

## К ПРОБЛЕМЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ УТЕЧЕК ТОКА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПО ДАННЫМ АСКУЭ

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

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

Рассматривается четырехпроводная распределительная электрическая сеть (РЭС) напряжением 0,4 кВ. Формулируется задача идентификации мест утечек тока в РЭС. Известные методы ее решения основаны на предварительном построении модели трехфазной сети в комплексной форме, что в определенной степени усложняет процедуру идентификации. Предлагается алгоритм идентификации, в котором используется идея упрощения исходной структуры трехфазной сети путем ее декомпозиции на относительно простые электрические цепи. На основе анализа уравнений электрических контуров последних выводится новый критерий идентификации, позволяющий локализацию мест утечек тока в сети. Формирование математических соотношений (условий), на которых базируется указанный критерий, осуществляется без вычисления токов и напряжений в сети. При этом используются только значения комплексных сопротивлений нагрузок и межабонентских участков магистральной линии, что значительно упрощает реализацию вычислительного алгоритма предложенного метода. Полученные результаты ориентированы для разработки специального программного обеспечения подсистемы идентификации и мониторинга потерь электроэнергии в составе АСКУЭ.

*Ключевые слова:* распределительная электрическая сеть, утечка токов, метод идентификации и локализации.

### Введение

Как известно [1, 2], к числу важнейших показателей качества и эффективности работы распределительной электрической сети (РЭС) относятся потери электроэнергии в ней, состоящие в основном из технических и коммерческих потерь. В целях экономии энергоресурсов при эксплуатации РЭС необходимо разрабатывать и принимать практические меры, направленные на минимизацию этих потерь. В частности, для снижения технических потерь электроэнергии к настоящему времени предложен ряд способов и средств [3–6]. В то же время практически отсутствуют методы и средства для снижения коммерческих потерь электроэнергии, к которым относятся утечки токов, вызванные в частности несанкционированным отбором электроэнергии. Анализ показывает, что наиболее эффективный путь значительного снижения потерь электроэнергии состоит в разработке и внедрении дополнительных подсистем в составе существующих АСКУЭ [7], ориентированных на выполнение таких важных функций, как оптимизация режимов работы РЭС [8–10], а также идентификация и локализация мест несанкционированного отбора электроэнергии в сети [11, 12]. Непосредственное применение известных математических моделей [13–15] и методов [16–19] для этих целей представляет определенные трудности, так как при этом необходимо учитывать ряд факторов, таких как несимметрия токов и напряжений в сети [20, 21], случайный характер утечек тока, а также необходимость решения соответствующих функциональных задач в режиме реального времени [7]. В [12, 22] предложены подходы к идентификации

и локализации мест утечек тока, включая несанкционированные отборы электроэнергии, в распределительной сети напряжением 0,4 кВ на основе комплексного представления ее переменных (токов, напряжений). Данная работа посвящена вопросам развития этих подходов. При этом задача идентификации решается без предварительного построения модели трехфазной сети в комплексной форме [23], что значительно упрощает вычислительную процедуру локализации координаты несанкционированного потребителя электроэнергии в сети.

### Постановка задачи

Рассматривается четырехпроводная трехфазная сеть с напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рис. 1. Здесь  $k, v$  – индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз  $A, B, C$  ( $k = \overline{1,3}$ ) и электрических контуров сети ( $v = \overline{1, n}$ );  $\tilde{I}_{vk}, \tilde{U}_{vk}$  – синусоидальные мгновенные ток и напряжение на соответствующем электроприемнике (нагрузке) с координатой  $(v, k)$ ;  $\tilde{i}_{vk}, z_{vk}$  – мгновенный ток и сопротивление  $v$ -го межабонентского участка (МАУ)  $k$ -й фазы;  $\tilde{u}_{vk}, \tilde{y}_v$  – 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;  $\tilde{U}_k, \tilde{I}_k = \tilde{i}_{1k}$  – мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия.

1. Распределительная сеть относится к классу линейных систем и функционирует в несимметричном режиме.

