

# ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

# BULLETIN

OF THE SOUTH URAL  
STATE UNIVERSITY

**СЕРИЯ**

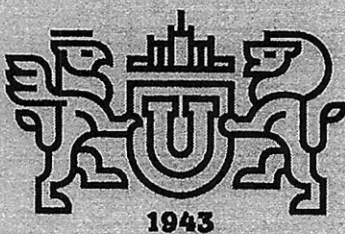
**ЭНЕРГЕТИКА**

**2018, том 18, № 2**

**SERIES**

**POWER  
ENGINEERING**

**2018, volume 18, no. 2**



Редакционный совет  
«ВЕСТНИКА ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА»:

*Председатель редакционного совета* ШЕСТАКОВ А.Л.

*Заместители председателя редакционного совета* ДЬЯКОНОВ А.А., ВЯТКИН Г.П.

*Ответственный секретарь* ГЕРАСКИНА Е.В.

Издание «Вестника Южно-Уральского государственного университета»  
осуществляется по сериям:

«ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА»

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ,  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

«ЛИНГВИСТИКА»

«МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА. ФИЗИКА»

«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ»

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

«МЕТАЛЛУРГИЯ»

«ОБРАЗОВАНИЕ. ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ»

«ПИЩЕВЫЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ»

«ПРАВО»

«ПСИХОЛОГИЯ»

«СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ»

«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»

«ХИМИЯ»

«ЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ»

«ЭНЕРГЕТИКА»

Адрес редакции: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»  
проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080

<https://vestnik.susu.ru>

e-mail: [vestnik@susu.ru](mailto:vestnik@susu.ru)

# ВЕСТНИК



**ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**2018  
Т. 18, № 2**

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.  
Радионон 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)  
Бутырин 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)  
Карандаев 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)  
Мещеряков 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

## Электроэнергетика

ГОЛЬДШТЕЙН М.Е., ЖЕЛНИНА К.В. Особенности регулирования рабочих и послеаварийных режимов электрических сетей с передачей постоянного тока на базе преобразователей тока и напряжения .....	5
АВДЕЕВА М.М., АНАНЬЕВ Е.М., КОРОВИН О.В., ПОДВИГИН С.В. Алгоритм поиска оптимальных параметров термоэлектроволокна для защиты высоковольтных проводов воздушных линий электропередач от обледенения .....	12
ТАВЛИНЦЕВ А.С., СУВОРОВ А.А., СТАЙМОВА Е.Д. Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта .....	20
ДЗЮБА М.А., ТАРАСЕНКО В.В., КОРЖОВ А.В. Метод определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам и электробезопасности активного эксперимента .....	28
БОЛЬШАНИН Г.А. Амплитудные значения падающей и отраженной волн в линии электропередачи трехпроводного исполнения .....	36
✓ ОМОРОВ Т.Т., ТАКЫРБАШЕВ Б.К., ОСМОНОВА Р.Ч., КОЙБАГАРОВ Т.Ж. Идентификация утечек тока в распределительных сетях по данным АСКУЭ .....	48

## Альтернативные источники энергии

СОЛОМИН Е.В., СИРОТКИН Е.А., БОДРОВА Е.С., ЧИНЕНОВ М.С. Дублирующая электромеханическая система торможения ветроэнергетической установки .....	55
МЕХТИЕВ А.Д., ЮГАЙ В.В., АЛЬКИНА А.Д., КАЛИАСКАРОВ Н.Б., ЕСЕНЖОЛОВ У.С. Много-топливная микротепловая электростанция мощностью 1–10 кВт для удаленных объектов сельской местности и фермерских хозяйств .....	62

## Электромеханические системы

ГЕЛЬВЕР Ф.А., САМОСЕЙКО В.Ф. Магнитные проводимости двухполюсной реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора .....	71
ГАСИЯРОВ В.Р., БАСКОВ С.Н., ВОРОНИН С.С., ОДИНЦОВ К.Э. Ограничение динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана за счет регулирования зазора валков .....	82
АЛТУНЯН Л.Л., ПЯТИБРАТОВ Г.Я., СУХЕНКО Н.А., ДАНЬШИНА А.А. Разработка и промышленное внедрение электромеханических силокомпенсирующих систем управления усилиями в исполнительных механизмах шарнирно-балансирных манипуляторов .....	96
НАКЛЕСКИН А.Г., ПОЗДНОВ М.В., ТВЕРДОХЛЕБОВ А.Я. Экспериментальное определение параметров магнитного сердечника и катушки индуктивности на его основе .....	105

