

**11/13/11**

**Одобрено кафедрой  
«Энергоснабжение  
электрических железных дорог»**

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

**Руководство  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов V курса**

**специальности**

**190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)**



**Москва – 2007**

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

## 1.1. ТЕМАТИКА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Составители : д-р. техн. наук, проф. Л. А. Герман,  
инж. Д. С. Попов,  
инж. А. В. Шаров

Предлагаемый комплекс лабораторных работ нацелен на освоение и приобретения навыков в практических расчетах, анализе, корректировке и оптимизации режима системы тягового электроснабжения переменного тока с регулируемыми и компенсирующими устройствами (регуляторы напряжения трансформаторов (РПН), установки поперечной и продольной емкостной компенсации).

На необходимость применения регулирующих и компенсирующих устройств в системе тягового электроснабжения (СТЭ) указывают Правила устройства системы тягового электроснабжения [1]. Перед выполнением лабораторных работ целесообразно ознакомиться с учебной, справочной и технической литературой по расчету и анализу режима СТЭ [1 – 11].

Рассмотрены следующие лабораторные работы.

*Лабораторная работа №1.* Исследование уравнивающих токов в тяговой сети переменного тока системы электроснабжения 25кВ.

*Лабораторная работа №2.* Исследование режима напряжения в тяговой сети системы электроснабжения 25кВ с установками поперечной емкостной компенсации (КУ).

*Лабораторная работа №3.* Исследование установок продольной емкостной компенсации (УПК) в системе тягового электроснабжения переменного тока 25кВ.

Все лабораторные работы проводятся на ПЭВМ, используя программу расчета РАСТ-05К, разработанную на кафедре

«Энергоснабжение электрических железных дорог» РГОТУПСа.

Программа РАСТ-05К совместного расчета мгновенных схем систем тягового (СТЭ) и внешнего (СВЭ) электроснабжения предназначена для расчета токораспределения, режима напряжения, потерь мощности и токов короткого замыкания в любой точке системы тягового электроснабжения.



Таблица 1

Параметры сетей СВЭ

	Z	L, км	Z <sub>0</sub> , Ом/км	Z, Ом
ВЛ-1	Z1	20	0,13 + j0,4	(2,6 + j8)/64
ВЛ-2	Z2	150	То же	(19,5 + j60)/64
ВЛ-3	Z3	10	То же	(1,3 + j4)/16
ВЛ-4	Z4	60	То же	(7,8 + j24)/16
ВЛ-5	Z5	50	То же	(6,5 + j20)/16
ВЛ-6	Z6	20	То же	(2,6 + j8)/16
РП 1	Z7			(0,03 + j9,6)/16
РП 2	Z8			(0,03 + j9,6)/16
Т1	Z9			0,1 + j2
Т2	Z10			0,1 + j2
Т3	Z11			0,1 + j2

Z – приведено к напряжению 27,5кВ.

Таблица 2

Параметры сетей СТЭ

	Z	L, км	Z <sub>0</sub> , Ом/км	Z, Ом
ТС 1	Z <sub>тс1</sub>	50	0,224 + j 0,464	11,2 + j23,2
ТС 2	Z <sub>тс2</sub>	40	0,224 + j 0,464	8,96 + j 18,56
ТС 3 и ТС4	Z <sub>тс3</sub> = Z <sub>тс4</sub>	20	0,224 + j 0,464	4,48 + j 9,28

Таблица 3

Тяговые нагрузки

Модуль, кА	Фаза, градусы
$I_{1b}$	0...0,5 30 (инд)
$I_{2b}$	0 ... 0,5 30 (инд)
$I_{2c}$	0.....0,5 30 (инд)
$I_{4c}$	0 ....0,5 30 (инд)

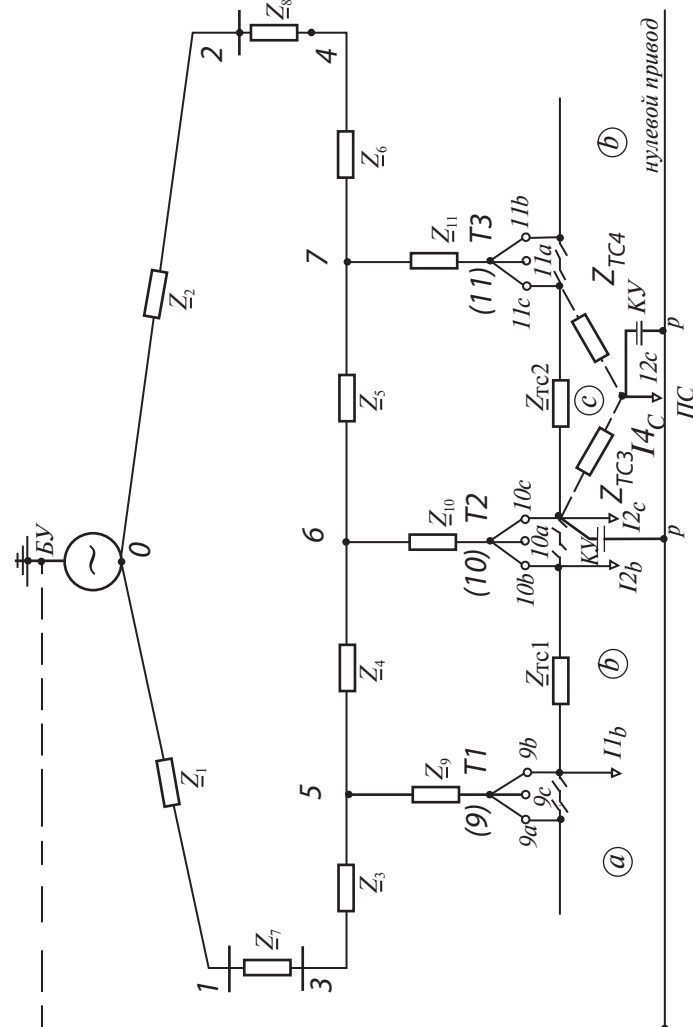


Рис.2. Схема замещения

#### 1.4. РАБОТА ПО ПРОГРАММЕ РАСТ-05К

Инструкция по работе с программой РАСТ-05К дана в Приложении 1.

Здесь дадим основные положения по вводу исходных данных и выводу результатов расчета.

Открывается программа РАСТ-05К и в окно исходных данных в соответствующие функциональные клетки заносятся параметры схемы замещения:

- число ветвей и узлов СВЭ (включая трансформаторы тяговых подстанций);
- активные и реактивные составляющие сопротивлений СВЭ;
- число ветвей тяговой сети;
- комплексные сопротивления ветвей СТЭ;
- модули токов нагрузки и углы сдвига фазы относительно напряжения.

Токи нагрузки будут изменяться, поэтому для первого измерения подставьте значения всех токов, например, 100А и углы сдвига относительно «своего» напряжения, например —30 град, (знак «минус» указывает на индуктивный характер нагрузки). Это даст возможность оценить первый результат расчета.

- коэффициенты трансформации трансформаторов (исходный коэффициент трансформации введен в исходные данные — по умолчанию — 1),
- при необходимости укажите число фиктивных узлов (подробнее см. в Приложении 1, раздел 2).

При нажатии кнопки «Вычислить» открывается второе окно с решением (в комплексной форме) в четырех вкладках:

- ток в тяговой сети;
- матрица узловых сопротивлений узлов шин 27,5кВ;
- падения напряжения и напряжения в узлах;
- потери мощности на каждом участке тяговой сети и суммарные потери в СТЭ и СВЭ.

#### 1.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

При формировании отчета по каждой лабораторной работе необходимо руководствоваться следующим:

1. Оформить титульный лист лабораторной работы, указать свою фамилию, инициалы и шифр.
2. Указать наименование и цель работы, представить исходные данные.
3. Представить исходную схему электроснабжения и соответствующую схему замещения.
4. Указать подробный план проведения работы.
5. Представить основные расчетные формулы.
6. Отчет должен содержать таблицы и графики по проведенным исследованиям.
7. Указать литературу, на которую даются ссылки в отчете
8. Отчет заканчивается выводами.
9. Отчет выполняется на ПЭВМ и предоставляется распечатка.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНИТЕЛЬНЫХ ТОКОВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 25КВ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать эффективность РПН трансформаторов тяговых подстанций по уменьшению уравнильных токов (УТ) в тяговой сети переменного тока.

Для этого оценивается влияния тяговой нагрузки и изменения коэффициента трансформации тягового трансформатора на УТ, а также на его активную и реактивную составляющие.

#### 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для тяговых сетей переменного тока принято называть уравнильным током — ток, протекающий в тяговой сети за счет векторной разности напряжений шин 27,5кВ смежных подстанций.

Уравнильный ток (УТ) в тяговой сети определяется как отношение разности напряжений на смежных подстанциях к сопротивлению тяговой сети между этими подстанциями [3]. Все указанные величины должны быть комплексными. Поэтому в результате расчета получим активную и реактивную составляющие уравнильного тока. Так как по опыту эксплуатации напряжение на шинах 27,5кВ близко к синусоидальному, то и уравнильный ток считается синусоидальной величиной.