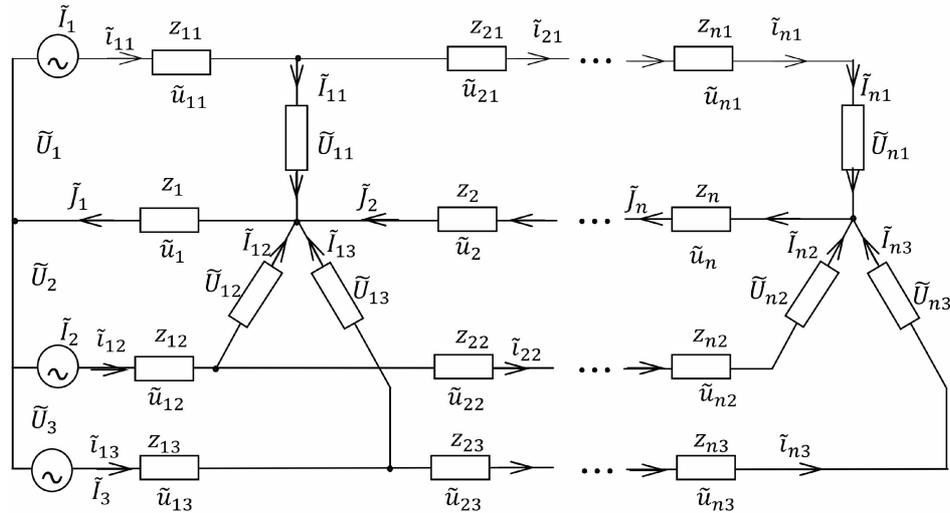


Рис. 1. Расчетная схема трехфазной сети

2. Линейные и нейтральный провода сети имеют разные сечения.

3. Ток утечки отводится через нейтральный провод сети.

4. База данных АСКУЭ содержит текущие значения сопротивлений  $z_{vk}$  и  $z_v$  межабонентских участков (МАУ), представленных в комплексной форме [16, 23].

5. Периодически в дискретные моменты времени  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  подсистема сбора данных АСКУЭ осуществляет опрос абонентских счетчиков электроэнергии 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  $I_{vk}$  и напряжений  $U_{vk}$  на соответствующих нагрузках и сдвигов фаз  $\varphi_{vk}$  между ними:

$$\begin{aligned} I_t &= \{I_{vk}\}_{n \times 3}, \\ U_t &= \{U_{vk}\}_{n \times 3}, \\ \varphi_t &= \{\varphi_{vk}\}_{n \times 3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Задача состоит в идентификации и локализации мест утечек тока в распределительной сети.

**Метод решения задачи**

Решение сформулированной задачи состоит из следующих основных этапов:

- 1) идентификация наличия в сети утечек тока;
- 2) оценка параметров тока утечки;
- 3) формирование критерия локализации координаты несанкционированного потребителя;
- 4) локализация координаты несанкционированного потребителя.

*Идентификация наличия в сети утечек тока.*

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

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

Распределительная сеть характеризуется следующими состояниями [12]:

- 1) нормальное (желаемое) состояние  $S^0$ ;
- 2) возмущенное состояние  $S'$ .

В нормальном состоянии ( $S^0$ ) в РЭС отсутствует утечка тока и для всех  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  выполняются следующие соотношения:

$$|I_{0k}(t) - I_k^a(t)| \leq \Delta I_{\max}, \quad k = \overline{1,3}, \quad (2)$$

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

В случае, когда хотя бы одно из условий (2) не выполняется сеть переходит в возмущенное состояние  $S'$ , что обуславливается наличием в ней утечек тока.

Анализ показывает, что использование условий (2) для выявления факта утечек тока в сети представляет определенные сложности, что связано с необходимостью предварительного определения неизвестных фазовых сдвигов абонентских синусоидальных токов  $\tilde{I}_{vk}(t)$ , которые в установившемся режиме определяются выражениями [16]:

$$\tilde{I}_{vk}(t) = I_{vk}^{\max} \sin(\omega t + \tilde{\alpha}_{vk}), \quad v = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,3},$$

где  $I_{vk}^{\max}$ ,  $\tilde{\alpha}_{vk}$  – амплитуда и фаза синусоидального тока соответственно, определяемые формулами:

$$I_{vk}^{\max} = \sqrt{2} I_{vk}, \quad \tilde{\alpha}_{vk} = \beta_{vk} + \alpha_{vk},$$

$\alpha_{vk}$  – приращение фазового сдвига относительно базового значения  $\beta_k$ , которое определяется формулой  $\beta_{vk} = \frac{2(k-1)\pi}{3}$ .

