

ISSN 1990-4512 (Print)  
ISSN 2409-1057 (Online)

# ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

# BULLETIN

OF THE SOUTH URAL  
STATE UNIVERSITY

**СЕРИЯ**

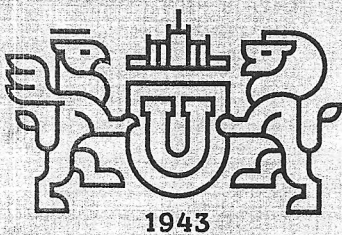
**ЭНЕРГЕТИКА**

**2018, том 18, № 1**

**SERIES**

**POWER  
ENGINEERING**

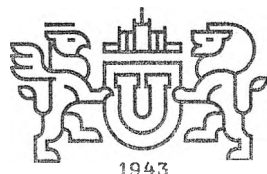
**2018, volume 18, no. 1**



Генеральный секретарь



ВЕСТИНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

2018  
Т. 18, № 1

ISSN 1990-8512 (Print)  
ISSN 2409-1057 (Online)

СЕРИЯ

«ЭНЕРГЕТИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает актуальные теоретические и практические проблемы энергетики и электротехники, результаты научно-исследовательских работ, передовой опыт, определяющий направление и развитие научных исследований, публикует материалы научных конференций и совещаний.

Основной целью журнала является консолидация сообщества ученых и практиков, способствование в формировании и развитии наиболее перспективных направлений исследовательской практики, представление информации о научных исследованиях и достижениях.

**Редакционная коллегия:**

Ганджа С.А., д.т.н., проф.  
Радионов А.А., д.т.н., проф. (главный редактор)  
Функ Т.А., к.т.н., доц. (ответственный секретарь)

**Редакционный совет:**

Абрамович Б.Н., д.т.н., проф. (Санкт-Петербург)  
Агапитов Е.Б., д.т.н., доц. (Магнитогорск)  
Алюков С.В., д.т.н., доц.  
Беспалов В.Я., д.т.н., проф. (Москва)  
Браславский И.Я., д.т.н., проф. (Екатеринбург)  
Бродов Ю.М., д.т.н., проф. (Екатеринбург)  
Бугырин П.А., д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (Москва)  
Валеев Р.Г., к.т.н., доц.  
Воронин С.Г., д.т.н., проф.  
Гладышев С.П., д.т.н., проф. (Дирборн, США)  
Гольдштейн М.Е., к.т.н., проф.  
Гордон Я., Ph.D. (Миссиссога, Канада)  
Григорьев М.А., д.т.н., доц.  
Домрачев В.Г., д.т.н., проф. (Москва)  
Дудкин М.М., д.т.н., доц.

Исмагилов Ф.Р., д.т.н., проф. (Уфа)  
Карадаев А.С., д.т.н., проф.  
Кирпичникова И.М., д.т.н., проф.  
Кодкин В.Л., д.т.н., проф.  
Козярук А.Е., д.т.н., проф. (Санкт-Петербург)  
Колганов А.Р., д.т.н., проф. (Иваново)  
Корнилов Г.П., д.т.н., проф. (Магнитогорск)  
Куликова Л.В., д.т.н., проф., чл.-корр. САН ВШ  
(Барнаул)  
Лятхер В.М., д.т.н., проф. (Кливленд, США)  
Мешеряков В.Н., д.т.н., проф. (Липецк)  
Пятибратов Г.Я., д.т.н., проф. (Новочеркасск)  
Резник Л.Ф., Ph.D. (Ришон-ле-Цион, Израиль)  
Сарваров А.С., д.т.н., проф. (Магнитогорск)  
Тума И., д.т.н., проф. (Прага, Чешская Республика)  
Торопов Е.В., д.т.н., проф.  
Усынин Ю.С., д.т.н., проф.  
Фёдоров О.В., д.т.н., проф. (Нижний Новгород)  
Хохлов Ю.И., д.т.н., проф.  
Хусаинов Ш.Н., д.т.н., проф.  
Шевырёв Ю.В., д.т.н., доц. (Москва)

# СОДЕРЖАНИЕ

## Теплоэнергетика

ЮШКОВ Н.В., ГУБАРЕВ В.Я. Исследование процесса теплообмена в пре-скруббере системы мокрой газоочистки доменного газа проекта компании Paul Wurth .....	5
ДУБИНИН А.М., ЧЕРЕПАНОВА Е.В., ТУПОНОГОВ В.Г., ГРИЦУК С.А., ЕМЕЛЬЯНОВА А.А. Термохимический реактор восстановительных атмосфер с окислением части продуктов паровой конверсии метана .....	12