Изменение тяговой нагрузки приводит к изменению напряжения на шинах тяговых подстанций, что определяется параметрами системы внешнего электроснабжения (СВЭ). При этом здесь важны не только входное сопротивление подстанции (которое называется *узловым собственным сопротивлением* и определяется по мощности короткого замыкания), но и узловое взаимное сопротивление между рассматриваемыми подстанциями. [4;5;6]

Таким образом ясно, что если нет надежных данных по комплексному значению напряжения на шинах смежных под-

станций, то при расчете уравнильного тока нужно учитывать не только параметры тяговой сети, но и параметры СВЭ. Другими словами, для определения УТ должен быть совместный расчет систем тягового (СТЭ) и внешнего (СВЭ) электроснабжения.

Поэтому предлагается проводить расчет УТ по программе для совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения РАСТ-05К [4]. В Приложении 1 дается характеристика программы и порядок работы с ней.

Уравнильный ток создает дополнительные потери в тяговой сети и тяговых трансформаторах, поэтому естественно желание его уменьшить. Наиболее распространенным способом уменьшения УТ — является использование РПН трансформаторов тяговых подстанций. При этом надо знать, что при регулировании напряжения с помощью РПН изменяется в основном продольная составляющая вектора напряжения подстанции. Сопротивление контура «тяговая сеть — трансформаторы подстанций — и сеть СВЭ между рассматриваемыми подстанциями» в основном имеет индуктивный характер, то и в уравнильном токе изменятся в основном реактивная составляющая при изменении положения переключателя РПН.

Чтобы изменить и активную составляющую УТ применяют вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ), которые могут регулировать напряжение по продольной и по поперечной слагающим [7]. Уменьшить УТ могут и установки емкостной компенсации [8]. В ряде случаев не удается снизить УТ до приемлимых значений. Поэтому приходится переходить с двухстороннего на одностороннее питание тяговой сети. В эксплуатационной практике таких примеров уже не мало.

В рассматриваемой работе сосредоточено внимание на исследование уравнильного тока при изменении коэффициента трансформации трансформаторов тяговых подстанций. Как уже было сказано, при исследовании УТ важно различать продольную и поперечную слагающие напряжения. Поэтому в лабораторной работе следует оперировать не потерей напряжения, а падением напряжения, а напряжение на шинах рассматривать как комплексную величину.

Как принято в [3], в лабораторных работах тяговые токи принимаются синусоидальными, которые определяют падение и потери напряжения до токоприемника электроподвижного состава (ЭПС).

### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

#### 1. Предварительные рекомендации:

- УТ рассчитывается по напряжениям на шинах смежных тяговых подстанций.

- Так как схема замещения приведена к одному напряжению 27,5 кВ, то номинальный коэффициент трансформации  $n$  равен — 1. Рекомендуется изменять коэффициент трансформации в пределах 0,94 — 1,06 с шагом 0,02. Для первого измерения коэффициенты трансформации установите — 1.

Если токи тяговой нагрузки подключить к узлам тяговых подстанций (как это указано на рис. 1), то ток тяговой сети будет равен уравнительному току. Рекомендуется воспользоваться этим свойством при проведении исследований.

2. Работу провести на межподстанционной зоне между подстанциями Т1 и Т2 для трех вариантов.

3. Установить токи  $I_{1b} = I_{2b} = 300\text{А}$  (1 вариант). Остальные токи равны нулю.

4. Установить на подстанции Т1  $n = 1$ , а на подстанции Т2 изменять « $n$ » в пределах 0,94... 1,06 и соответственно измерять УТ.

#### 5. По результатам построить графики:

- зависимости активной и реактивной составляющих тока УТ от « $n$ »;

- полного значения тока УТ в зависимости от « $n$ »;

- продольную и поперечную слагающие разности напряжений шин 27,5 кВ смежных подстанций (другими словами, действительную и мнимую часть указанной разности напряжений) в зависимости от « $n$ ».

Все 5 кривых следует поместить на одном графике, чтобы оценить зависимости тока УТ не только от « $n$ », но и от активной

и реактивной составляющих тока УТ, а также от разности напряжений шин 27,5 кВ (обычно получается  $U$ -образная кривая).

6. Найти по графику значение коэффициента трансформации « $nk$ » трансформатора Т2, при котором полный ток УТ имеет минимальное значение.

7. По графику ответить на вопрос: какая составляющая УТ (активная или реактивная) в большей степени изменяется при изменении « $n$ »?

8. Установить  $I_{1b} = 100\text{А}$ , а  $I_{2b} = 500\text{А}$  (2 вариант).

9. Повторить п. п. 4 — 6.

10. Установить  $I_{1b} = 500\text{А}$ , а  $I_{2b} = 100\text{А}$  (3 вариант).

11. Повторить пп. 4 и 6.

Результат работы — построение вышеуказанных  $U$ -образных графиков, на основании которых делается вывод об эффективности РПН по снижению УТ.

В выводах отразить ответы на вопросы в пп. 6 и 7.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение уравнительного тока в тяговой сети переменного тока.

2. Как рассчитать уравнительный ток?

3. Какие технические средства для снижения УТ Вы знаете?

4. Как влияет изменение коэффициента трансформации трансформатора тяговой подстанции на активную и реактивную составляющие УТ?

5. Почему стремятся уменьшить УТ в тяговой сети?

6. Можно ли уменьшить УТ до нуля путем изменения коэффициента трансформации трансформатора?

7. Если перейти на одностороннее питание тяговой сети с разделом на посту секционирования, то суммарные потери в тяговой сети уменьшатся или увеличатся?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА НАПРЯЖЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 25кВ С УСТАНОВКАМИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ (КУ)

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Оценить повышение уровня напряжения в тяговой сети при включении установки поперечной емкостной компенсации в разных точках тяговой сети.

#### 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Режим системы тягового электроснабжения (СТЭ), определяемый его параметрами, должен обеспечить надежность и качество электроснабжения, наибольшую экономичность СТЭ. Один из основных параметров режима — режим напряжения зависит от потоков реактивной мощности в сети, для компенсации которого устанавливают КУ.

Нормативные документы [1] предусматривают включение КУ в системе тягового электроснабжения.

КУ — мощное техническое средство повышения энергетических показателей системы тягового электроснабжения [3,8].

КУ снижает потери напряжения и потери мощности, снижает уровень несимметрии и несинусоидальности и т. д.

Все это происходит из-за основной способности КУ — компенсировать реактивную мощность тяговой нагрузки. В идеальном случае, когда полностью компенсируется реактивный ток нагрузки, в тяговой сети протекает активный ток и в этом случае эффективно снижаются потери напряжения и потери мощности.

Обычно стремятся приблизить КУ к нагрузке. Поэтому в настоящее время уже есть опытные электровозы с КУ. В результате электровоз потребляет от тяговой сети уменьшенное значение реактивного тока. Однако решающая роль в компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснаб-

жения принадлежит КУ с включением их на тяговых подстанциях и в тяговой сети.

На тяговых подстанциях КУ включают на, так называемую, отстающую фазу, в результате снижается несимметрия напряжения на шинах 27,5кВ, выравниваются напряжения по плечам питания, что повышает эффективность работы РПН трансформаторов. КУ на тяговой подстанции снижает потери напряжения и потери мощности только в трансформаторе и в системе внешнего электроснабжения и не влияет на потери напряжения и мощности в тяговой сети.

Поэтому преимущество КУ, включенное на посту секционирования, — в дополнительном снижении потерь напряжения и в тяговой сети. Кроме того, снижаются потери мощности в тяговой сети. Эти особенности КУ учитывают в условиях эксплуатации, когда решают вопрос: где включить КУ?

Нагрузка в тяговой сети постоянно изменяется, поэтому при отсутствии нагрузки напряжение в тяговой сети повышается за счет включенного КУ и может превышать допустимые наибольшие значения (28кВ) [1]. Кроме того, в этом случае повышаются и потери мощности. Особенно эти явления проявляются при включении КУ на посту секционирования. Поэтому рекомендуется выполнять КУ с регулированием мощности, что наиболее просто можно реализовать при одноступенчатом регулировании, когда вся мощность КУ включается или отключается.

КУ устанавливают, как это было сказано, для компенсации реактивной мощности нагрузки (реактивного тока) по первой гармонике. Поэтому расчеты тягового электроснабжения, связанные с применением КУ, также выполняют для первой гармоники тока и напряжения (если, конечно, нет специальных оговорок об учете высших гармонических тока и напряжения) [3; 8].

Важно отметить следующее. Нормативный документ [1] нормирует уровни напряжения на тяговых подстанциях и в контактной сети по действующим значениям напряжения.



В работе следует использовать программу расчета РАСТ-05К (см. Приложение 1). В этой программе в результате решения получаются комплексные значения падений напряжения и напряжения в узлах.

Действующие значения напряжения в узлах определяются как модули напряжений в этих узлах (в программе приведен расчет модулей).

Для потерь напряжения следует принять продольную слагающую падения напряжения (что допустимо для сетей 110кВ и ниже).

### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. В работе КУ включается на тяговой подстанции и в тяговой сети (у ПС). Для формирования нагрузочного узла в тяговой сети, где подключается КУ и тяговая нагрузка (узел совместим с ПС), необходимо поступить следующим образом (см. Приложение 1. С. 41).

В схеме замещения (см. рис. 2) намечается узел в тяговой сети ( $I_{2c}$ ) — он называется *фиктивным*. Тогда между подстанциями  $T2$  и  $T3$  вместо тяговой сети  $Z_{тс2}$  будут два участка  $Z_{тс3}$  и  $Z_{тс4}$ .