В целях упрощения решения сформулированной выше задачи предварительно выполним декомпозицию структуры исходной трехфазной сети (см. рис. 1), предполагая, что она относится к классу линейных систем. С учетом свойства линейности ее можно расчленить на три электриче-

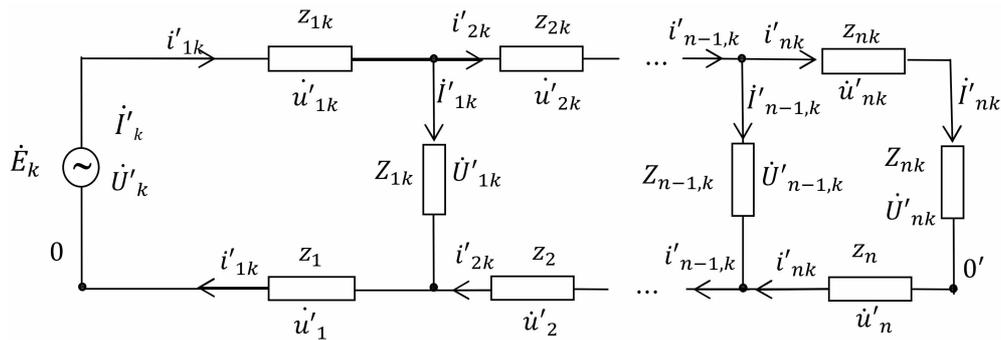


Рис. 2. Структура  $k$ -й подсистемы распределительной сети

ские цепи (подсистемы), каждая из которых представляет собой соответствующую фазу сети при отключенном состоянии двух других фаз (рис. 2).

Эти подсистемы можно рассматривать как условно независимые (автономные) структуры, на входах которых действуют ЭДС  $\dot{E}_1, \dot{E}_2$  и  $\dot{E}_3$ , формируемые источником питания (ТП) сети. При этом комплексные токи  $\dot{I}'_{vk}$  и напряжения  $\dot{U}'_{vk}$  на нагрузках, а также межабонентские токи  $i'_{vk}$  и напряжения  $u'_{vk}, u'_v$  новых подсистем отличаются от прежних их значений (см. рис. 1). В частности, комплексные токи  $\dot{I}'_{vk}, i'_{vk}$  и напряжения  $\dot{U}'_{vk}$  можно представить следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{vk} &= I'_{vk} e^{j\alpha_{vk}}, \\ \dot{U}'_{vk} &= U'_{vk} e^{j\psi_{vk}}, \\ i'_{vk} &= I'_{vk} e^{j\tilde{\gamma}_{vk}}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}. \end{aligned}$$

где  $I'_{vk}, U'_{vk}, I'_{vk}, \alpha_{vk}, \psi_{vk}, \tilde{\gamma}_{vk}$  – модули и аргументы соответствующих комплексных переменных, которые являются неизвестными величинами.

В отличие от токов и напряжений при такой декомпозиции значения комплексных сопротивлений ( $Z_{vk}, z_{vk}, z_k$ ) исходной трехфазной сети сохраняются, т. е. не изменяются. В частности, сопротивления нагрузок  $Z_{vk}$  можно представить в виде

$$Z_{vk} = \bar{Z}_{vk} e^{j\varphi_{vk}}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (3)$$

где  $\bar{Z}_{vk}, \varphi_{vk}$  – модули и аргументы соответствующих комплексных сопротивлений  $Z_{vk}$  соответственно, определяемые по исходным данным задачи:

$$\bar{Z}_{vk} = \frac{U_{vk}}{I_{vk}}, \quad \varphi_{vk} = \arccos c_{vk}, \quad c_{vk} = \cos \varphi_{vk}.$$

Теперь на основе указанной выше декомпозиции для выявления факта утечек тока в сети представляется возможным вместо условий (2) использовать другие соотношения, определяемые только известными сопротивлениями элементов трехфазной сети и отдельных ее цепей. Для этой цели рассмотрим эквивалентные сопротивления упрощенных цепей (фаз)  $z_k^0$  и  $z'_k$ , вычисленных соответственно для нормального  $S^0$  и возмущенного  $S'$  состояний сети. При этом оценки сопротивлений  $z'_k$  можно вычислить по данным головного трехфазного счетчика электроэнергии, установленного в ТП:

$$z'_k = \frac{U_{0k}}{I_{0k}} e^{j\varphi'_k} = \bar{z}'_k e^{j\varphi'_k}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (4)$$