## Электроэнергетика

НЕСТЕРОВ А.С., ВАСИЛЬЕВ П.Ф., КОБЫЛИН В.П. Анализ и расчет пропускной способности воздушных линий электропередачи .....	21
ВОРОНОВ П.Л. Особенности применения матриц преобразования и уравнений связи при анализе несимметричных повреждений .....	27
ГОЛЬДШТЕЙН М.Е., ПОСНОВ А.А., ПОСНОВА А.Д. Адаптивная кратность форсировки по току синхронных генераторов с тиристорными системами самовозбуждения .....	38
ОМОРОВ Т.Т., ОСМОНОВА Р.Ч., КОЙБАГАРОВ Т.Ж. Параметрическая идентификация распределительной сети в составе АСКУЭ .....	46
ОСАК А.Б., БУЗИНА Е.Я. Метод и программное обеспечение для оценивания состояния параметров режима энергорайона .....	53
ДМИТРИЕВ А.В., ДМИТРИЕВА О.С., МАДЫШЕВ И.Н. Использование дополнительного охлаждения масляных трансформаторов при совместной работе термоэлектрических преобразователей и грунтовых теплообменников .....	61
ФЕДОРОВ А.В. Твердотельные источники энергии установок СВЧ диэлектрического нагрева .....	68

## Преобразовательная техника

ГОЛЕМБИОВСКИЙ Ю.М., ТОМАШЕВСКИЙ Ю.Б., ЩЕРБАКОВ А.А., ЛУКОВ Д.Ю., СТАРКОВ А.В. Автономный однофазный инвертор с высоким качеством выходного напряжения .....	75
УДОВИЧЕНКО А.В., ГРИШАНОВ Е.В., ДЫБКО М.А., КУЧАК С.В., БРОВАНОВ С.В. Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в многозонном полупроводниковом преобразователе .....	82
МАКЛАКОВ А.С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник .....	92

## Электромеханические системы

KHRAMSHIN V.R., GASIYAROV V.R., KARANDAEV A.S., BASKOV S.N., LOGINOV B.M. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive .....	101
НЕУСТРОЕВ Н.И., КОТОВ А.А., КИЕСШ И.Е. Применение системы автоматического проектирования ANSYS Maxwell для количественной оценки влияния эффекта вытеснения тока в электрических машинах переменного тока .....	112
КОЗЯРУК А.Е., ВАСИЛЬЕВ Б.Ю., ЯЦЕНКО Ю.О., ИВАНОВСКИЙ А.И. Математическое и имитационное моделирование электропривода с преобразователем частоты нефтегазового оборудования .....	122
КУЛАКОВСКИЙ Ю.М., АРИСТОВ А.В. Определение влияния параметров источника питания на резонансный режим работы вентильного электропривода колебательного движения .....	133

## Краткие сообщения

НИЗАМУТДИНОВА Н.С., КИРПИЧНИКОВА И.М., ПТАШКИНА-ГИРИНА О.С. Мировой и российский опыт применения государственной поддержки возобновляемой энергетики .....	140
--	-----



## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В СОСТАВЕ АСКУЭ

*Т.Т. Оморов, Р.Ч. Осмонова, Т.Ж. Койбагаров*

*Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек,  
Кыргызская Республика*

Основными функциями современных автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) являются измерение данных с группы электронных счетчиков, установленных у абонентов распределительной электрической сети (РЭС), и коммерческий учет электроэнергии. В то же время для значительного повышения технико-экономических показателей этих систем и распределительных компаний целесообразным является дополнительное включение в состав АСКУЭ новых функциональных подсистем, предназначенных для решения задач оперативного мониторинга, диагностики состояния трехфазной сети и оптимизации режимов их работы. В целях разработки методологических и алгоритмических основ их построения в большинстве случаев необходимо знание о параметрах РЭС, определяемых сопротивлениями межабонентских участков магистральной линии. В связи с этим в статье рассматривается задача их идентификации в режиме реального времени. Предполагается, что сеть функционирует в условиях несимметрии токов и напряжений, а сечения фазных и нейтрального проводов являются разными. Предлагается метод идентификации параметров (сопротивлений) на основе модели физических процессов в электрических контурах сети и оценки недоступных для измерения и контроля переменных, описывающих текущее электрическое состояние межабонентских участков трёхфазной сети. Для решения задачи идентификации получены системы линейных алгебраических уравнений. Описаны вычислительные процедуры их аналитического и численного решения. Предложенный метод идентификации параметров РЭС можно использовать для создания специального программного обеспечения функциональных подсистем АСКУЭ, ориентированных на диагностику текущего состояния функциональных частей РЭС, а также идентификацию и мониторинг потерь электроэнергии в сети в режиме реального времени.