КУ целесообразно представить емкостным сопротивлением, включенным одним концом к узлу  $I_{2c}$ , а другим — к узлу Р (рельс).

Значение сопротивления КУ ( $X_{ку}$ ) определяется по мощности КУ ( $Q$ )

$$X_{ку} = U^2 / Q,$$

где обычно принимают напряжение на КУ  $U = 27,5$  кВ.

Ветвь КУ является ветвью СТЭ, поэтому при включении КУ в узле  $I_{2c}$  число ветвей в СТЭ — 4.

В работе предлагается установить КУ мощностью 5Мвар в двух узлах:

- 1 вариант — в узле подстанции  $T2$ ;
- 2 вариант — в узле тяговой сети у Поста секционирования (ПС) между подстанциями  $T2$  и  $T3$  в узле  $I_{2c}$ ;
- расчет при отключенном КУ — вариант 3.

2. Работу провести на межподстанционной зоне между подстанциями  $T2$  и  $T3$ . Сформировать нагрузочный узел  $I_{2c}$  с током  $I_{4c}$ .

2.1. Найти на подстанции  $T2$  отстающую фазу и к ней подключить КУ (5 Мвар).

2.2. Установить токи  $I_{2b} = 200$ А ( $I_{2c} = 0$ )

2.3. Изменять ток  $I_{4c}$  от 0 до 500А с шагом 100А и при этом контролировать следующие характеристики:

- модуль напряжения на нагрузке у ПС;
- падение напряжения (продольная и поперечная слагающие) между подстанцией  $T2$  и ПС;
- активный и реактивный ток в тяговой сети этого же участка  $T2$  — ПС;
- модули напряжений по плечам питания подстанции  $T2$ .

3. Переключить КУ с тяговой подстанции на пост секционирования ПС и установить  $I_{2b} = 200$ А ( $I_{2c} = 0$ ).

3.1. Изменять ток  $I_{4c}$  от 0 до 500А с шагом 100А и при этом контролировать характеристики по п. 2.3.

3.2. Отключить КУ и повторить п. 2.3.

4. По полученным данным построить графики для трех вариантов — 1 вариант (КУ на подстанции), 2 вариант (КУ у ПС), 3 вариант (КУ отключено):

1) Зависимости модуля напряжения у ПС от нагрузки  $I_{4c}$  для 3 вариантов в одних осях (3 кривые).

2) Зависимости модулей напряжений  $T2$  по плечам питания от нагрузки  $I_{4c}$  для 3 вариантов в одних осях (6 кривых).

3) Зависимости активного и реактивного тока в тяговой сети участка  $T2$  — ПС от тока  $I_{4c}$  для 3 вариантов в одних осях (6 кривых).

4) Зависимости продольной и поперечной слагающих падений напряжения от нагрузки  $I_{4c}$  на участке  $T2$  — ПС для 3 вариантов в одних осях (6 кривых).

5. По полученным кривым сделать выводы об эффективности КУ по режиму напряжения, обращая внимание на следующее:

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВОК ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ (УПК) В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 25кВ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Оценить влияние УПК на стабилизацию и симметрирование напряжения на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций.

#### 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Установка продольной емкостной компенсации (УПК) — мощное техническое средство усиления и модернизации системы тягового электроснабжения (СТЭ) для эффективного повышения и стабилизации напряжения в тяговой сети.

УПК целесообразно применять при скоростном движении и при пропуске тяжеловесных поездов.

Эффект в повышении напряжения в СТЭ с помощью УПК определяется компенсацией предвключенного (перед УПК) индуктивного сопротивления  $X_n$ , которое в общем случае определяется суммой сопротивлений тяговой сети, трансформаторов тяговой подстанции и системы внешнего электроснабжения СВЭ.

УПК может устанавливаться в различных точках системы электроснабжения [3; 8]. По опыту эксплуатации наиболее эффективно УПК работает при включении в отсос тяговой подстанции [8]. В этом случае сопротивление УПК целесообразно принять

$$X_c = X_n, \quad (1)$$

где  $X_n$  — сумма сопротивлений фазы СВЭ до тяговой подстанции и его трансформатора.

Тогда напряжение плеча питания зависит только от нагрузки этого плеча (и не зависит от нагрузки смежного плеча питания).

При этом повышается и стабилизируется напряжение и, кроме того, уменьшается несимметрия напряжения на шинах 27,5 кВ. Поэтому улучшается режим напряжения не только в контактной

- при включении КУ в отстающую фазу подстанции выравниваются ли напряжения по плечам питания?
- при включении КУ на тяговой подстанции уменьшаются ли потери напряжения в тяговой сети?
- при включении КУ у ПС уменьшаются ли токи в тяговой сети? (активные или реактивные?)
- при включении КУ у ПС уменьшаются ли потери напряжения в тяговой сети?
- при отсутствии нагрузки у ПС напряжение на КУ не превышает ли допустимое значение 28кВ?

Ответы на эти вопросы и будут являться основой для выводов по работе.

#### Контрольные вопросы

1. Какое назначение КУ в системе тягового электроснабжения?
2. Где устанавливают КУ в системе тягового электроснабжения?
3. С целью большего повышения напряжения, где выгодно ставить КУ: на подстанции или у ПС?
4. Напишите формулу падения напряжения для участка тяговой сети переменного тока с КУ и без КУ.
5. Объясните, почему при отсутствии нагрузки в тяговой сети напряжение на КУ, включенного у ПС, может быть выше допустимого?
6. По режиму напряжения: где целесообразнее включить КУ — на подстанции или на посту секционирования?
7. По режиму напряжения: почему КУ в системе тягового электроснабжения целесообразно выполнять регулируемой?
8. Почему РПН трансформаторов эффективнее работает, если КУ включить в отстающую фазу тяговой подстанции?

сети, но и в линиях ДПР-27,5кВ и ВЛСЦБ-10(6)кВ. Кроме того, в связи с уменьшением несимметрии повышается эффективность работы регулятора напряжения трансформатора РПН (АРПН). Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности в соответствии с [11] определяется

$$K_{2u} = 0,62 (U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}) / U_{\text{ном}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{макс}}$  и  $U_{\text{мин}}$  — соответственно наибольшее и наименьшее напряжение из трех замеренных линейных напряжений.

По коэффициенту  $K_{2u}$  можно определить эффект в снижении несимметрии с помощью УПК.

УПК в очень малой степени повышает коэффициент мощности и поэтому в практических расчетах этим повышением пренебрегают.

При включении УПК в отсос (с сопротивлением  $X_c$ ) повышение напряжения на шинах 27,5кВ равно:

- на отстающей фазе

$$\delta U_{\text{от}} = I_{\text{от}} X_c \sin(\varphi_{\text{от}}) + I_{\text{оп}} X_c \sin(60 + \varphi_{\text{оп}}) \quad (3)$$

- на опережающей фазе

$$\delta U_{\text{оп}} = I_{\text{оп}} X_c \sin(\varphi_{\text{оп}}) - I_{\text{от}} X_c \sin(60 - \varphi_{\text{от}}), \quad (4)$$

где  $I_{\text{оп}}$ ,  $I_{\text{от}}$  — токи опережающей и отстающей фаз плеч питания,

$\varphi_{\text{оп}}$  и  $\varphi_{\text{от}}$  — углы сдвига фаз тока относительно «своих» напряжений.

При включении УПК (с сопротивлением  $X_c$ ) в плечо питания напряжение повышается на этой фазе

$$\delta U = I \cdot X_c \sin \varphi, \quad (5)$$

где  $I$  — ток нагрузки, протекающий через УПК и его фаза  $\varphi$ .

По формулам (3) — (5) можно определить полные потери напряжения по фазам с УПК, если вместо  $X_c$  подставить ( $X_{\text{п}} - X_c$ ).

В лабораторной работе студент должен доказать:

- что при включении УПК напряжение повышается и стабилизируется;

- что при включении УПК в отсос снижается несимметрия на шинах 27,5кВ.

Таким образом, предлагается следующий план лабораторной работы.

Для заданной схемы электроснабжения (см. рис. 1) рассчитать (измерить) напряжение на фазах «а», «b», «с» тяговой подстанции Т2 при изменении нагрузки плеча питания фазы «с» в трех вариантах:

- УПК на тяговой подстанции отсутствует;
- УПК включено в отсос подстанции;
- УПК включено в фазу плеча питания.

По полученным данным оценить:

- степень стабилизации напряжения при включении УПК;
- степень снижения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности.

### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Работа проводится на подстанции Т2 (см. рис. 1 и 2) в два этапа. На первом этапе для исследования режима работы тяговой подстанции с УПК рекомендуется установить нагрузку (электровоз) на фазе «b»  $I_{2b} = 200\text{А}$ , а на фазе «с» изменять нагрузку  $I_c$  в пределах 0...500А с шагом 100А (угол сдвига по фазе относительно «своего» напряжения составляет 30 град. индуктивных). Расчеты (измерения) произвести для трех вышеуказанных вариантов. В работе достаточно произвести измерения только модулей напряжений.

2. На втором этапе производится обработка результатов измерений, построение графиков, на анализе которых делаются выводы по работе.

Сопротивление УПК рассчитать по формуле (1). Сопротивление  $X_{\text{п}}$  соответствует собственному узловому сопротивлению узла 10., которое рассчитывается по программе РАСТ-05К. Для этого в окне узловых сопротивлений  $Z_o$  следует взять реактивное сопротивление в диагональном элементе на строке (столбце), соответствующей номеру узла 10.