где  $I_{0k}, U_{0k}, \varphi'_k$  – действующие значения напряжения  $\bar{U}_{0k}$  и тока  $\bar{I}_{0k}$  на входе  $k$ -й фазы и соответствующие коэффициенты мощности;  $\bar{z}'_k$  – модуль комплексного сопротивления  $z'_k$ .

Для вычисления эквивалентных сопротивлений  $z_k^0$  можно использовать известный способ их определения для последовательно-параллельного соединения электрических цепей [16] и представить их в виде

$$z_k^0 = \bar{z}_k^0 e^{j\varphi_k^0}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где  $\bar{z}_k^0, \varphi_k^0$  – модуль и аргумент комплексной величины  $z_k^0$  соответственно. При этом используются комплексные сопротивления нагрузок сети, представленные в виде (3).

Теперь для того, чтобы определить факт наличия утечки тока в  $k$ -й фазе сети в данном интервале наблюдения  $[t_\xi, t_{\xi+1}]$ , вместо соотношений (2) на основе выражений (4) и (5) имеется возможность использования следующих условий:

$$|\bar{z}_k^0 - \bar{z}'_k| \leq \Delta z_{\max}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

где  $\Delta z_{\max}$  – малое положительное число, определяющее максимально допустимое значение разностей  $(\bar{z}_k^0 - \bar{z}'_k)$ .

Очевидно, что при выполнении условий (6) в  $k$ -й фазе сети отсутствует утечка тока, а при их невыполнении – она присутствует.

*Оценка параметров тока утечки.* Для этой цели вначале осуществляется декомпозиция исходной структуры трехфазной сети, в результате которой формируются три подсистемы, которые показаны на рис. 2. По условиям задачи сопротивления нагрузок  $Z_{vk}$  и межабонентских участков  $Z_{vk}, z_v$  являются известными величинами.

Предположим, что утечка тока происходит в  $\mu$ -й фазе сети. Тогда комплексная мощность  $\dot{P}'_\mu$ , отдаваемая  $\mu$ -й фазе, в возмущенном состоянии сети  $S'$  определяется выражением

$$\dot{P}'_\mu = (I'_\mu)^2 z'_\mu, \quad (7)$$

где  $I'_{0\mu}$  – действующее значение тока  $\bar{I}'_\mu$  на входе  $\mu$ -й фазы, измеряемое головным трехфазным счетчиком электроэнергии;  $z'_\mu$  – эквивалентное сопротивление  $\mu$ -й фазы, которое определяется по формуле (2). В невозмущенном состоянии

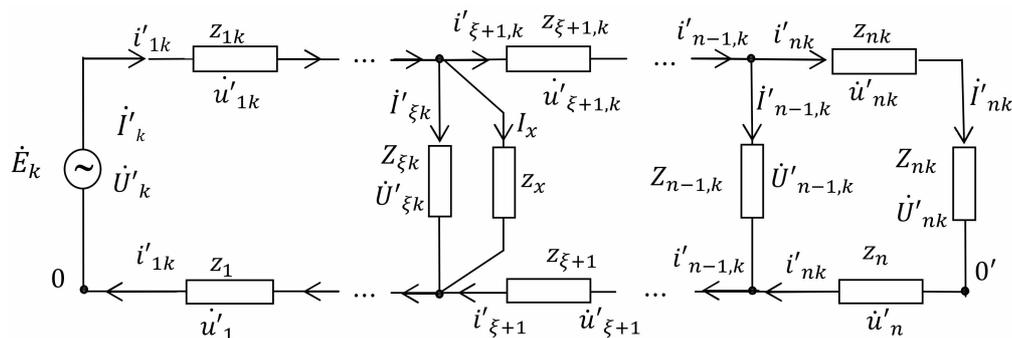


Рис. 3. Схема подключения сопротивления  $z_x$

рассматриваемая мощность определяется выражением

$$\dot{P}_\mu^0 = (I_\mu^0)^2 Z_\mu^0, \quad (8)$$

где  $I_\mu^0, Z_\mu^0$  – действующее значение тока  $\tilde{I}_\mu^0$  на входе  $\mu$ -й фазы и эквивалентное сопротивление. Величина  $Z_\mu^0$  определяется выражением (3). Для оценки тока  $I_\mu^0$  рассмотрим функциональную зависимость между выходом источника питания (ТП) и входными переменными  $\mu$ -й фазы:

$$E_\mu = U_\mu^0 + I_\mu^0 z, \quad (9)$$

где  $E_\mu, z$  – действующее значение э.д.с. источника и его внутреннее сопротивление соответственно;  $U_\mu^0$  – действующее значение напряжения на входе невозмущенной  $\mu$ -й фазы. С учетом того, что  $U_\mu^0 = I_\mu^0 z_\mu^0$ , соотношение (9) запишется в виде

$$E_\mu = (z_\mu^0 + z) I_\mu^0.$$

Отсюда получаем оценку величины  $I_\mu^0$ :

$$I_\mu^0 = \frac{E_\mu}{z_\mu^0 + z}. \quad (10)$$

С учетом выражения (10) формула (8) для комплексной мощности  $\dot{P}_\mu^0$  принимает вид

$$\dot{P}_\mu^0 = \frac{E_\mu^2 z_\mu^0}{(z_\mu^0 + z)^2}. \quad (11)$$

Очевидно, что мощность  $\Delta \dot{P}_\mu$ , потребляемая несанкционированным потребителем, определяется разностью

$$\Delta \dot{P}_\mu = \dot{P}_\mu' - \dot{P}_\mu^0,$$

которая с учетом (7) и (11) имеет вид

$$\Delta \dot{P}_\mu = (I_\mu')^2 z_\mu' - \frac{E_\mu^2 z_\mu^0}{(z_\mu^0 + z)^2}. \quad (12)$$

С другой стороны, для  $\Delta \dot{P}_\mu^0$  справедлива формула

$$\Delta \dot{P}_\mu = I_x^2 z_{лх}, \quad (13)$$

где  $I_x, z_{лх}$  – действующее значение тока утечки и комплексное сопротивление межбонентского участка рассматриваемой фазы от источника до места подключения НОЭ соответственно, определяемые следующими выражениями:

$$I_x = I_\mu' - I_\mu^0, \quad (14)$$

$$z_{лх} = z_l + z_x, \quad (15)$$

$z_x$  – комплексное сопротивление нагрузки несанкционированного потребителя. При этом величина тока  $I_x$  является известной величиной. Теперь,

приравняв правые части соотношений (12) и (13), получаем равенство

$$(I_\mu')^2 z_\mu' - \frac{E_\mu^2 z_\mu^0}{(z_\mu^0 + z)^2} = I_x^2 z_{лх}.$$

Отсюда с учетом (14) получаем формулу для определения сопротивления несанкционированного потребителя  $z_x$ :

$$z_x = \frac{(I_\mu')^2 z_\mu' - I_x^2 z_{лх}}{I_x^2} - \frac{E_\mu^2 z_\mu^0}{I_x^2 (z_\mu^0 + z)^2}. \quad (16)$$

Таким образом, найдены параметры несанкционированного потребителя, которые определяются формулами (14) и (16).

*Критерий локализации координаты несанкционированного потребителя.* Для этой цели сопротивление неизвестной нагрузки  $z_x$  подключаем параллельно к некоторой другой произвольной нагрузке. Например, к нагрузке, имеющей координату  $(\xi, \mu)$ , что показано на рис. 3. При этом сопротивление  $z_n$  по условиям задачи является известной величиной, а  $z_x$  определяется формулой (16).

Далее вычисляем эквивалентное сопротивление  $\hat{z}_\mu$  рассматриваемой фазы, которое является функцией от сопротивления  $z_x$  и номера  $\xi$  пока неизвестного контура, к которому подключен несанкционированный потребитель, т. е.  $\hat{z}_\mu = \hat{z}_\mu(\xi, z_x)$ . Введем следующую функцию:

$$F_\mu(\xi, z_x) = |z_\mu' - \hat{z}_\mu(\xi, z_x)|, \quad (17)$$

где  $z_\mu'$  – известное эквивалентное сопротивление, которое вычисляется по формуле (2) и характеризует возмущенное состояние сети  $S'$ .