*Ключевые слова:* трехфазная электрическая сеть, параметры сети, модель нагрузок, метод идентификации.

### Введение

В целях комплексной автоматизации и информатизации процессов энергопотребления в распределительных электрических сетях (РЭС) в настоящее время широкое применение находят автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1], в которых в основном выполняются функции измерения данных с электронных счетчиков, установленных у абонентов трехфазной сети, и коммерческого учета электроэнергии. В этих автоматизированных системах практически не решаются задачи, направленные на повышение технико-экономических показателей распределительных компаний. К ним, в частности, относятся задачи оперативного мониторинга потерь электроэнергии [2–4], диагностики функционального состояния [5–7] и оптимизации режимов работы распределительной сети [8–11], решение которых позволяет существенно сократить потери и повысить качество электроэнергии. Анализ показывает, что решение указанного комплекса дополнительных функциональных задач АСКУЭ связано с разработкой соответствующих математических моделей и методов расчета трёхфазных сетей в режиме реального времени, что связано с определёнными трудностями [12–15]. Последние, в частности, связаны с такими факторами, как несим-

метрия токов и напряжений [4, 11, 16], параметрические неопределенности [6], связанные с «дрейфом» сопротивлений межабонентских участков магистральной линии, значения которых зависят от ряда условий (климатических, временных). В связи с этим в статье развивается подход к идентификации параметров (сопротивлений) РЭС, предложенный в [4, 17], с учетом фактора несимметрии токов и напряжений в режиме реального времени. При этом рассматривается общий случай, когда фазные и нейтральный провода имеют разные сечения. Анализ показывает, что полученные результаты параметрической идентификации позволяют в ряде случаев упростить решение указанного выше комплекса задач в составе АСКУЭ.

### Постановка задачи

Рассмотрим четырёхпроводную трёхфазную распределительную сеть напряжением 0,4 кВ, расчётная схема которой показана на рис. 1, где для удобства дальнейших математических операций через индексную переменную  $k$  ( $k = \overline{1,3}$ ) указаны соответственно фазы А, В и С, а через  $v$  – номера электрических контуров сети.

Остальные обозначения следующие:  $Z_{vk}$  – сопротивление электронприёмника (нагрузки) сети с координатой  $(v, k)$ , подключённого к фазе с номе-