### Контрольные вопросы

3. Предварительно производится проверочный расчет, чтобы убедиться в правильности введения исходных данных и в отсутствии синтаксических ошибок. Для этого выполняется расчет мгновенной схемы с  $I_{2b} = 200\text{А}$  и  $I_{2c} = 300\text{А}$  по формулам (3 и 4), а также на ПЭВМ по программе РАСТ-05К. Следует убедиться в идентичности полученных результатов этих расчетов по напряжению до и после включения УПК.

4. При изменении тяговой нагрузки  $I_{2c}$  в пределах 0... 500А (а  $I_{2b} = 200\text{А}$ ) по программе РАСТ-05К определяются напряжения всех трех фаз в трех вариантах (достаточно определять модули напряжений).

5. По данным п. 3.4 рассчитать по формуле (2) коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности.

6. По данным расчетов (измерений) в пп. 4 и 5 построить графики зависимости от изменяющегося тока  $I_{2c}$ :

- напряжения отстающей фазы питания тяговой сети;
- то же для опережающей фазы;
- коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности.

7. По полученным графикам сделать выводы по эффективности УПК.

В выводах указать:

- повышение напряжения при включении УПК;
- степень стабилизации напряжения при включении УПК (по разности напряжений при нулевой и максимальной нагрузках);
- уменьшение коэффициента несимметрии при включении УПК.

1. Какое основное назначение установки продольной емкостной компенсации (УПК) в тяговых сетях переменного тока?

2 В каких точках системы тягового электроснабжения целесообразно включать УПК?

3. В чем преимущество УПК, включенной в отсос тяговой подстанции системы 25кВ с трансформаторами по схеме соединения «звезда — треугольник»?

4 Почему при включении УПК в отсос тяговой подстанции улучшается работа РПН трансформатора?

5. Как определяется сопротивление УПК в отсосе тяговой подстанции?

6. В чем преимущества и недостатки установок УПК, включенных на стороне 110(220)кВ первичной обмотки трансформатора тяговой подстанции, и на шинах 27,5кВ?

7. Как рассчитать коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности?

### Литература

1. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог (ЦЭ-462) — 1997.

2. Силовое оборудование тяговых подстанций железных дорог. Сборник справочных материалов ОАО «РЖД» — М.: ТРАНСИЗДАТ, 2004. — 384с.

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

4. Герман Л. А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения. Конспект лекций. Ч. 1. — М.: РГОТУПС, 1998.

5. Герман Л. А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения. Конспект лекций. Ч. 2. — М.: РГОТУПС, 2000.

6. Герман Л. А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения. Конспект лекций. Ч. 3. — М.: РГОТУПС, 2003.

7. Караев Р. И. Волобринский С. Д., Ковалев И. Н. Электрические сети и энергосистемы. — М.: Транспорт, 1988. — 326 с.

8. Бородулин Б. М. Герман Л. А. Николаев Г. А. — Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1983. — 183 с.

9. Справочник по проектированию электрических сетей под ред. Д. Л. Файбисовича — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. — 320 с.

10. Фигурнов Е. П. Релейная защита. — М.: Желдориздат, 2002. — 720 с.

11. Карташов И. И. и др. Управление качеством электроэнергии. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с.

12. Александров К. К., Кузьмина Е. Г. Электрические чертежи и схемы. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 300 с.

**Российский государственный открытый технический университет путей сообщения (РГОТУПС)  
Нижегородский филиал**

**Кафедра «Энергоснабжение электрических железных дорог»**

**Программа для совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения  
РАСТ-05к**

Руководитель разработки:

д. т. н. Герман Л. А.

Разработчики:

Попов Д. С.

Шаров А. В.

**Нижний Новгород  
2007**

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ

Программа предназначена для расчета режима системы тягового электроснабжения переменного тока 25кВ с учетом режима системы внешнего электроснабжения [1] и определяет в расчете мгновенной схемы комплексные значения и модуль:

- напряжения по фазам тяговых и районных подстанций;
- напряжения в тяговой сети;
- токораспределение в схеме;
- уравнивающие токи;
- токи короткого замыкания (КЗ) в любой точке тяговой сети;
- потери мощности в тяговой сети и в целом по системе электроснабжения.

Расчеты выполняются с учетом реальных коэффициентов трансформации трансформаторов, установок продольной и поперечной емкостной компенсации.

Областью применения программы являются:

- институты и научные учреждения (для исследовательских и учебных расчетов);
- эксплуатационные организации (дистанции электроснабжения железных дорог и их подразделения: энергодиспетчерские, ремонтно-ревизионные участки, тяговые подстанции);
- проектные организации.

### 1.2. ОСНОВНАЯ ОСОБЕННОСТЬ ПРОГРАММЫ

Предлагаемая программа является развитием программы «RKPR» [2; 3] и выполнена в среде программирования «Delphi 7», что улучшило ее сервисные возможности. Главное отличие программы — совместный расчет систем тягового (СТЭ) и внешнего (СВЭ) электроснабжения. Это удалось сделать на основе разработанной так называемой *лучевой схемы замещения* [1], в которой система СВЭ представлена многополюсником с матрицей узловых собственных и взаимных со-

противлений. При этом тяговые нагрузки включены по схеме «звезда», а тяговая сеть представлена двухполюсником, подключенным к выводам одноименных фаз смежных подстанций или многополюсником — при учете поперечной проводимости тяговой сети и установок поперечной емкостной компенсации. Основная идея формирования лучевой схемы замещения — новое преобразование схем внешнего и тягового электроснабжения с трансформаторами «звезда-треугольник» в схему с включением тяговой нагрузки по схеме «звезда». Этим самым значительно снижается методическая погрешность расчета режима в сравнении с существующими методами (например, по сравнению с программой ВНИИЖТа «NORD», где СВЭ учитывается только узловыми собственными сопротивлениями). Параметры СВЭ определяются по соответствующей справочной литературе, например [4], а параметры тяговых подстанций и тяговой сети — по материалам «Руководящих указаний по релейной защите систем тягового электроснабжения» [5] и специальной литературе [6, 7].

Для моделирования реальной схемы соединения системы тягового электроснабжения с учетом постов секционирования, точек подключения автотрансформаторов и любых других узлов СТЭ (в том числе, при необходимости учета тяговой нагрузки в тяговой сети, коротких замыканий, в случаях, когда тяговая сеть состоит из участков с различным сечением и т.п.) в программе предусмотрены *фиктивные узлы*. Последние формируются программой и подключаются к источнику через большое сопротивление. Формирование фиктивных узлов рассмотрено далее в п. 11.

Короткое замыкание в тяговой сети моделируется пользователем путем подключения фиктивного узла точки КЗ к рельсу (узел Р) через переходное сопротивление, которое можно принять  $Z_{пер} = 4,0 + j0,0$  Ом [5].

### 1.3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Программа реализует расчеты в мгновенной схеме по основным формулам [1]:

падения напряжения в узлах

$$\Delta \dot{U} = \underline{Z}_{OY} (\dot{I} + M \dot{I}_{yp}),$$

уравнительный ток в тяговой сети (когда нагрузка тяговой сети приведена к узлам тяговой подстанции)

$$\dot{I}_{yp} = (M^T \cdot \underline{Z}_{OY} \cdot M + \underline{Z}_{TC})^{-1} M^T (n^d \cdot \dot{E} - \underline{Z}_{OY} \cdot \dot{I}),$$

потери мощности

$$\Delta \dot{S} = \Delta \dot{S}_C + \Delta \dot{S}_{yp} + \Delta \dot{S}_T = (\dot{I} + M \dot{I}_{yp})^T \underline{Z}_{OY} \left( \dot{I} + M \dot{I}_{yp} \right)^* + \dot{I}_{yp}^T \underline{Z}_{TC} \dot{I}_{yp} + \Delta \dot{S}_T,$$

ток короткого замыкания в произвольной точке тяговой сети

$$\dot{I}_{K3} = (M^T \cdot \underline{Z}'_{OY} \cdot M + \underline{Z}_{TC})^{-1} M^T (n^d \cdot \dot{E} - \underline{Z}'_{OY} \cdot \dot{I}),$$

где  $M$  — матрица соединений подключаемых ветвей тяговой сети ( $M^T$  — транспонированная матрица);

$\underline{Z}_{OY}$  — матрица узловых сопротивлений трехфазной сети;

$\underline{Z}'_{OY}$  — то же с учетом фиктивных узлов;

$\underline{Z}_{TC}$  — диагональная матрица сопротивлений ветвей тяговой сети;

$n^d$  — диагональная матрица коэффициентов трансформации тяговых трансформаторов;

$\dot{E}$  — матрица ЭДС;

$\dot{I}$  — матрица нагрузочных токов ( $\dot{I}$  — сопряженное значение);

$\Delta \dot{S}_C$  — потери мощности в СВЭ (включая тяговые трансформаторы тяговых подстанций);

$\Delta \dot{S}_{yp}$  — потери мощности в тяговой сети от уравнительного тока;

$\Delta \dot{S}_T$  — потери мощности в тяговой сети от тяговой нагрузки.

В формуле расчета токов КЗ матрица узловых сопротивлений трехфазной сети  $\underline{Z}'_{OY}$  рассчитывается с учетом фиктивных узлов.