Анализ показывает, что нулевое (или близкое к нулю) значение функции  $F_\mu(\xi, z_x)$  достигается при значении  $\xi = \xi^*$ , которое определяет координату несанкционированного потребителя  $(\xi^*, \mu)$ . Таким образом,  $F_\mu(\xi, z_x)$  по существу является критериальной функцией для отыскания искомой координаты.

*Локализация координаты несанкционированного потребителя.* Для этой цели сопротивление  $z_x$  подключаем параллельно к другой нагрузке, например, с координатой  $(\mu, \xi + 1)$  и находим величину соответствующего сопротивления  $\hat{z}_\mu(\xi, z_x)$  и значение функции  $F_\mu(\xi + 1, z_x)$ . Продолжая

этот процесс, решаем следующую экстремальную задачу:

$$\min_{\xi \in \zeta} F_{\mu}(\xi, z_x) = F(\xi^*, z_x), \quad (18)$$

где  $\zeta$  – дискретное множество, состоящее из натуральных чисел  $\nu = 1, 2, \dots, n$ , определяющих номера контуров рассматриваемой фазы ( $k = \mu$ );  $\xi^*$  – номер контура, определяющий минимальное значение функции  $F(\xi^*, z_x)$ . При этом целое число  $\xi^*$ , найденное в результате решения экстремальной задачи (18), определяет координату  $(\xi^*, \mu)$  несанкционированного потребителя, подключенного к  $\mu$ -й фазе трехфазной сети. Полученные результаты позволяют сформулировать следующий алгоритм локализации координаты несанкционированного потребителя:

1) опрос счетчиков электроэнергии, запись в базу данных АСКУЭ исходных данных, представленных в виде (1);

2) определение фазы, к которой подключен несанкционированный потребитель ( $k = \mu$ );

3) вычисление эквивалентных сопротивлений  $z_{\mu}^{\prime}$  и  $z_{\mu}^0$  фаз, которые определяются для возмущенного  $S^{\prime}$  и невозмущенного  $S^0$  состояний сети, и представление их в виде (4) и (5);

4) оценка комплексных мощностей фаз  $\dot{P}_{\mu}^{\prime}$  и  $\dot{P}_{\mu}^0$ , которые определяются для возмущенного  $S^{\prime}$  и невозмущенного  $S^0$  состояний сети, по формулам (7) и (8);

5) определение потери мощности  $\Delta \dot{P}_{\mu}$ , вызванные из-за подключения к сети НОЭ, оценка которых вычисляется по формуле (12);

6) оценка потребления нагрузки  $z_x$  несанкционированного потребителя по формуле (16);

7) формирование критериальных функций  $F_{\mu}(\xi, z_x)$ , определяемых выражением (16);

8) определение координаты  $(\xi^*, \mu)$  несанкционированного потребителя на основе решения экстремальной задачи (17).

### Выводы

Предложен новый метод идентификации и локализации координаты несанкционированного отбора электроэнергии в несимметричных распределительных сетях напряжением 0,4 кВ. Идея идентификации основана на декомпозиции исходной трехфазной сети на более простые, относительно автономные структурные составляющие (подсистемы), каждая из которых представляет собой соответствующую фазу сети при отключенном состоянии двух других фаз. Найденны условия, при выполнении которых идентифицируется факт наличия несанкционированного отбора электроэнергии в сети. Предложен конструктивный критерий, определяющий математические условия, при выполнении которых обеспечивается локализация координаты утечек тока в сети. Формирование указанного критерия осуществляется на основе оценки неизвестного сопротивления нагрузки

несанкционированного потребителя. При этом отпадает необходимость предварительного построения математической модели трехфазной распределительной сети, что значительно упрощает вычислительную процедуру метода. Полученные результаты можно использовать для создания алгоритмического и специального программного обеспечения подсистемы идентификации и мониторинга потерь электроэнергии в трехфазной распределительной сети в составе АСКУЭ.