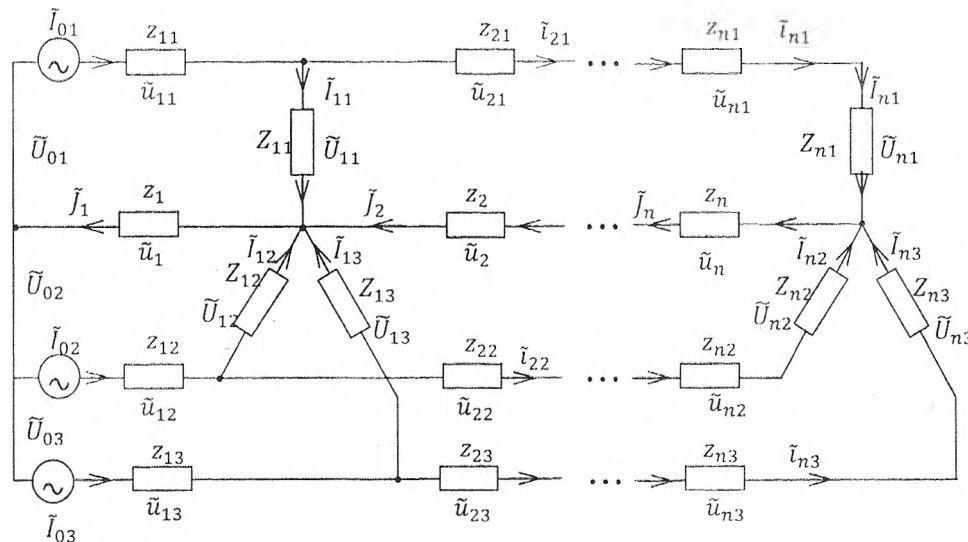


Рис. 1. Расчетная схема трехфазной сети

ром  $k$ :  $\tilde{I}_{vk}$ ,  $\tilde{U}_{vk}$  – мгновенные ток и напряжение на нагрузке  $Z_{vk}$ ;  $\tilde{i}_{vk}$ ,  $z_{vk}$  – мгновенный ток и сопротивление  $v$ -го межабонентского участка (МАУ)  $k$ -й фазы;  $\tilde{u}_{vk}$ ,  $\tilde{u}_v$  – напряжения соответственно на  $v$ -м МАУ  $k$ -й фазы и нейтрального провода;  $\tilde{J}_v$ ,  $z_v$  – мгновенный ток и сопротивление  $v$ -го участка нейтрального провода;  $\tilde{U}_{0k}$ ,  $\tilde{I}_{0k} = \tilde{i}_{1k}$  – мгновенные напряжения и токи на входах соответствующих фаз.

В каждый момент времени  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  сумма полезных токов  $\tilde{I}_k(t)$ , потребляемых абонентами сети в соответствующих фазах, определяется как

$$\tilde{I}_k(t) = \sum_{v=1}^n \tilde{I}_{vk}(t), \quad k = \overline{1,3}.$$

Далее примем следующие предположения:

1. Трехфазная сеть функционирует в нормальном (штатном) режиме, т. е. выполняются следующие условия:

$$|I_k - I_{0k}| \leq \Delta I_{\max}, \quad k = \overline{1,3}, \quad (1)$$

где  $I_k$ ,  $I_{0k}$  – действующие значения соответственно полезного тока  $\tilde{I}_k$  и входного тока  $k$ -й фазы  $\tilde{I}_{0k}$ , измеряемого счетчиком на выходе ТП;  $\Delta I_{\max}$  – максимально допустимая погрешность измерения токов в сети.

2. В сети существует несимметрия токов и напряжений.

3. Линейные и нейтральный провода сети имеют различные сечения и для сопротивлений МАУ выполняются следующие условия:

$$z_{vk} \neq z_v, \quad k = \overline{1,3}, \quad (2)$$

$$z_{v1} \neq z_{v2}, \quad z_{v1} \neq z_{v3}, \quad z_{v2} \neq z_{v3}.$$

4. В системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети.

5. В базу данных АСКУЭ в каждом интервале наблюдения  $[t_\xi, t_{\xi+1}]$  (где  $\xi = 1, 2, 3, \dots$ ) поступают следующие данные:

- действующие токи  $I_{vk}$  и напряжения  $U_{vk}$  на нагрузках  $Z_{vk}$ ,  $v = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ ;

- коэффициенты мощности  $\cos \varphi_{vk}$ ,  $v = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ .

Введём матрицу  $Z$  и вектор  $Z_0$ , элементы которых состоят из сопротивлений  $z_{vk}$  и  $z_v$  в текущем интервале наблюдения  $[t_\xi, t_{\xi+1}]$ :

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & \dots & z_{n1} \\ z_{12} & z_{22} & \dots & z_{n2} \\ z_{13} & z_{23} & \dots & z_{n3} \end{bmatrix}, \quad Z_0 = [z_1, z_2, \dots, z_n].$$

Требуется определить оценки элементов матрицы  $Z$  и вектора  $Z_0$  с использованием данных, поступающих в интервале наблюдения  $[t_\xi, t_{\xi+1}]$  в базу данных АСКУЭ.