### 1.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАММЫ:

Допустимое число узлов и число ветвей не менее 10000 и они ограничены объемом памяти компьютера.

### 1.5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЭВМ:

Компьютер, совместимый с IBM AT, операционная система Windows.

### 1.6. ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММЫ СЛЕДУЮЩИЕ:

- тяговые нагрузки, соединенные по схеме «треугольник», преобразованы в схему «звезда»;
- нагрузочные узлы, посты секционирования и пункты параллельного соединения могут располагаться в любой точке тяговой сети. Для этого в программе введены так называемые, фиктивные узлы;
- трансформаторы с регулируемыми коэффициентами трансформации представлены классической Г-образной схемой замещения, параметры которой зависят от коэффициента трансформации (также как и параметры трехфазных сетей);
- несимметричные установки продольной емкостной компенсации в схеме замещения представлены соответствующими емкостными сопротивлениями, а несимметричные установки поперечной емкостной компенсации в зависимости от задач расчета представляются или шунтирующими сопротивлениями, или задающими токами;
- после расчета есть возможность посмотреть в каждом узле тяговой сети векторную диаграмму тока нагрузки и напряжения (см. далее рис. 10 «График»);
- программа имеет простой понятный интерфейс для ввода и вывода данных. Специальной подготовки пользователя не требуется. Возможен вывод результатов расчета на печать.

### 1.7. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ В ПРОГРАММЕ:

- принимается, что сети СВЭ — симметричные;
- тяговые нагрузки принимаются источниками тока. Заданная фаза устанавливается программой в процессе итераций. Число итераций указывается в расчете (обычно 1—2) (см рис. 10);
  - если нагрузки представлены неизменной мощностью, то производится пересчет в токовую нагрузку и далее используется итерационный цикл;
  - сопротивление тяговой сети учитывается как сопротивление однопроводной сети по методике [5] с «нулевым обратным» проводом с сопротивлением  $Z=0$ ;
  - расчеты выполняются для первой гармоники тока и напряжения.

### Литература

1. Герман Л. А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения. Конспект лекций. (Ч. I — 1998, Ч. II — 2000, Ч. III — 2003.) — М.: РГОТУПС.
2. Герман Л. А., Сухов М. Ю. Комплекс программ для расчета и оптимизации режима работы тяговых подстанций на микро-ЭВМ. /Информ. Листок/ Горьковский ЦНТИ — Горький, 1987. — №441-87. — 4с.
3. Герман Л. А., Сухов М. Ю. Расчет уравнительного тока, падений напряжений в узлах, потерь мощности. Горьковский филиал ВЗИИТа. Инф. бюлетень //Алгоритмы и программы// 1990. №4. — С. 13. №5080000903.
4. Справочник по проектированию электрических сетей. / Под ред. Д.Л. Файбисовича. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. — 320с.
5. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения./Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги». — М.: «Трансиздат», 2005. — 216 с.

6. Силовое оборудование тяговых подстанций железных дорог. (Сборник справочных материалов). ОАО «РЖД», филиал ПКБ ЦЭ. — М.: «Трансиздат», 2004. — 384 с.

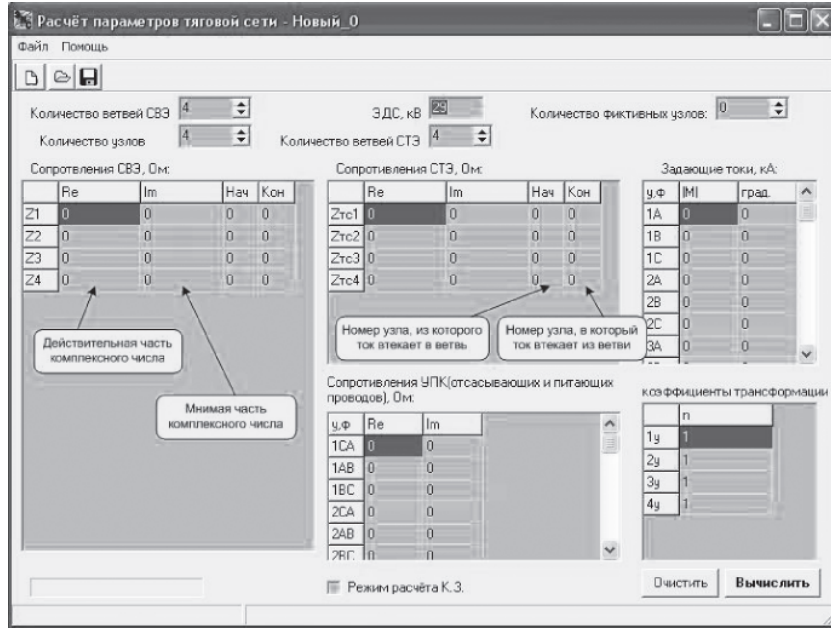
7. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1983. — 183 с.

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



## 2. ПОДГОТОВКА И ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ




Внешний вид окна программы представлен на рисунке 1:



\*С указанием фазы ветви тяговой сети (например, 6b, 8c)

Рис. 1. Внешний вид окна программы

Окно содержит Главное меню, состоящее из 2-х подменю: **Файл** **Файл** и **Помощь** **Помощь**

Окно содержит также панель задач с кнопками быстрого доступа: **Новый** , **Открыть**  и **Сохранить** 

1. По заданной схеме системы внешнего электроснабжения формируется схема замещения электрической сети, включая тяговые трансформаторы и тяговую сеть. Значения сопротивлений схемы, а также задающих токов в узлах необходимо привести к напряжению 27,5 кВ. В качестве примера приведена схема замещения на рис. 2. (Исходная схема электроснабжения — рис. 2, a). Трансформаторы на данной схеме представлены как идеальные, их сопротивления учтены в сопротивлениях включенных после-