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ УТЕЧЕК ТОКА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПО ДАННЫМ АСКУЭ

**Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев, Р.Ч. Осмонова, Т.Ж. Койбагаров**

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

Рассматривается распределительная электрическая сеть (РЭС), функционирующая в условиях внедрения автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). Предполагается, что РЭС работает в несимметричном режиме и подвержена действиям случайных внешних факторов. К последним, в частности, относятся утечки токов, включая несанкционированные отборы электроэнергии в сети. Увеличение частоты этих возмущений приводит к существенным потерям электроэнергии. Формулируется задача идентификации утечек тока в трехфазной сети с использованием данных АСКУЭ, полученных с абонентских счетчиков электроэнергии. Предлагается метод ее решения, концепция которого основана на математическом моделировании возмущенного и желаемого состояний РЭС. При этом идентифицируются фактические и потенциально возможные приращения напряжений на межабонентских участках трехфазной сети, вызванные токами утечек. Получены математические соотношения, описывающие функциональные связи между указанными приращениями напряжений и параметрами (сопротивлениями) сети, которые используются для локализации координаты утечек тока. Вычислительная схема предложенного метода ориентирована на разработку алгоритмического и специального программного обеспечения подсистемы диагностики РЭС в составе АСКУЭ.

*Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, утечки токов, метод идентификации.*

### Введение

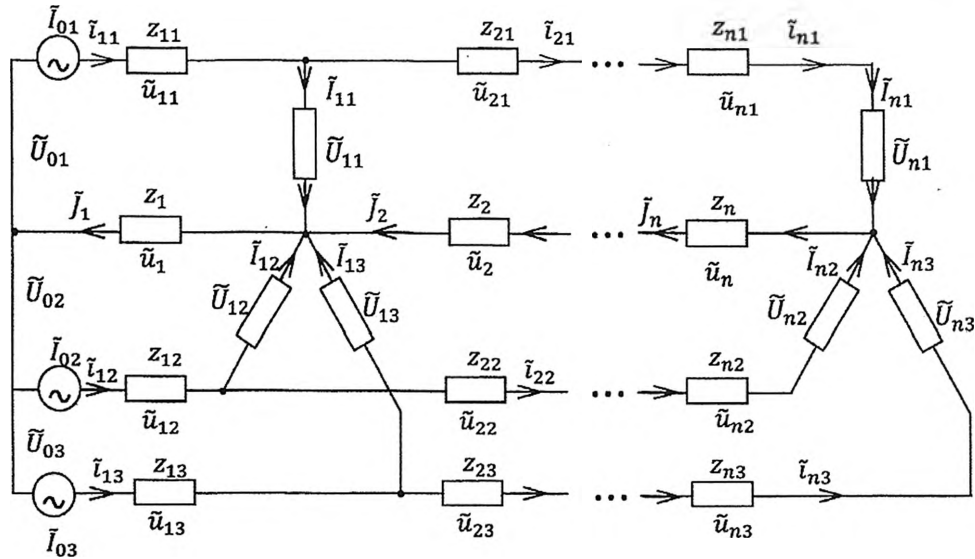
Широкое внедрение автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) в распределительных электрических сетях (РЭС) [1] ставит перед их разработчиками новые задачи, решение которых направлено на дальнейшее повышение их эффективности и экономических показателей распределительных компаний. Как известно, АСКУЭ представляет собой информационно-измерительную систему, предназначенную для выполнения функций оперативного сбора данных с группы счетчиков электроэнергии (Сч), установленных у абонентов сети, их хранение и обработку измерительной информации с целью коммерческого учета электроэнергии. Обмен данными между функциональными элементами системы осуществляется с использованием современных телекоммуникационных технологий (PLC, GSM и др.). Анализ структуры внедряемых в настоящее время АСКУЭ показывает, что в их составе нет функциональных подсистем, обеспечивающих решение таких важных задач, как мониторинг потерь электроэнергии [2–4], диагностика состояний трехфазной сети [5–8] и симметрирование фазных нагрузок, обеспечивающих оптимизацию функционирования РЭС [9–13]. В то же время их решение, в частности, решение задач диагностики распределительных сетей в режиме реального времени требует разработки соответствующих математических моделей и методов, ориентированных для использования в составе АСКУЭ. Основная трудность при этом заключается в том, что практически большинство РЭС имеют сложную струк-