#### Решение задачи

Необходимо отметить, что на основе исходных данных, поступающих со счетчиков электроэнергии, невозможно оценить текущее электрическое состояние трехфазной сети. Для этой цели необходимо предварительно идентифицировать модели нагрузок, описывающие динамику синусоидальных токов и напряжений на нагрузках сети. Как известно, в установившемся режиме эти переменные можно представить в комплексной форме [18]:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{vk} &= I_{vk}^b + jI_{vk}^m = I_{vk} e^{j\alpha_{vk}}, \\ \tilde{U}_{vk} &= U_{vk}^b + jU_{vk}^m = U_{vk} e^{j\psi_{vk}}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3},$$

где символы «в» и «м» обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных;  $I_{vk}$ ,  $U_{vk}$ ,  $\alpha_{vk}$ ,  $\psi_{vk}$  – модули и фазовые сдвиги этих переменных. При этом

$$\begin{aligned} \alpha_{vk} &= \bar{\alpha}_{vk} - \alpha_{vk}^*, \quad \psi_{vk} = \bar{\psi}_{vk} - \psi_{vk}^*, \quad k = \overline{1, 3}, \\ \alpha_{vk}^* &= 2(k-1)\pi/3, \quad \psi_{vk}^* = 2(k-1)\pi/3, \end{aligned}$$

где  $\bar{\alpha}_{vk}$ ,  $\bar{\psi}_{vk}$  – приращения фазовых сдвигов относительно их номинальных значений  $\alpha_{vk}^*$  и  $\psi_{vk}^*$ , обусловленные несимметрией токов и напряжений

в сети. Таким образом, для того чтобы модели нагрузок представить в форме (3), необходимо найти неизвестные величины  $\tilde{\alpha}_{vk}$  и  $\tilde{\psi}_{vk}$  по данным, полученным со счетчиков электроэнергии и хранящимся в базе данных АСКУЭ. Один из методов решения этой задачи предложен в [4]. В случае, когда построена модель нагрузок в форме (3), на основе первого закона Кирхгофа можно вычислить межабонентские токи  $i_{vk}$  и  $j_v$  по следующим формулам:

$$i_{vk} = \sum_{l=v}^n i_{lk} = \sum_{l=v}^n (I_{lk}^R + jI_{lk}^M);$$

$$v = \overline{1, n}; k = \overline{1, 3}, \quad (4)$$

$$j_v = i_{v1} + i_{v2} + i_{v3};$$

$$v = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Для дальнейших построений будем использовать второй закон Кирхгофа, описывающий баланс напряжений в  $v$ -х контурах сети (см. рис. 1):

$$\dot{u}_{vk} + \dot{u}_v + \dot{U}_{vk} - \dot{U}_{v-1,k} = 0,$$

$$v = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}. \quad (6)$$

На основе закона Ома соотношения (6) можно представить в виде следующей системы линейных уравнений относительно искомых параметров  $z_{vk}$  и  $z_v$ :

$$i_{v1}z_{v1} + j_v z_v = \dot{b}_{v1},$$

$$i_{v2}z_{v2} + j_v z_v = \dot{b}_{v2},$$

$$i_{v3}z_{v3} + j_v z_v = \dot{b}_{v3}, \quad v = \overline{1, n},$$

$$\text{где } \dot{b}_{vk} = \dot{U}_{v-1,k} - \dot{U}_{vk} \quad (k = \overline{1, 3}).$$

Как видно из соотношений (7), для каждого  $v$ -го контура имеем три уравнения ( $k = \overline{1, 3}$ ), а количество неизвестных параметров ( $z_{v1}, z_{v2}, z_{v3}, z_v$ ) равно 4. Поэтому для оценки искомых параметров необходимо найти дополнительные условия, которые совместно с уравнениями (7) позволяли бы осуществлять их идентификацию.

В целях идентификации элементов матрицы  $Z$  и вектора  $Z_0$  будем считать, что выполняются ус-

ловия (2) для сопротивлений МАУ. В качестве исходных данных будем использовать напряжения  $\dot{U}_{vk}$  на нагрузках сети и межабонентские токи  $i_{vk}$  и  $j_v$ , которые являются известными величинами и определяются соответственно по формулам (3), (4) и (5). Рассмотрим интервал наблюдения  $[t_\xi, t_{\xi+1}]$ , в котором трехфазная сеть находится в нормальном состоянии, т. е. выполняются условия (1). При этом, начиная с начальных контуров ( $v = n$ ) сети (см. рис. 1), для каждого  $v$  ( $v = \overline{1, n-1}$ ) последующие части сети заменяем эквивалентными сопротивлениями  $Z_{vk}^3$  ( $v = \overline{1, n-1}, k = \overline{1, 3}$ ), значения которых можно вычислить. Схемы, иллюстрирующие эту процедуру, приведены на рис. 2.