### Литература

1. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Авербух, М.А. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства / М.А. Авербух, Е.В. Жилин // Энергетик. – 2016. – № 6. – С. 54–56.
3. Пат. 2548656 Российская Федерация. Способ симметрирования фазных токов трехфазной четырехпроводной линии и устройство для его осуществления / В.В. Самокиш. – Оpubл. 27.12.2013, Бюл. № 11.
4. Дулепов, Д.Е. Снижение потерь электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях 0,38 кВ / Д.Е. Дулепов, Т.Е. Кондраненкова // Дальневосточный аграрный вестник. – 2017. – № 2 (42). – С. 139–145.
5. Пат. 2249286 Российская Федерация. Способ автоматизированного активного контроля уровня несимметрии напряжений и токов / Г.А. Большанин. – Оpubл. 27.03.2005, Бюл. № 9.
6. Пат. 2490768 Российская Федерация. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом / И.В. Наумов, Д.А. Иванов, С.В. Подъячих, Гантулга Дамдинсурэн. – Оpubл. 20.08.2013, Бюл. № 23.
7. Еремина, М.А. Развитие автоматических систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) / М.А. Еремина // Молодой ученый. – 2015. – № 3. – С. 135–138.
8. Гринкруг, М.С. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения / М.С. Гринкруг, И.А. Митин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2009. – № 3–4. – С. 80–84.
9. Войтов, О.Н. Анализ несимметричных режимов электроэнергетических систем и управление ими / О.Н. Войтов, В.А. Мантров, Л.В. Семенова // Электричество. – 1999. – № 10. – С. 2–18.
10. Оморов, Т.Т. Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования / Т.Т. Оморов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 3. – С. 194–200.
11. Сапронов, А.А. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в

электрических сетях напряжением до 1 кВ / А.А. Сапронов, С.Л. Кужеков, В.Г. Тынянский // Известия высших учебных заведений. Электроэнергетика. – 2004. – № 1. – С. 55–58.

12. Идентификация утечек тока в распределительных сетях по данным АСКУЭ / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев, Р.Ч. Осмонова и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 48–54. DOI: 10.14529/power180206

13. Моделирование несимметричных сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Д.А. Джапарова и др. // Наука в центральной России. – 2017. – № 2 (26). – С. 47–53.

14. A method for development of software packages for mathematical simulation of electric power systems / B.V. Kavalero, A.B. Petrochenkov, K.A. Odin, V.A. Tarasov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, no. 6. – P. 331–338. DOI: 10.3103/s1068371215060085

15. Будникова, И.К. Компьютерное моделирование параметров распределительной электрической сети / И.К. Будникова, Е.С. Белашова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 9–10. – С. 75–81.

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

17. 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

18. Genin, V.S. Diagnostic monitoring in a distribution network / V.S. Genin, V.V. Koznov, S.O. Fel'dman // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, no. 2. – P. 79–82. DOI: 10.3103/s1068371215020054

19. 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

20. Васильева, Т.Н. Анализ симметрии напряжения в распределительных электрических сетях напряжением 0,38 кВ / Т.Н. Васильева, Ю.В. Костин // Молодой ученый. – 2016. – № 11 (115). – С. 291–297.

21. Оморов, Т.Т. Оценка влияния несимметрии токов и напряжений на потери электроэнергии в распределительной сети с использованием АСКУЭ / Т.Т. Оморов // Электричество. – 2017. – № 9. – С. 17–23. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-9-17-23

22. 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.

23. Оморов, Т.Т. К расчету трехфазных распределительных сетей в системах автоматизации контроля и учета электроэнергии / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев, Р.Ч. Осмонова // Энергетик. – 2017. – № 4. – С. 28–31.

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

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

**Такырбашев Бейшеналы Касымалиевич**, Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек; 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.

Поступила в редакцию 23 октября 2019 г.