туру, функционируют в условиях несимметрии токов и напряжений [14–16], а также подвержены действию случайных внешних возмущающих факторов, приводящих к значительным техническим и коммерческим потерям электроэнергии. К таким возмущениям, в частности, относятся утечки токов в трехфазной РЭС, вызванные различными внешними факторами, включая подключение к сети несанкционированных потребителей электроэнергии [17, 18]. В этих условиях решение указанных выше задач на основе известных моделей и методов анализа и идентификации параметров трехфазной сети (методы симметричных составляющих, графов и др.) [19–23] связано с большими трудностями. Методологические основы идентификации и локализации несанкционированного отбора электроэнергии в распределительной сети изложены в [18, 24]. В данной статье дано развитие этих результатов и предложен метод идентификации координаты мест отбора тока утечки в РЭС с использованием простых вычислительных процедур.

### Постановка задачи

Рассматривается четырехпроводная трехфазная сеть с напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рисунке.

На рисунке  $k, v$  – индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С ( $k = \overline{1,3}$ ) и электрических контуров сети ( $v = \overline{1,n}$ );  $\bar{I}_{vk}$ ,  $\bar{U}_{vk}$  – синусоидальные мгновенные ток и напряжение на соответствующем электроприемнике (нагрузке) с координатой  $(v, k)$ ;  $\bar{i}_{vk}$ ,  $z_{vk}$  –



Расчетная схема трехфазной сети

мгновенный ток и сопротивление  $\nu$ -го межабонентского участка (МАУ)  $k$ -й фазы;  $\tilde{u}_{\nu k}, \tilde{u}_\nu$  – напряжения соответственно на  $\nu$ -м МАУ  $k$ -й фазы и нейтрального провода;  $\tilde{I}_\nu, z_\nu$  – мгновенный ток и сопротивление  $\nu$ -го участка нейтрального провода;  $\tilde{U}_{0k}, \tilde{I}_{0k}$  – мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

1. Распределительная сеть функционирует в несимметричном режиме.

2. Токи утечек, включая токи несанкционированных потребителей (нагрузок), отводятся через токопроводящие элементы, минуя нейтральный провод.

3. Линейные и нейтральный провода сети имеют разные сечения.

4. База данных АСКУЭ содержит текущие значения сопротивлений  $z_{\nu k}$  и  $z_\nu$  межабонентских участков (МАУ), представленных в комплексной форме [6, 15].

5. Периодически в дискретные моменты времени  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  подсистема сбора данных АСКУЭ осуществляет опрос абонентских счетчиков электроэнергии ( $C_{\nu k}$ ) с шагом дискретизации  $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$ , где  $\xi = 1, 2, \dots$ . На основе измерительной информации в автоматизированной системе формируются исходные данные задачи – подмножества  $I_t, U_t$  и  $\varphi_t$ , состоящие из действующих токов  $I_{\nu k}$  и напряжений  $U_{\nu k}$  на соответствующих нагрузках и сдвигов фаз  $\varphi_{\nu k}$  между ними:

$$I_t = \{I_{\nu k}\}_{n \times 3}, U_t = \{U_{\nu k}\}_{n \times 3}, \varphi_t = \{\varphi_{\nu k}\}_{n \times 3}.$$