Например, для трехфазной сети, образованной всеми ее электрическими контурами (рис. 2а), соответствующие эквивалентные комплексные сопротивления определяются как

$$Z_{1k}^3 = \dot{U}_{0k} / i_{1k}, \quad k = \overline{1, 3},$$

а для части сети, образованной, начиная с  $v$ -го контура (рис. 2, б), и для конечного контура (рис. 2, в) они соответственно вычисляются по следующим формулам:

$$Z_{vk}^3 = \dot{U}_{vk} / i_{vk}, \quad v = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3},$$

$$Z_{n-1,k}^3 = \dot{U}_{n-1,k} / i_{n-1,k}, \quad k = \overline{1, 3}. \quad (8)$$

С другой стороны, для  $Z_{v-1,k}^3$  справедливы следующие выражения:

$$Z_{v-1,k}^3 = \frac{(z_{vk} + z_v + Z_{vk}^3)Z_{v-1,k}}{(z_{vk} + z_v + Z_{vk}^3) + Z_{v-1,k}},$$

$$v = \overline{1, n-1}, k = \overline{1, 3}, \quad (9)$$

где эквивалентные сопротивления  $Z_{vk}^3$  вычисляются по формулам (8), а сопротивления электроприемников  $Z_{vk} = \dot{U}_{vk} / i_{vk}$ , где  $v = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}$ .

Так как эквивалентные сопротивления  $Z_{nk}^3$  конечных участков РЭС определяются сопротивлениями электроприемников ( $Z_{nk}^3 = Z_{nk}$ ), которые являются известными величинами, то для каждого электрического контура трехфазной сети на основе

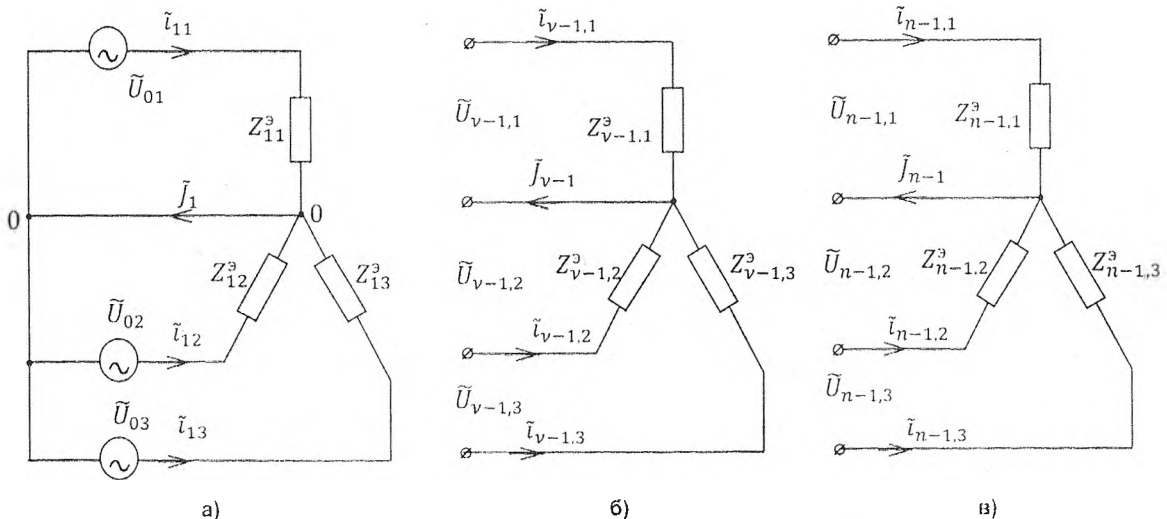


Рис. 2. Схемы оценки эквивалентных сопротивлений  $Z_{vk}^3$

соотношений (9) можно получить следующие линейные алгебраические уравнения относительно искомых параметров  $z_{vk}$  и  $z_v$ :

$$z_{vk} + z_v = f_{vk}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (10)$$

где  $f_{vk}$  – известные величины, которые определяются по следующим формулам:

$$f_{vk} = -\frac{z_{vk}^3(z_{v-1,k}^2 - z_{v-1,k}) + z_{v-1,k}^2 z_{v-1,k}}{z_{v-1,k}^2 - z_{v-1,k}}$$

