_{C2} = 0;$$

и для подстанции 3:

$$\dot{I}_{A3} = 0; \quad \dot{I}_{B3} = \frac{1}{n} \dot{I}_{л3}; \quad \dot{I}_{C3} = \frac{1}{n} \dot{I}_{н3}.$$

В этих выражениях и $n = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 27,5} = 4,62$ – коэффициент трансформации.

При таком представлении токов плеч подстанций ток обратной последовательности фазы А можно представить выражением

$$\dot{I}_{A2K} = \frac{1}{3} (\dot{I}_{AK} + a^2 \dot{I}_{BK} + a \dot{I}_{CK}), \quad (6)$$

где K – индекс, равен 1, 2 или 3 в зависимости от номера подстанции. Каждый раз при расчете тока обратной последовательности на вводах подстанции один из токов в выражении (6) \dot{I}_{AK} , \dot{I}_{BK} или \dot{I}_{CK} зависимости от номера (типа) подстанции будет равен нулю. Нагрузку, например, \dot{I}_{AK} можно записать в виде:

$$\dot{I}_{AK} = I'_{AK} - jI''_{AK},$$

где \dot{I}'_{AK} – активная и \dot{I}''_{AK} – реактивная составляющие на грузки соответственно.

В табл. 1 приложения даны отдельно активные и реактивные составляющие нагрузок плеч подстанций. Это упрощает опре-

* Он совпадает с номером типа.

деление токов обратной последовательности на вводах каждой подстанции, позволяет расчеты выполнять отдельно для активных и реактивных составляющих, а затем сложить полученные результаты (векторы).

Упрощение при таком подходе объясняется тем, что одноименные составляющие нагрузок разных фаз всегда сдвинуты друг относительно друга на 120° . Надо, конечно, учитывать, что в зависимости от способа присоединения к ЛЭП составляющие нагрузки одной из фаз при расчете тока обратной последовательности приравняются нулю.

Будем далее ориентировать все нагрузки и их составляющие относительно вектора напряжения фазы А.

Активные составляющие токов совпадают по направлению с соответствующими напряжениями. Поэтому, при совмещении вектора напряжения, фаза А, с действительной осью, активные составляющие нагрузок фаз можно записать в виде:

$$I'_{AK}, a^2 I'_{BK} \text{ и } a I'_{CK}.$$

Подставляя эти выражения в формулу (6), получим ток обратной последовательности, вызванный активными составляющими нагрузок подстанции,

$$\dot{I}_{A2Ka} = \frac{1}{3} (I'_{AK} + a^4 I'_{BK} + a^2 I'_{CK}).$$

Или, т.к. $a^3 = 1$,

$$\dot{I}_{A2Ka} = \frac{1}{3} (I'_{AK} + a I'_{BK} + a^2 I'_{CK}). \quad (7)$$

Реактивные составляющие токов отстают от соответствующих напряжений на 90° . С учетом этого они на той же комплексной плоскости могут быть записаны в виде:

$$-j I''_{AK}, -j a^2 I''_{BK}, -j a I''_{CK}.$$

С учетом этого ток обратной последовательности фазы A , вызванный реактивными составляющими нагрузок, в соответствии с формулой (6), будет равен:

$$\dot{I}_{A2Kp} = -j\frac{1}{3}(I''_{AK} + a^4 I''_{BK} + a^2 I''_{CK}).$$

или

$$\dot{I}_{A2Kp} = -j\frac{1}{3}(I''_{AK} + a I''_{BK} + a^2 I''_{CK}). \quad (8)$$

Результирующий ток обратной последовательности фазы A будет равен

$$\dot{I}_{A2K} = \dot{I}_{A2Ka} + \dot{I}_{A2Kp}. \quad (9)$$

Как уже указывалось, в зависимости от того, как присоединена подстанция к ЛЭП, нагрузку той или иной фазы надо приравнять нулю. Так, для подстанции 1 $\dot{I}_B = 0$, для подстанции 2 $\dot{I}_C = 0$ и для подстанции 3 $\dot{I}_A = 0$.

Студент в процессе выполнения работы должен хорошо уяснить, почему это так.

Определив токи обратной последовательности на вводах всех трех подстанций, можно приступить к расчету напряжений обратной последовательности на вводах подстанций.

Будем считать, что ЛЭП питается от источника большой мощности, так что напряжение обратной последовательности будет вызываться только падением напряжения в ЛЭП от токов обратной последовательности.