6. В АСКУЭ на основе исходных данных, т. е. компонентов подмножеств  $I_t, U_t$  и  $\varphi_t$ , в оперативном режиме осуществляется комплексное представление переменных, описывающих состояния электроприемников (нагрузок) сети:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{\nu k} &= I_{\nu k}^B + jI_{\nu k}^M = I_{\nu k} e^{j\alpha_{\nu k}}, \\ \dot{U}_{\nu k} &= U_{\nu k}^B + jU_{\nu k}^M = U_{\nu k} e^{j\psi_{\nu k}}, \\ \nu &= \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (1)$$

где символы «B» и «M» здесь и далее обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных;  $I_{\nu k}, U_{\nu k}, \alpha_{\nu k}, \psi_{\nu k}$  – модули (действующие токи и напряжения) соответствующих комплексных переменных и их фазовые сдвиги соответственно;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимое число. Численный алгоритм представления состояний нагрузок сети в форме (1) предложен в [15].

В каждый момент времени  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  суммарные токи на входах фаз  $\tilde{I}_k^a(t)$  ( $k = \overline{1, 3}$ ), потребляемые абонентами сети в соответствующих фазах, определяются выражениями:

$$\tilde{I}_k^a(t) = \sum_{\nu=1}^n \tilde{I}_{\nu k}(t), \quad k = \overline{1, 3}. \quad (2)$$

Далее будем считать, что распределительная сеть в момент наблюдения  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  находится в номинальном (нормальном) состоянии  $S^0$ , если отсутствуют утечки токов. Такое состояние сети в дальнейшем назовем ее желаемым состоянием  $S^0$ . При этом выполняются следующие условия:

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

где  $I_{0k}(t)$  – действующий ток на входе  $k$ -го линейного фазного провода, измеряемый счетчиком электроэнергии (Сч) на выходе источника питания – трансформаторной подстанции (ТП); где  $\Delta I_{\max}$  – максимально допустимая погрешность измерения токов.

При появлении в распределительной сети возмущения в виде утечки тока не выполняется хотя бы одно из условий (3). Такое состояние сети в дальнейшем назовем ее возмущенным состоянием  $S^1$ . Величины тока утечки  $\Delta \tilde{I}_k(t)$  в  $-i$  фазе сети можно вычислить по формуле

$$\Delta \tilde{I}_k(t) = \tilde{I}_{0k}(t) - \tilde{I}_k^a(t), \quad k = \overline{1, 3}, \quad (4)$$

где  $\bar{I}_k^a(t)$  – сумма абонентских токов в соответствующей фазе, которая определяется выражением (2).

Для определенности далее предположим, что в некоторый момент наблюдения  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  в РЭС обнаружен факт наличия в сети одного возмущения в виде утечки тока, действующего в фазе с номером  $\mu$ , где  $\mu \in M$ , а  $M = \{1, 2, 3\}$  – дискретное подмножество, состоящее из трех элементов, обозначающих номера фаз сети. При этом комплексный ток утечки  $\Delta \bar{I}_\mu$  в соответствии с выражением (4) определяется выражением:

$$\Delta \bar{I}_\mu = \bar{I}_{0\mu} - \bar{I}_\mu^a. \quad (5)$$

Место утечки тока делит линейный провод  $\mu$ -й фазы на две части соответственно с длинами  $l_{1\mu}$  и  $l_{2\mu}$ , где  $l_{1\mu}$  отсчитывается от источника питания (ТП). Поэтому величину  $l_{1\mu}$  можно принять за координату места отвода тока утечки. При этом общая длина  $l_\mu$  линейного провода и его общее сопротивление  $Z_\mu$  определяются по следующим формулам:

$$l_\mu = l_{1\mu} + l_{2\mu}, \quad Z_\mu = Z_{1\mu} + Z_{2\mu},$$

где  $l_{2\mu}$  – длина МАУ от места отвода тока утечки  $\Delta \bar{I}_\mu(t)$  до конечного электроприемника;  $Z_{1\mu}, Z_{2\mu}$  – сопротивления соответствующих участков рассматриваемого линейного провода, представляемые в комплексной форме:

$$Z_{1\mu} = Z_{1\mu}^R + jZ_{1\mu}^M, \quad Z_{2\mu} = Z_{2\mu}^R + jZ_{2\mu}^M.$$

Задача заключается в идентификации (локализации) места отвода тока утечки в сети, т. е. координату  $l_{1\mu}$ .