Для определения искомых параметров на основе соотношений (5) и (7) запишем следующие системы уравнений:

$$\dot{u}_{vk} + j_v z_v = \dot{b}_{vk}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (11)$$

$$\frac{\dot{u}_{v1}}{z_{v1}} + \frac{\dot{u}_{v2}}{z_{v2}} + \frac{\dot{u}_{v3}}{z_{v3}} = j_v, \quad v = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Теперь из соотношений (10) определяем  $z_{v1}$ ,  $z_{v2}$ ,  $z_{v3}$ , а из равенств (11) –  $\dot{u}_{v1}$ ,  $\dot{u}_{v2}$ ,  $\dot{u}_{v3}$ . Путем подстановки полученных выражений в (12) получаем следующие соотношения:

$$\frac{\dot{b}_{v1} - j_v z_v}{f_{v1} - z_v} + \frac{\dot{b}_{v2} - j_v z_v}{f_{v2} - z_v} + \frac{\dot{b}_{v3} - j_v z_v}{f_{v3} - z_v} = j_v, \quad v = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Отсюда после несложных преобразований получаем следующие кубические алгебраические уравнения относительно параметров  $z_v$ :

$$a_3 z_v^3 + a_2 z_v^2 + a_1 z_v + a_0 = 0, \quad v = \overline{1, n}, \quad (14)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – коэффициенты, которые вычисляются на основе соответствующих преобразований соотношений (13) и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} a_0 &= f_{v2} f_{v3} (\dot{b}_{v1} - j_v f_{v1}) + \\ &+ f_{v1} (\dot{b}_{v2} f_{v3} + \dot{b}_{v3} f_{v2}), \\ a_1 &= j_v [f_{v3} (f_{v1} + f_{v2}) + f_{v1} f_{v2} - f_{v2} f_{v3} - \\ &- f_{v1} f_{v3} - f_{v1} f_{v2}] - \dot{b}_{v1} (f_{v2} + f_{v3}) - \\ &- \dot{b}_{v2} (f_{v1} + f_{v3}) - \dot{b}_{v3} (f_{v1} + f_{v2}), \\ a_2 &= \dot{b}_{v1} + \dot{b}_{v2} + \dot{b}_{v3} + 3j_v (f_{v1} + f_{v2} + f_{v3}), \\ a_3 &= -2j_v. \end{aligned}$$

Решение уравнений (14) можно найти методом Кардано [19] или на основе использования численных методов [20]. Остальные параметры сети  $z_{vk}$  на основе соотношений (10) определяются по формулам

$$z_{vk} = f_{vk} - z_v, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}.$$

Таким образом, изложенная выше вычислительная схема позволяет идентифицировать элементы матрицы  $Z$  и вектора  $Z_0$ , которые записываются в базу данных АСКУЭ и используются для решения дополнительных функциональных задач автоматизированной системы.

### Заключение

Предложен метод идентификации параметров (сопротивлений) межабонентских участков распределительной сети напряжением 0,4 кВ по данным АСКУЭ. Считается, что трехфазная сеть функционирует в условиях несимметрии токов и напряжений, а также неконтролируемого «дрейфа» сопротивлений, обусловленного внешними факторами. При этом рассматривается общий случай, когда фазные и нейтральный провода имеют разные сечения. Метод основан на модели нагрузок в комплексной форме, позволяющей осуществить

оценку неизмеряемых и неконтролируемых переменных (токов и напряжений), характеризующих текущее электрическое состояние межабонентских участков магистральной линии. В целях идентификации получены аналитические условия в виде алгебраических уравнений, решение которых дает искомые параметры трехфазной сети. Полученные результаты можно использовать для моделирования физических процессов в электрической системе, а также для решения задач оперативного мониторинга потерь электроэнергии и диагностики состояний функциональных элементов распределительной сети в составе АСКУЭ.