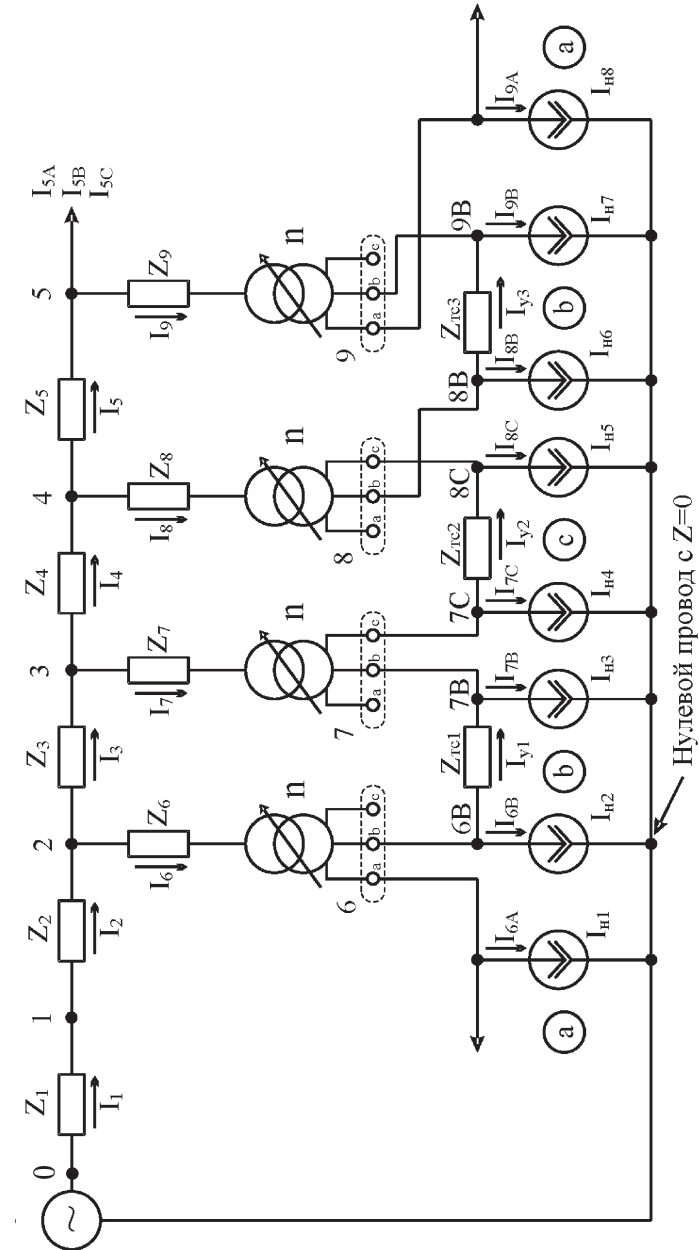


Рис. 2. Схема замещения электрической сети

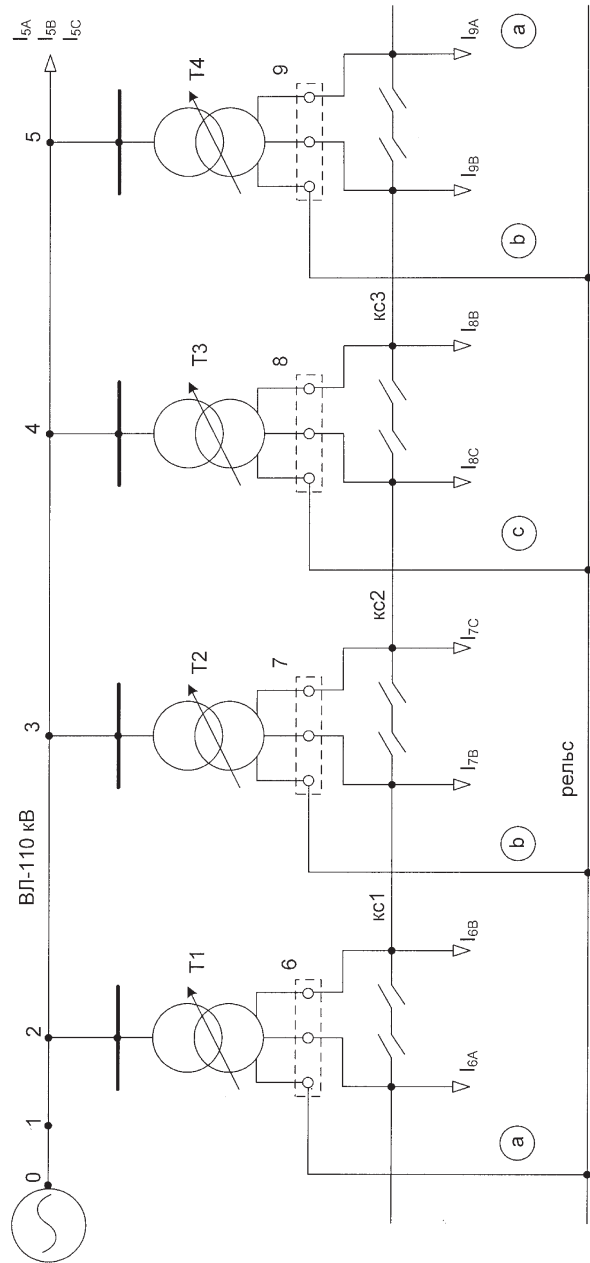


Рис. 2,а. Схема электроснабжения

довательно у соответствующих трансформаторов. Линии ВЛ-110кВ и тяговые трансформаторы представлены трехфазными элементами (изображены в однолинейном виде), а тяговая сеть — однофазными.

Тяговые нагрузки представлены в соединении «звезда».

Таким образом, схема замещения — результат соответствующих преобразований [1], в результате которых удалось подключать токи тяговой нагрузки в соединении «звезда», но при этом трехфазные элементы СВЭ в схеме представлены соответствующими преобразованными тензорами сопротивлений [1], а схема тягового трансформатора «звезда—звезда».

2. Задается произвольное направление токов в ветвях схемы замещения.

3. На схеме замещения нумеруются все узлы (генераторный узел имеет номер 0!) и связывающие их ветви, подробно рассматривается система тягового электроснабжения (указываются фазы тяговых трансформаторов, питающих тяговую сеть — *a, b, c*, фазы тяговой сети, нагрузки, в номера узлов добавляются индексы фаз (A, B, C)).

Все узлы нулевого провода с  $Z=0$  обозначаются как «P». Например, при подключении КУ с сопротивлением  $X_k$  в узел 6B следует в окно исходных данных по СТЭ ввести: начало ветви — 6B, а конец — P (см. далее).

Определяется необходимое число фиктивных узлов для рассматриваемой схемы соединения тяговой сети. Фиктивные узлы имеют нумерацию, продолжающую нумерацию узлов СВЭ. Индексы фаз при подключении к ним ветвей тяговой сети должны совпадать с фазой, которая используется на этом участке.

4. Пример схемы подключения тяговой сети и преобразованной схемы замещения системы тягового электроснабжения приведены на рис. 3 и 4. Однофазные УПК включаются на стороне 27,5кВ (рис. 5). Для снижения размерности задачи номера узлов подключения тяговых трансформаторов ликвидируются и переносятся в узлы подключения УПК к тяговой сети. Узлы 6, 7, 8, 9 (см. на рис. 2 — 4) — трехфазные с фазами «А», «В», «С» (это не выводы трансформатора!) являются точками подключения тяговой нагрузки. Таким образом, получаем для схемы на рис. 2: узлов-9; ветвей СВЭ-9; ветвей СТЭ-3. На рис. 5  $Z_n$  и  $Z_o$  — сопротивления питающих и отсасывающих линий.

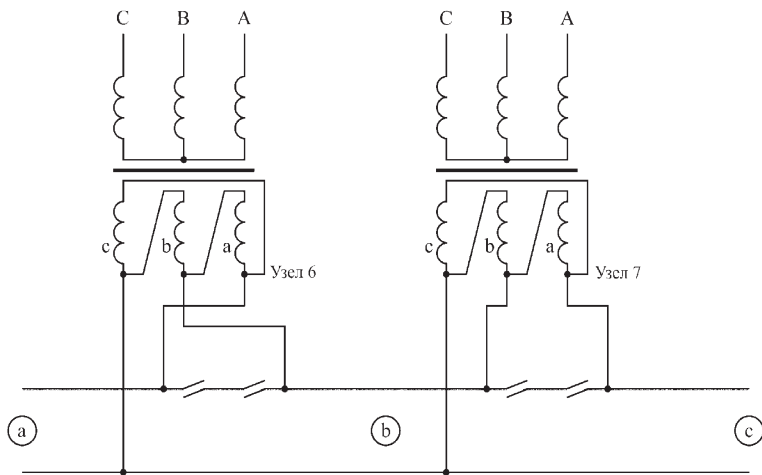


Рис. 3. Схема подключения тяговых ветвей

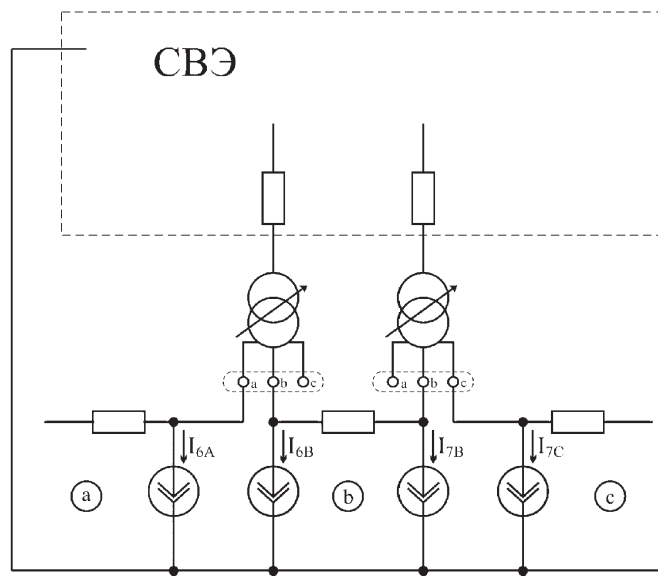


Рис. 4. Преобразованная схема замещения системы тягового электроснабжения

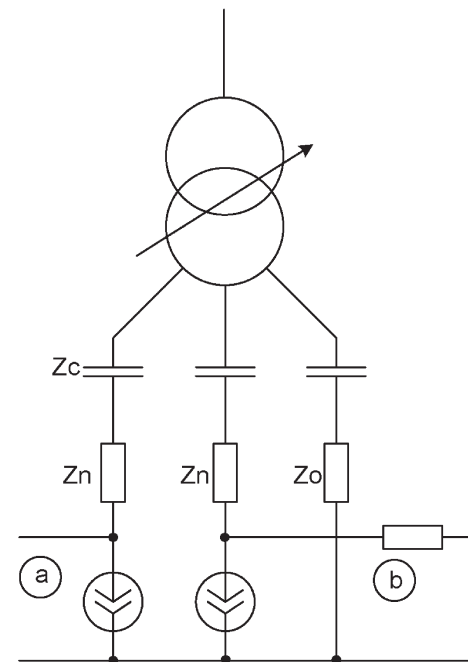


Рис. 5. Схема подключения сопротивлений питающих и отсасывающих проводов и УПК  
 $Z_n$  и  $Z_o$  — сопротивления питающих и отсасывающих линий

5. Далее необходимо ввести в соответствующее поле со счетчиком значения параметров схемы замещения (количество узлов, фиктивных узлов ветвей СВЭ и СТЭ). Для обнуления ячеек таблиц необходимо нажать кнопку Очистить.

В поле с надписью ЭДС необходимо ввести напряжение источника ЭДС в киловольтах. Если нет особых оговорок, то целесообразно напряжение источника ЭДС увеличить на 5% от номинального значения, что для тяговой сети 27,5кВ составляет 29кВ.

6. В таблицу сопротивлений СВЭ вносятся комплексные значения сопротивлений ветвей СВЭ (включая сопротивления трансформаторов тяговых подстанций) в соответствующие ячейки (действительная часть в первый столбец, мнимая во второй). В эту же таблицу заносятся номера узлов, к которым подсоединяются соответствующие ветви по принципу: в столбец 3 **Нач** заносятся номера узлов, из которых ток вытекает в ветвь (см. рис.1), а в столбец 4 **Кон** заносятся номера узлов, в которые ток втекает из ветви. Пример заполнения таблицы сопротивлений СВЭ приведен в табл. 1 и на рис. 7.