### Метод решения задачи

Основная идея предлагаемого метода базируется на математическом моделировании возмущенного  $S'$  и желаемого  $S^0$  состояний трехфазной сети при наличии утечек тока. Далее с использованием модели идентифицируются межабонентские токи  $i_{vk}^0$ , а также фактическое  $\Delta \bar{I}_\mu$  и потенциально (максимально) возможное  $\dot{u}_{\max\mu}$  приращение напряжений на линейном проводе возмущенной -й фазы, вызванные током утечки  $\Delta \bar{I}_\mu$ . На основе результатов такой идентификации формируются аналитические соотношения, описывающие функциональные связи между указанными приращениями напряжений и параметрами соответствующего линейного провода  $Z_{1\mu}$  и  $Z_\mu$ . Полученные соотношения далее используются для формирования алгебраического уравнения, решение которого позволяет определить место утечки тока в сети, т. е. величину  $l_{1\mu}$ .

В соответствии с изложенным решение сформулированной выше задачи включает следующие основные этапы:

1) оценка межабонентских токов и напряжений в желаемом состоянии сети  $S^0$ ;

2) оценка приращений напряжений в возмущенном состоянии сети  $S'$ ;

3) идентификация (локализация) координаты места отвода тока утечки.

*Оценка межабонентских токов и напряжений в желаемом состоянии сети  $S^0$ .* Для этой цели рассмотрим ситуацию, когда трехфазная сеть находится в нормальном состоянии  $S^0$ . В этом случае отсутствует утечка токов ( $\Delta \bar{I}_k = 0, k = \overline{1,3}$ ) и выполняются условия (3). Тогда на основе комплексного представления (1) и первого закона Кирхгофа можно вычислить межабонентские токи  $i_{vk}^0$  и токи в нейтральном проводе  $j_v^0$  по следующим формулам [6, 15]:

$$i_{vk}^0 = \sum_{l=v}^n \bar{I}_{lk} = \sum_{l=v}^n (I_{lk}^R + jI_{lk}^M), \quad (6)$$

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

$$j_v^0 = i_{v1}^0 + i_{v2}^0 + i_{v3}^0, \quad v = \overline{1, n}. \quad (7)$$

По условиям задачи комплексные сопротивления  $z_{v\mu}$  и  $z_\nu$  МАУ -й фазы являются известными величинами. Тогда выражения (6) и (7) позволяют вычислить соответствующие напряжения  $u_{v\mu}^0$  на межабонентских участках по следующим формулам:

$$u_{v\mu}^0 = i_{v\mu}^0 z_{v\mu}, \quad v = \overline{1, n}. \quad (8)$$

При этом напряжение  $\dot{u}_{\Sigma\mu}^0$  на -м линейном проводе в желаемом состоянии сети  $S^0$  определяется как сумма потерь напряжений на его участках:

$$\dot{u}_{\Sigma\mu}^0 = \sum_{v=1}^n \dot{u}_{v\mu}^0, \quad (9)$$

где величины напряжений  $\dot{u}_{v\mu}^0$  вычисляются по формуле (8).

*Оценка приращений напряжений в возмущенном состоянии сети  $S'$ .* Для этой цели рассмотрим балансовые соотношения для напряжений в контурах рассматриваемой фазы (см. рисунок):

$$\dot{U}'_{v\mu} = \dot{u}'_{(v+1),\mu} + \dot{u}'_{v+1} + \dot{U}'_{(v+1),\mu}, \quad (10)$$

$$v = \overline{0, n-1},$$

где  $\dot{u}'_{(v+1),\mu}, \dot{u}'_{v+1}$  – комплексные напряжения на  $(v+1)$ -м участке соответственно линейного и нейтрального проводов возмущенной -й фазы.