Сопrotивление одного км ЛЭП можно представить в виде:

$$\underline{Z}_0 = 0,131 + j0,434 = 0,453e^{j73^\circ 12'}, \text{ Ом/км.}$$

Зная токи обратной последовательности всех тяговых подстанций, нетрудно найти напряжения обратной последовательности на шинах всех подстанций (1, 2 и 3):

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{U}_{A21} &= -l_1 (\dot{I}_{A21} + \dot{I}_{A22} + \dot{I}_{A23}) \underline{Z}_0; \\
\Delta \dot{U}_{A22} &= \Delta \dot{U}_{A21} - l_2 (\dot{I}_{A22} + \dot{I}_{A23}) \underline{Z}_0; \\
\Delta \dot{U}_{A23} &= \Delta \dot{U}_{A22} - l_3 \dot{I}_{A23} \underline{Z}_0.
\end{aligned}
\tag{10}$$

В соответствии с заданием необходимо найти для расчетной подстанции ток обратной последовательности графически, путем построения векторных диаграмм.

Рассмотрим, как это можно сделать в случае питания тяговой сети от плеч подстанции, имеющих напряжения, совпадающие по фазе с напряжениями фаз А и В ЛЭП (подстанция 2). В этом случае нагрузку фазы С надо приравнять нулю.

Векторная диаграмма для этого случая приведена на рис. 4.

На рис. 4, а дана векторная диаграмма напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B и \dot{U}_C . Вектор \dot{U}_A совмещен с осью вещественных значений. На этой же диаграмме показаны составляющие токов \dot{I}_A и $\dot{I}_B - \dot{I}'_A, \dot{I}''_A, \dot{I}'_B, \dot{I}''_B$.

Для получения тока обратной последовательности от активных составляющих надо геометрически сложить ток \dot{I}'_A и ток $a^2 \dot{I}'_B$, т.е. вектор \dot{I}'_B повернутый на 240° против часовой стрелки. Вектор $a^2 \dot{I}'_B$ показан на рис. 4, а. Для получения тока обратной последовательности от реактивных составляющих нагрузок надо к \dot{I}''_A прибавить вектор $a^2 \dot{I}''_B$. Этот вектор также показан на рис. 4, а.

На рис. 4, б выполняется суммирование векторов \dot{I}'_A и $a^2 \dot{I}'_B$, а также \dot{I}''_A и $a^2 \dot{I}''_B$. Первая сумма дает утроенный вектор тока \dot{I}_{A2a} обратной последовательности от активных составляющих, а вторая – утроенный вектор тока \dot{I}_{A2p} обратной последовательности от реактивных составляющих. Сумма этих векторов – вектор $3\dot{I}_{A2}$ – будет утроенным током обратной последовательности для рассматриваемой подстанции.

Порядок выполнения и оформления работы

Контрольную работу рационально выполнять в следующем порядке:

1. Изучить вопросы, связанные с несимметрией нагрузок [1, с. 199-221, 228-232].

2. Рассчитать токи обратной последовательности на вводах всех тяговых подстанций.

3. Найти напряжение обратной последовательности на шинах 220 кВ всех подстанций и коэффициенты несимметрии напряжений (отношение напряжения обратной последовательности к фазному напряжению питающей сети).

4. Для расчетной подстанции найти ток обратной последовательности с помощью векторных диаграмм. Сравнить полученные результаты с результатом расчета в п. 2 для той же подстанции, указав расхождения в процентах при определении модуля вектора и фазового угла.

Контрольная работа может быть выполнена в обычной школьной тетради. Все рисунки должны быть аккуратно оформлены. Кроме векторной диаграммы рисунки можно вычерчивать непосредственно в тетради. Векторные диаграммы надо вычертить на миллиметровой бумаге.

При составлении записки необходимо оставлять поля для замечаний рецензента. Страницы записки и рисунки должны быть пронумерованы. В конце записки следует привести список использованной литературы. Записку надо подписать и указать дату выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1982. - 528 с.

2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники: Ч. 1. — М.: Энергия, 1978. - 592 с.