Таблица 1

Ветвь	Активное сопротивление, Ом	Реактивное сопротивление, Ом	Номер узла начала ветви	Номер узла конца ветви
Z1	0,1951	1,000	0	1
Z2	0,1488	0,3381	1	2
Z3	0,5919	1,3437	2	3
Z4	0,9281	1,3681	3	4
Z5	0,8100	1,1938	4	5
Z6	0,2400	4,0600	2	6
Z7	0,0950	2,0300	3	7
Z8	0,0950	2,0300	4	8
Z9	0,0950	2,0300	5	9

7. Таблица сопротивлений СТЭ заполняется таким же образом, как и таблица сопротивлений СВЭ за исключением номеров узлов: за номером узла следует буква, указывающая на то, к какой фазе данного узла подсоединена ветвь тяговой сети. Пример заполнения таблицы сопротивлений СТЭ приведен в табл. 2 и на рис. 7.

Таблица 2

Ветвь	Активное сопротивление, Ом	Реактивное сопротивление, Ом	Номер узла начала ветви	Номер узла конца ветви
Z1	5,342	15,241	6В	7В
Z2	7,003	18,609	7С	8С
Z3	6,680	17,873	8В	9В

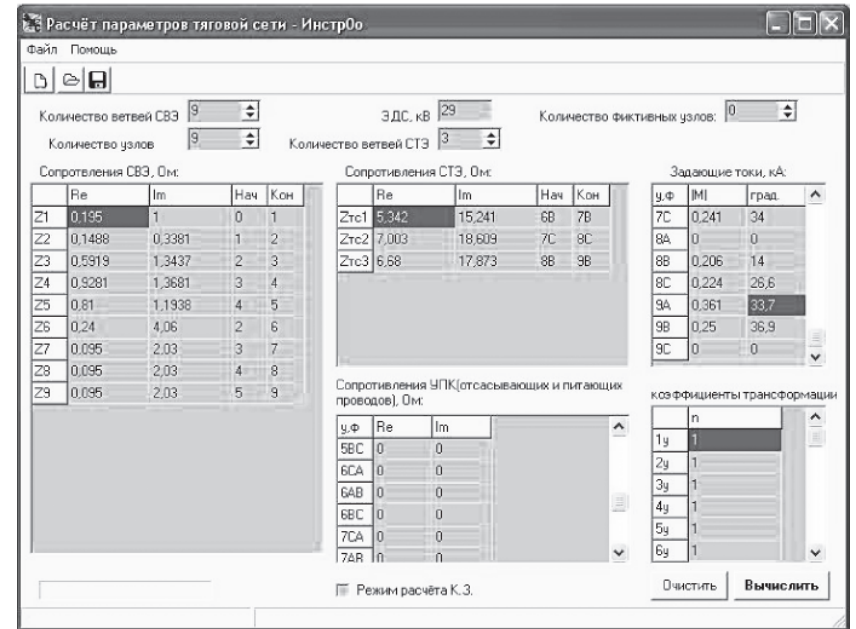


Рис. 7. Пример ввода данных

8. Заполняется таблица узловых задающих токов (значения токов задаются **в килоамперах!**). В строках таблицы находятся номера узлов, в первый столбец «Re»  заносится действительная часть комплексного числа, во второй «Im»  — мнимая. Знак минус мнимой части указывает на индуктивный характер нагрузки. Расчеты производятся для задающих токов. Если нагрузка задана мощностью, то расчеты также производятся по токам, но с последующим итеративным пересчетом. По умолчанию таблица заполнена нулевыми значениями.

В некоторых версиях программы (см. рис.7) ток задается модулем M (первый столбец) и фазой (в градусах, второй столбец).

Пример заполнения таблицы ненулевых узловых задающих токов приведен в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 3

Узел	Активный ток, кА	Реактивный ток, кА
6А	0,150	-0,100
6В	0,200	-0,100
7В	0,300	-0,150
7С	0,200	-0,135
8В	0,200	-0,050
8С	0,200	-0,100
9А	0,300	-0,200
9В	0,200	-0,150

9. Вводятся данные по сопротивлениям питающих, отсасывающих проводов (от тяговой подстанции до тяговой сети), а также данные по сопротивлениям установок продольной емкостной компенсации (УПК), включенных у тяговой подстанции. На рис. 5 показана схема включения этих сопротивлений, где  $Z_{n\ AB}^o$ ,  $Z_{n\ BC}^n$ ,  $Z_{n\ CA}^n$  — сопротивления питающих и отсасывающих проводов;  $Z_{n\ CA}^n$ ,  $Z_{n\ BC}^n$ ,  $Z_{n\ CA}^n$  — сопротивления УПК. Важно правильно показать индексы указанных сопротивлений, которые соответствуют линейным проводам АВ, ВС, СА, подсоединенным к соответствующим фазам тяговых трансформаторов (для примера на рис.6 показаны сопротивления УПК, питающих и отсасывающих линий в линейных проводах у трансформатора, подключенного к узлу «б»). По умолчанию таблица заполнена нулевыми значениями.

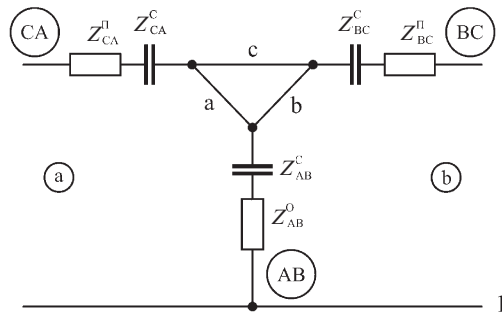


Рис. 6. Формирование обозначений сопротивлений, питающих и отсасывающих проводов и УПК

Пример заполнения таблицы ненулевых сопротивлений УПК и питающих проводов приведен в табл. 4 и на рис. 7. Здесь УПК включено только в отсос (в линейный провод АВ), сопротивление отсасывающих проводов равно нулю, а сопротивления питающих проводов указаны в табл. 4.

Таблица 4

Ветвь	Активное сопротивление, Ом	Реактивное сопротивление, Ом
6СА	0,012	0,040
6АВ	0,005	-2,000
6ВС	0,012	0,040

10. Заполняется таблица значений коэффициентов трансформации. Коэффициенты трансформации задаются в относительных единицах, как отношение действительного коэффициента трансформации к номинальному. По умолчанию таблица заполнена значениями номинальных коэффициентов трансформации (равных единице), что соответствует среднему положению РПН трансформатора.

Вид окна с введенными данными показан на рис. 7.



Файл с разобранным примером формирования схемы замещения. (Режим\_пример. rst) поставляется совместно с программой расчета. Кроме того, прилагаются файлы kz\_описание.doc, kz\_пример. rst с разобранным примером расчета программой тока КЗ. При расчете тока КЗ следует «нажать на кнопку» «Расчет тока КЗ».

11. Для формирования дополнительных узлов в схеме (узлов подключения тяговой нагрузки на контактной сети и КУ, узлов поста секционирования и пункта параллельного соединения, точки КЗ и т.д.) в программу вводятся, так называемые, фиктивные узлы, которые применяются и формируются в двух вариантах.

В а р и а н т 1. Если заранее известно, что в той или иной точке схемы тяговой сети должен быть узел (например ПС), то в исходных данных по СВЭ вводится ветвь с большим сопротивлением (10 000 Ом) между узлом ПС (например, I2с) и узлом «0» СВЭ.


**В а р и а н т 2** Если же в процессе расчетов необходимо изменить (добавить) место расположения тяговой нагрузки, то тогда изменяется (добавляется) ветвь (с сопротивлением 10 000 Ом), соединяющая узел «Р» с новым узлом в тяговой сети (например, I2с). В этом случае следует указать в Окне исходных данных количество фиктивных узлов.

### 3. СОХРАНЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

После ввода исходных данных, возможно их сохранение. Для этого необходимо нажать кнопку «Сохранить»  на панели задач. Если файла с данным именем не существует, то в диалоговом окне будет предложено выбрать имя файла и путь его сохранения. Если файл с указанным именем существует, то будет предложено переписать его с новыми данными. Данные функции доступны также из меню «Файл»  главного меню. Для того, чтобы сохранить данные в файле с другим именем необходимо выбрать меню «Файл», в этом меню выбрать пункт «Сохранить как...», после чего будет предложено окно, предлагающее выбрать другое имя файла и путь его сохранения.

Данные сохраняются в файлах, имеющих расширение «.rst».

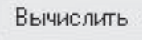
### 4. ЗАГРУЗКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ИЗ ФАЙЛА

Программа позволяет производить загрузку исходных данных из предварительно сохраненного файла. Для этого необходимо нажать на кнопку «Открыть»  на панели задач. После этого будет открыто окно, предлагающее выбрать нужный файл. В окне по умолчанию отображаются файлы с расширением «.rst».

## 5. ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

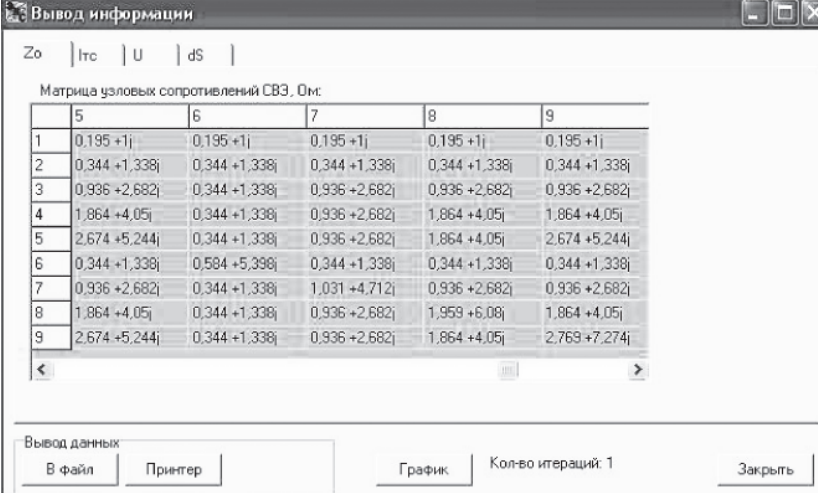
Для вывода результатов расчета необходимо

5.1. Установить переключатель вариантов расчета в положение «Расчет уравнивающих токов», щелкнув мышкой по соответствующему полю переключателя.