В выражении (10) известными являются напряжения  $\dot{U}'_{v\mu}$  и  $\dot{U}'_{(v+1),\mu}$  на соответствующих нагрузках, которые по измерительным данным АСКУЭ предварительно представлены в форме (1). Так как ток утечки  $\Delta \bar{I}_\mu$  по условиям задачи отводится в землю, минуя нейтральный провод, то межабонентские токи  $j_v$ , протекающие в нейтральном проводе, в желаемом  $S^0$  и возмущенном  $S'$  состояниях сети являются равными, т. е.  $j_v^0 = j_v'$ , где  $v = \overline{1, n}$ . Поэтому величины напряжений  $\dot{u}'_{v+1}$  с учетом (7) можно вычислить по формулам:

$$\dot{u}'_v = j_v^0 z_\nu = (i_{v1}^0 + i_{v2}^0 + i_{v3}^0) z_\nu, \quad v = \overline{1, n}.$$

В результате на основе выражения (10) можно

определить напряжения  $\dot{u}'_{(v+1),\mu}$  на участках линейного провода:

$$\dot{u}'_{(v+1),\mu} = \dot{U}'_{v\mu} - \dot{U}'_{(v+1),\mu} - \dot{u}'_{v+1}, \quad (11)$$

$$v = 0, n - 1.$$

Таким образом величина напряжения  $\dot{u}'_{\Sigma\mu}$  на  $n$ -м линейном проводе в возмущенном состоянии  $S'$  сети определяется следующим выражением:

$$\dot{u}'_{\Sigma\mu} = \sum_{v=1}^n \dot{u}'_{v\mu}, \quad (12)$$

где напряжения  $\dot{u}'_{v\mu}$  вычисляются по формуле (11).

**Идентификация (локализация) координаты места отвода тока утечки.** Для этой цели вначале определим оценку предельно (максимально) возможного приращения напряжения  $\dot{u}'_{\max\mu}$  на линейном проводе  $\mu$ -й фазы, вызванного током утечки  $\Delta \dot{I}_{\mu}$ . При этом предполагается, что возмущение в виде утечки тока действует в конце  $\mu$ -й фазы. В этом случае искомую величину  $\dot{u}'_{\max\mu}$  можно вычислить по формуле

$$\dot{u}'_{\max\mu} = \Delta \dot{I}_{\mu} \sum_{v=1}^n z_{v\mu} = \Delta \dot{I}_{\mu} Z_{\mu} =$$

$$= u^B_{\max\mu} + j u^M_{\max\mu}, \quad (13)$$

где  $\Delta \dot{I}_{\mu}$  – комплексный ток утечки, определяемый по формуле (5);  $u^B_{\max\mu}$ ,  $u^M_{\max\mu}$  – вещественная и мнимая части комплексного напряжения  $\dot{u}'_{\max\mu}$ . Отметим, что все величины, входящие в выражение (13), по условиям задачи являются известными.

Тогда приращение напряжения  $\Delta \dot{u}'_{\mu}$  на начальном участке  $\mu$ -го линейного провода длиной  $l_{1\mu}$ , в котором протекает ток утечки  $\Delta \dot{I}_{\mu}$ , определяется следующей разностью:

$$\Delta \dot{u}'_{\mu} = \dot{u}'_{\Sigma\mu} - \dot{u}'_{\Sigma\mu}^0 = \Delta u^B_{\mu} + j \Delta u^M_{\mu}, \quad (14)$$

где суммарные напряжения  $\dot{u}'_{\Sigma\mu}$  и  $\dot{u}'_{\Sigma\mu}^0$  вычисляются соответственно по формулам (9) и (12).

Так как приращение напряжения  $\Delta \dot{u}'_{\mu}$ , определяемое формулой (14), вызывается током утечки  $\Delta \dot{I}_{\mu}$ , то можно считать, что

$$\Delta \dot{u}'_{\mu} = \Delta \dot{I}_{\mu} Z_{1\mu}. \quad (15)$$

В результате на основе выражений (13) и (15) можно записать следующее алгебраическое соотношение

$$\frac{\Delta \dot{u}'_{\mu}}{\dot{u}'_{\max\mu}} = \frac{Z_{1\mu}}{Z_{\mu}}. \quad (16)$$