### Литература

1. Ожегов, А.Н. Системы АСКУЭ / А.Н. Ожегов. – Киров: ВятГУ, 2006. – 102 с.
2. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
3. Хлебников, В.К. Методика расчета потерь электроэнергии в сети 0,38 кВ по измерениям напряжений и токов с учетом схемно-технической информации / В.К. Хлебников, Д.Э. Подгорный // Изв. вузов. Электромеханика. – 2004. – № 6.1. – С. 28–31.
4. Оморов, Т.Т. К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев, Р.Ч. Осмонова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 21–28. DOI: 10.14529/power170103
5. Диагностика распределительных электрических сетей при однофазном замыкании на землю / Л.В. Владимиров, В.А. Ощепков, А.Я. Бигун, Н.В. Кириченко // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 236–239.
6. Оморов, Т.Т. Диагностика состояний электрических линий распределительных сетей в составе АСКУЭ / Т.Т. Оморов, Р.Ч. Осмонова, Б.К. Такырбашев // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 5. – С. 44–48. DOI: 10.14489/td.2017.05.pp.044-048
7. Система защиты электрической сети напряжением 380 В от обрывов воздушной линии / А.М. Еришов, О.В. Филатов, А.В. Молоток и др. // Электрической станции. – 2016. – № 5. – С. 28–33.
8. Redkovsky, N.N. Optimization problems and calculation of electrical networks work regimes / N.N. Redkovsky, V.A. Goureev // Optimization Methods and Software. – 1997. – Vol. 7, no. 2. – P. 139–155. DOI: 10.1080/10556789708805649
9. Оморов, Т.Т. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 6. – С. 11–15.
10. Хабдуллин, А.Б. Оптимизация установившихся режимов в системах цехового электрообеспечения по критерию минимизации потерь

мощности / А.Б. Хабдуллин // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* – 2012. – № 2. – С. 30–35.

11. Косоухов, Ф.Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками / Ф.Д. Косоухов, П.В. Васильев, А.О. Филиппов // *Электротехника.* – 2014. – № 6. – С. 8–12.

12. Zelenskii, E.G. Identification of the parameters of distribution networks by synchronized current and voltage measurements / E.G. Zelenskii, Y.G. Kononov, I.I. Levchenko // *Russian Electrical Engineering.* – 2016. – Vol. 87, no. 7. – P. 363–368. DOI: 10.3103/S1068371216070129

13. Stepanov, A.S. Identification of parameters of models of electric network elements on the basis of tellegen's theorem / A.S. Stepanov, S.A. Stepanov, S.S. Kostyukova // *Russian Electrical Engineering.* – 2016. – Vol. 87, no. 7. – P. 369–372. DOI: 10.3103/S1068371216070105

14. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ / С.В. Кочер-

гин, А.В. Кобелев, Н.А. Хребтов и др. // *Фрактальное моделирование.* – 2013. – № 1. – С. 5–13.

15. Сапронов, А.А. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ / А.А. Сапронов, С.Л. Кузнецов, В.Г. Тынянский // *Изв. вузов. Электромеханика.* – 2004. – № 1. – С. 55–58.

16. Пономаренко, О.И. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения / О.И. Пономаренко, И.И. Холиддинов // *Энергетик.* – 2015. – № 12. – С. 6–8.

17. Оморов, Т.Т. Определение параметров распределительных сетей 0,4 кВ по данным АСКУЭ / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбаев, Р.Ч. Осмонова // *Энергетик.* – 2017. – № 6. – С. 37–40.

18. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, А.В. Коровкин. – Т. 1. – СПб.: Питер, 2009. – 512 с.

19. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

20. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1975. – 632 с.

**Оморов Туратбек Турсунбекович**, д-р техн. наук, член-корреспондент, заведующий лабораторией «Адаптивные и интеллектуальные системы», Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика; omorovt@mail.ru.

**Осмонова Рима Чынарбековна**, младший научный сотрудник, лаборатория «Адаптивные и интеллектуальные системы», Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика; r.osmonova@mail.ru.

**Койбагаров Талай Жыргалбекович**, аспирант, Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика; koibagarov@bk.ru.

Поступила в редакцию 28 декабря 2017 г.

DOI: 10.14529/power180106

## PARAMETRIC IDENTIFICATION OF A DISTRIBUTION NETWORK AS PART OF ASCME

T.T. Omorov, omorovtt@mail.ru,  
R.Ch. Osmonova, r.osmonova@mail.ru,  
T.Zh. Koibagarov, koibagarov@bk.ru

National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

Modern automatic electricity metering systems (AEMS) are mainly designed to collect data from electronic meters used by the consumers served by a local electricity grid (LEG) and to account electricity commercially. At the same time, if significant improvements in the technical and economic performance of these systems and distribution companies are to be made, it is appropriate complement AEMS with new subsystems designed to perform real-time monitoring, diagnose the condition of the three-phase network, and optimize their operating modes. Creating methodological and algorithmic bases for their construction often necessitates knowledge of