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1984. - 559 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Активные и реактивные составляющие нагрузок плеч подстанций, A

Последняя цифра учебного шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_{Л1}$	300	400	500	600	600	500	400	300	400	500
$G''_{Л1}$	200	250	300	400	400	300	300	200	250	300
$G_{П1}$	400	500	600	500	400	300	600	500	600	300
$G''_{П1}$	300	300	400	300	250	200	400	300	350	200
$G_{Л2}$	500	600	500	600	500	400	500	400	300	400
$G''_{Л2}$	200	350	400	400	300	250	300	250	200	250
$G_{П2}$	600	500	400	500	600	500	400	300	400	500
$G''_{П2}$	400	300	300	300	400	350	250	200	300	300
$G_{Л3}$	300	400	300	400	500	600	500	400	500	600
$G''_{Л3}$	200	250	200	250	300	350	300	250	200	400
$G_{П3}$	400	300	600	300	400	500	600	500	600	300
$G''_{П3}$	250	200	400	200	300	300	400	300	400	200

Таблица 2

Номер расчётной подстанции

Предпоследняя цифра учебного шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер расчётной подстанции	1	2	3	2	3	1	3	1	2	3

Таблица 3

Длины участков ЛЭП

Цифра учебного шифра, указывающая сотни	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длины участков, км	11	60	70	80	90	100	90	80	70	60
	12	35	40	45	50	50	45	40	35	40
	13	40	45	50	45	40	35	45	40	50

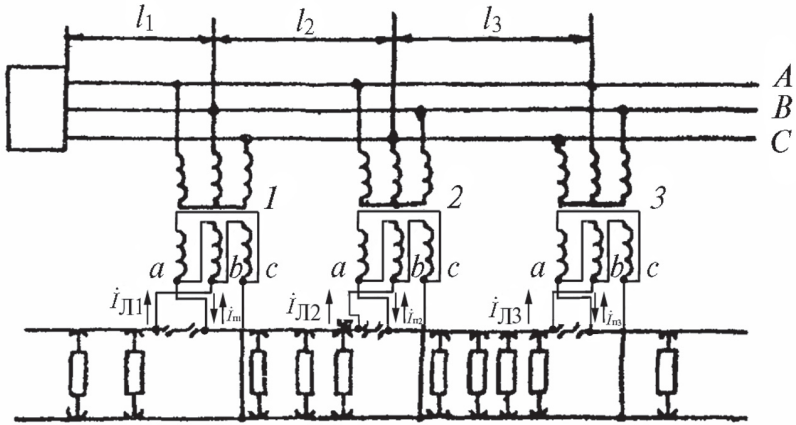


Рис. 1.

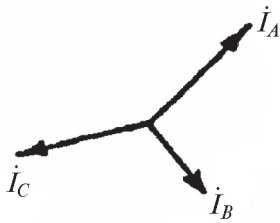


Рис. 2.

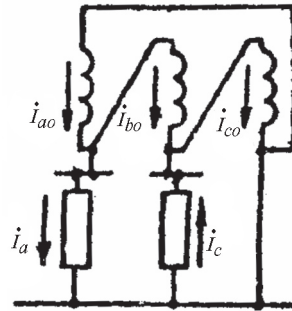


Рис. 3.

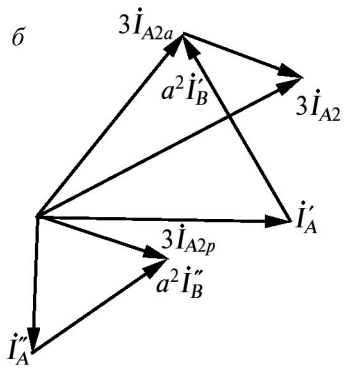
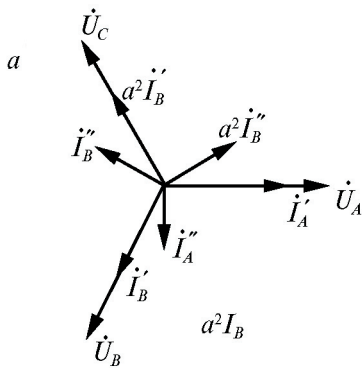


Рис. 4.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Задание на контрольную работу
с методическими указаниями

Редактор Г.В. Тимченко

Корректурa Д.Н. Тихоныхев

Компьютерная верстка Е.В. Ляшкевич

Тип. зак.	Изд. зак. 83	Тираж 300 экз.
Подписано в печать 28.04.11	Гарнитура NewtonС	Ризография
Усл. печ. л. 1,0		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