Введем в рассмотрение модули комплексных величин, входящих в выражение (16):

$$\Delta \bar{u}'_{\mu} = \sqrt{(\Delta u^B_{\mu})^2 + (\Delta u^M_{\mu})^2},$$

$$\bar{u}'_{\max\mu} = \sqrt{(u^B_{\max\mu})^2 + (u^M_{\max\mu})^2},$$

$$\bar{Z}_{1\mu} = \sqrt{(Z^B_{1\mu})^2 + (Z^M_{1\mu})^2},$$

$$\bar{Z}_{\mu} = \sqrt{(Z^B_{\mu})^2 + (Z^M_{\mu})^2}.$$

Легко заметить, что соотношение (14) эквивалентно следующему модульному соотношению:

$$\frac{\Delta \bar{u}'_{\mu}}{\bar{u}'_{\max\mu}} = \frac{\bar{Z}_{1\mu}}{\bar{Z}_{\mu}}. \quad (17)$$

С другой стороны, для модулей сопротивлений справедливы следующие формулы [25]:

$$\bar{Z}_{1\mu} = \rho_{\mu} l_{1\mu}, \bar{Z}_{\mu} = \rho_{\mu} l_{\mu}, \quad (18)$$

где  $\rho_{\mu}$  – удельное сопротивление  $\mu$ -го линейного провода сети.

В результате с учетом (18) соотношение (17) преобразуется в алгебраическое уравнение относительно  $l_{1\mu}$ :

$$\frac{\Delta \bar{u}'_{\mu}}{\bar{u}'_{\max\mu}} = \frac{l_{1\mu}}{l_{\mu}}. \quad (19)$$

Отсюда искомая координата  $l_{1\mu}$  места отвода тока утечки определяется по следующей формуле:

$$l_{1\mu} = \frac{\Delta \bar{u}'_{\mu} l_{\mu}}{\bar{u}'_{\max\mu}}. \quad (20)$$

Полученные результаты естественным образом можно распространить на случай, когда в каждой фазе распределительной сети имеются утечки тока.

### Выводы

Предложен метод идентификации координаты места отвода тока утечки в распределительной сети напряжением 0,4 кВ, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений с использованием измерительных данных АСКУЭ, полученных с абонентских счетчиков электроэнергии. Основная идея метода базируется на построении математической модели, описывающей возмущенное и номинальное (желаемое) состояния трехфазной сети на основе комплексного представления ее переменных (напряжений, токов) и параметров (сопротивлений). Такой подход позволил идентифицировать приращения напряжений на участках линейного провода, в которых протекает ток утечки. Получены аналитические соотношения, которые дали возможность найти функциональные связи между этими приращениями напряжений и параметрами возмущенной части сети и локализовать координату места отвода тока утечки. Процедура идентификации реализуется на основе простых вычислительных операций. Предложенный метод можно использовать для построения подсистемы диагностики 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. Авербух, М.А. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства / М.А. Авербух, Е.В. Жилин // Энергетик. – 2016. – № 6. – С. 54–56.

5. Кинит, Н.В. Диагностика электрических цепей и систем / Н.В. Кинит, Н.Н. Петрунько. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 242 с.

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. 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.

8. Система защиты электрической сети напряжением 380 В от обрывов воздушной линии / А.М. Ершов, О.В. Филатов, А.В. Молоток и др. // Электрический станция. – 2016. – № 5. – С. 28–33.

9. 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.

10. 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, Н.В. Васильев, А.О. Филиппов // Электротехника. – 2014. – № 6. – С. 8–12.

11. Omorov, T.T. Synthesis of the managing director of the subsystem for optimization of the operating mode of the distributive electric network / T.T. Omorov, B.K. Takyrbashev, R.Ch. Osmonova // Engineering Studies. – 2016. – No. 3. – P. 606–615.

12. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

13. Хабдуллин, А.Б. Оптимизация установившихся режимов в системах цехового электроснабжения по критерию минимизации потерь мощности / А.Б. Хабдуллин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 2. – С. 30–35.

14. 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.

15. 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

16. Оморов, Т.Т. К проблеме оценки влияния несимметрии токов и напряжений в распределительной сети на потери электроэнергии в составе АСКУЭ / Т.Т. Оморов // Электричество. – 2017. – № 9. – С. 17–23.