5.2. Нажать кнопку «Вычислить» . Результаты расчета выводятся в отдельном окне. Окно содержит четыре вкладки.

На первой вкладке (рис. 8) показана матрица узловых сопротивлений.

Таблица второй вкладки (рис. 9) содержит значения токов в тяговой сети между нагрузочными узлами. Первый столбец содержит комплексные значения токов в соответствующих ветвях тяговой сети. Второй столбец таблицы содержит значения токов, представленные в показательной форме в следующем формате: «23,5(-9,79°)» — число «23,5» представляет собой модуль соответствующего тока, число в скобках «-9,79» — угол в градусах между током и ЭДС фазы А. Знак «минус» указывает на то, что ток отстает от напряжения.



Вывод информации

Zo | Irc | U | dS |

Матрица узловых сопротивлений СВЗ, Ом:

	5	6	7	8	9
1	0,195 +1j	0,195 +1j	0,195 +1j	0,195 +1j	0,195 +1j
2	0,344 +1,338j	0,344 +1,338j	0,344 +1,338j	0,344 +1,338j	0,344 +1,338j
3	0,936 +2,682j	0,344 +1,338j	0,936 +2,682j	0,936 +2,682j	0,936 +2,682j
4	1,864 +4,05j	0,344 +1,338j	0,936 +2,682j	1,864 +4,05j	1,864 +4,05j
5	2,674 +5,244j	0,344 +1,338j	0,936 +2,682j	1,864 +4,05j	2,674 +5,244j
6	0,344 +1,338j	0,584 +5,398j	0,344 +1,338j	0,344 +1,338j	0,344 +1,338j
7	0,936 +2,682j	0,344 +1,338j	1,031 +4,712j	0,936 +2,682j	0,936 +2,682j
8	1,864 +4,05j	0,344 +1,338j	0,936 +2,682j	1,959 +6,08j	1,864 +4,05j
9	2,674 +5,244j	0,344 +1,338j	0,936 +2,682j	1,864 +4,05j	2,769 +7,274j

Вывод данных

В файл | Принтер | График | Кол-во итераций: 1 | Закреть

Рис. 8. Матрица узловых сопротивлений

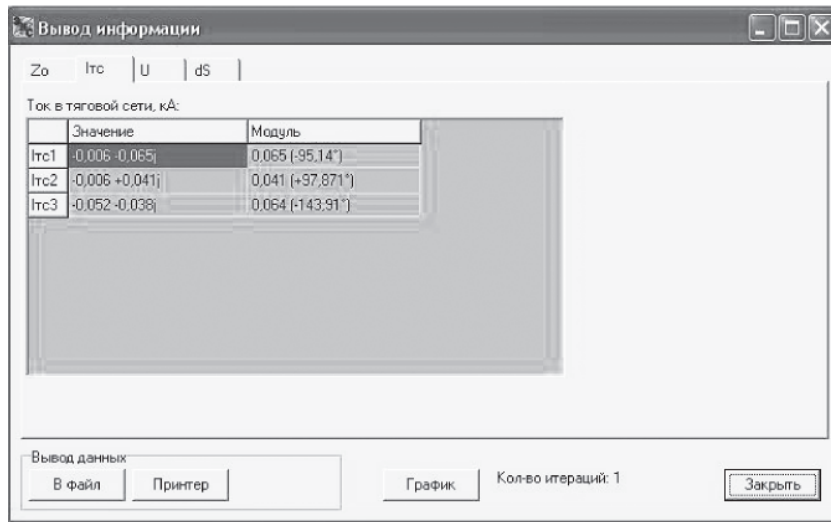


Рис. 9. Значения токов в тяговой сети

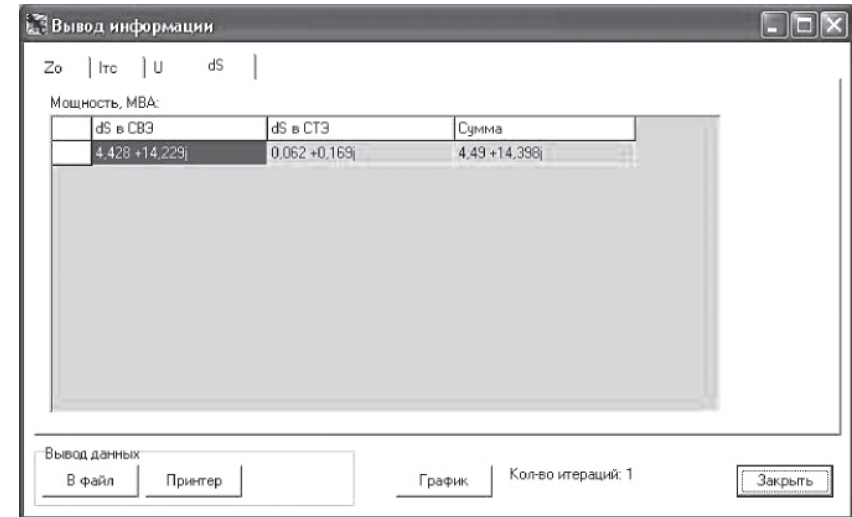


Рис. 11. Значения потерь мощности

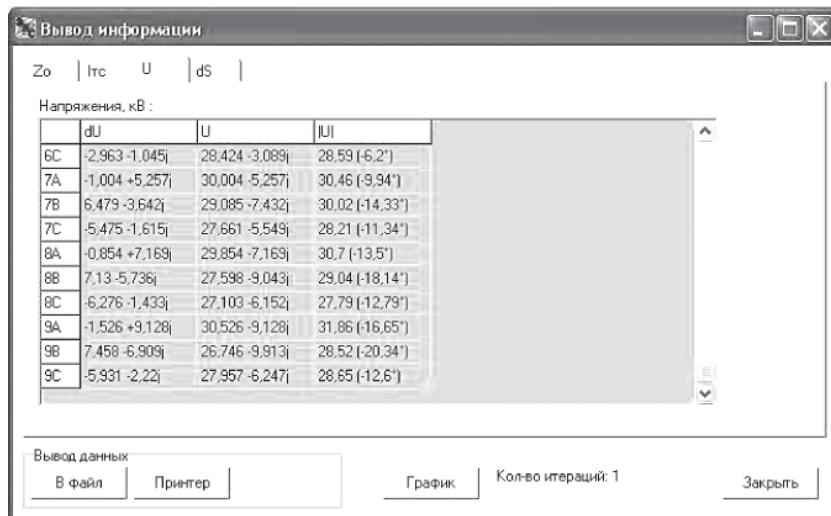


Рис. 10. Значения напряжений в узлах


**ВНИМАНИЕ!** Все углы сдвига фазы токов в тяговой сети указаны относительно ЭДС фазы А.

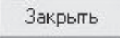

В частном случае, когда нагрузки включены только в узлах тяговых подстанций (т. е. в тяговой сети нагрузок нет), то ток в тяговой сети равен уравнительному току (см. рис. 9)

Третья вкладка (рис. 10) предназначена для вывода значений падений напряжений, напряжений и модулей напряжений в узлах (кВ), которые выводятся соответственно в первый, второй и третий столбцы таблицы. Третий столбец содержит значения напряжений в показательной форме. Формат значений описан *выше* при описании токов тяговой сети.

Страница четвертой вкладки (рис.11) содержит значения суммарных потерь мощности в СВЭ и в СТЭ, а также сумму их.

Программа имеет возможность сохранения результатов расчета. Для этого в окне вывода информации имеется группа кнопок «Вывод данных» . Кнопка служит для вывода результатов расчета в текстовый файл. После нажатия кнопки предлагается ввести имя файла, в который будет

произведен вывод данных. После выбора имени файла будет предложена возможность просмотра данного файла, используя программу Блокнот. При нажатии кнопки  вывод данных будет произведен на принтер.

Для закрытия окна вывода результатов расчета необходимо нажать на кнопку «Закрыть»  или на кнопку  в правом верхнем углу окна.

### **Внимание!**

1. Кнопка «График» позволяет просмотреть векторную диаграмму тока и напряжения в любом узле, после «нажатия» которой следует обозначить номер интересующего узла. Кроме того есть возможность масштабировать значения токов.

2. Заданный сдвиг фазы узлового тока относительно напряжения формируется в итерационном цикле, число полученных итераций указывается на вкладке (см. рис. 9, 10, 11), обычно это 1...2 итерации.

## **ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

### **Руководство по выполнению лабораторных работ**

Редактор *Д.Н. Тихонычев*  
Корректор *В.В. Игнатова*  
Компьютерная верстка *Л.В. Орлова*

---

Тип. зак.	Изд. зак.186	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 23.04.07	Гарнитура NewtonС	Офсет
Усл. печ. л. 3,0		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2