17. 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.

18. Оморов, Т.Т. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – № 10. – С. 651–656. DOI: 10.17587/mau.17.651-656

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

20. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ / С.В. Кочергин, А.В. Кобелев, Н.А. Хребтов и др. // Фрактальное моделирование. – 2013. – № 1. – С. 5–13.

21. 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

22. 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

23. Арутюнян, А.Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях / А.Г. Арутюнян // Электричество. – 2015. – № 10. – С. 55–58.

24. Оморов, Т.Т. К проблеме локализации несанкционированного отбора электроэнергии в распределительных сетях в составе АСКУЭ / Т.Т. Оморов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 7. – С. 27–32.

25. Аржанников, Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

Оморов Туратбек Турсунбекович, д-р техн. наук, чл.-корр., зав. лабораторией «Адаптивные и интеллектуальные системы», Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика; omorovtt@mail.ru.

Такырбашев Бейшеналы Касымалиевич, Национальная академия наук Кыргызской республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика; b.takyrbashev@gmail.com.

Осмонова Рима Чынарбековна, м.н.с., 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 1 июня 2018 г.

DOI: 10.14529/power180206

## IDENTIFICATION OF CURRENT LEAKAGE IN DISTRIBUTION NETWORKS BASED ON AUTOMATED METER READING AND CONTROL SYSTEM (AMR)

T.T. Omorov, omorovtt@mail.ru,  
B.K. Takyrbashev, b.takyrbashev@gmail.com,  
R.Ch. Osmonova, r.osmonova@mail.ru,  
T.Zh. Koibagarov, koibagarov@bk.ru

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

An electric distribution network (EDN), functioning during the implementation of an AMR system is considered. It is assumed that the EDN operates in an asymmetric mode and is subject to the actions of random external factors. The latter includes, among others, the leakage currents, including unauthorized power outages in the network. An increase in the frequency of these disturbances leads to significant energy losses. The task to identify the leakage current in a three-phase network is set using the AMR data obtained from customer electricity meters. A solution method is suggested, it is based on mathematical modeling of the disturbed and desired conditions of EDN. At the same time, the actual and potentially possible voltage increments are identified at the inter-customer sites of the three-phase network which are caused by current leakage. The mathematics, describing the functional connections between specified voltage increments and network parameters that are used to localize the current leakage coordinates has been obtained. The computational scheme of the proposed method is aimed to develop the algorithmic and special software for the subsystem of diagnostics of EDN in the structure of AMR.

*Keywords: distribution electric network, leakage of currents, identification method.*

### References

1. Ozhegov A.N. *Sistemy ASKUE* [Systems of ACSEA]. Kirov, Vyat St.Univ. Publ., 2006. 102 p.
2. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii* [Power Loss. Reactive Power. Power Quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
3. Khlebnikov V.K., Podgornyy D.E. [Method of Electricity Losses Calculation in Grid 0,38 kV Measurements of Voltages and Currents Based on Circuit-Technical Information]. *Izv.VUZ. Elektromekhanika* [Higher School Proceedings. Electromechanics], 2004, no. 6.1, pp. 28–31. (in Russ.)
4. Averbukh M.A., Zhilin E.V. [On Electric Power Losses in Power Supply Systems of Individual Housing Construction], *Energetik* [Power Engineer], 2016, no. 6, pp. 54–57. (in Russ.)
5. Kinsht N.V. Petrun'ko N.N. *Diagnostika elektricheskikh tsepey i sistem* [Diagnostics of Electric Chains and Systems]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2013. 242 p.
6. Omorov T.T., Osmonova R.Ch., Takyrbashev B.K. [Diagnostics of Conditions of Distributive Networks Electric Lines as a Part of ACSKAE]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2017, no. 5, pp. 44–48. (in Russ.) DOI: 10.14489/td.2017.05.pp.044-048
7. Vladimirov L.V., Oshchepkov V.A., Bigun A.YA., Kirichenko N.V. [Diagnostics of Distributive Electrical Networks at Single-Phase Short Circuit on the Earth]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2014, no. 1, pp. 236–239. (in Russ.)