## THE LOCALIZATION OF CURRENT LEAKAGE IN THE DISTRIBUTION NETWORK BASED ON AUTOMATED METER READING AND CONTROL SYSTEM (AMRCS) DATA

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

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

The paper considers a four-wire distribution electric network (DEN) with 0.4 kV voltages, setting the task of identifying the places of current leaks in the DEN. The available methods of its solution are based on the preliminary construction of a three-phase network model in an integrated form, which, to a certain extent, complicates the identification procedure. The authors propose an identification algorithm that uses the idea of simplifying the initial structure of a three-phase network by decomposing it into relatively simple electrical circuits. Based on the analysis of the equations of the electrical circuits of the last ones, a new identification criterion is derived, which allows for the localization of current leakage places in the network. The formation of mathematics (rules), on which the specified criterion is based, is carried out without calculating the currents and voltages in the network. In this case, only the values of the complex resistances of the loads and the inter-customer sections of the backbone transmission line are used, which greatly simplifies the implementation of the computational algorithm of the proposed method. The obtained results shall be usable for the development of special software for the subsystem for identification and monitoring of electricity losses as part of AMRCS.

*Keywords: electrical distribution network, currents leakage, identification and localization method.*

### References

1. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii* [Power Loss. Reactive Power. Power Quality]. Moscow, YeNAS Publ., 2009. 456 p.
2. Averbukh M.A., Zhilin E.V. [About losses of the Electric Power in Systems of Power Supply of Individual Housing Construction]. *Energetik*, 2016, no. 6, pp. 54–57. (in Russ.)
3. Samokish V.V. *Sposob simmetrirovaniya faznykh tokov trekhfaznoy chetyrekhprovodnoy linii i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* [Way of Balancing of Phase Currents of the Three-Phase Four-Wire Line and the Device for His Implementation]. Patent RF, no. 2548656, publ. 27.12.2013, Bul. no. 11.
4. Dulepov D.E., Kondranenkova T.E. [Reduction of Electric Power Losses in Asymmetrical Modes in Rural Distribution Electric Networks 0.38 kV]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik* [Far Eastern Agricultural Bulletin], 2017, no. 2 (42), pp. 139–145. (in Russ.)
5. Bol'shanin G.A. *Sposob avtomatizirovannogo aktivnogo kontrolya urovnya nesimmetrii napryazhenij i tokov* [Way of the Automated Active control of Level of Asymmetry of Tension and Currents]. Patent RF, no. 2249286, publ. 27.03.2005, Bul. no. 9.
6. Naumov I.V., Ivanov D.A., Pod'yachih S.V., Gantulga Damdinsurehn. *Simmetriruyushchee ustrojstvo dlya trekhfaznykh setej s nulevym provodom* [The Symmetrizing Device for Three-Phase Networks with a Zero Wire]. Patent RF, no. 2490768, publ. 20.08.2013, Bul. no. 23.
7. Eremina M.A. [Development of Automatic Systems for Commercial Accounting of Energy Resources (AMRMS)]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 3, pp. 135–138. (in Russ.)
8. Grinkrug M.S., Mitin I.A. [Control of Current Asymmetry in Low Voltage Distribution Networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [University News. Energy Problems], 2009, no. 3–4, pp. 80–84. (in Russ.)
9. Voytov O.N., Mantrov V.A., Semenova L.V. [Analysis of the Asymmetrical Modes of Electrical Power Systems and Management of Them]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1999, no. 10, pp. 2–18. (in Russ.)
10. Omorov T.T. Balancing of the Distributed Electrical Network by Method of Digital Regulation. *Mechanics, Automation, Management*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 194–200.
11. Sapronov A.A., Kuzhekov S.L., Tynyanskiy V.G. [Expeditious Identification of Uncontrollable Electricity Consumption in Electric Networks up to 1 kV]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [University News. Electromechanics], 2004, no. 1, pp. 55–58. (in Russ.)

12. Omorov T.T., Takyrbashev B.K., Osmonova R.Ch., Koibagarov T.Zh. [Identification of Current Leakage in Distribution Networks Based on Automated Meter Reading and Control System (AMR)]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 48–54. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180206
13. Kobelev A., Kochergin S., Dzhaparova D.A., Korolyova L.Y. [Simulation of Asymmetrical Conditions for Rural Power Distribution Networks of 10/0.4 kV]. *Nauka v tsentral'noy Rossii* [Science in Central Russia], 2017, no. 2 (26), pp. 47–53. (in Russ.)
14. Kavalerov B.V., Petrochenkov A.B., Odin K.A., Tarasov V.A. A Method for Development of Software Packages for Mathematical Simulation of Electric Power Systems. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 6, pp. 331–338. DOI: 10.3103/s1068371215060085
15. Budnikova I.K., Belashova E.S. [Computer Simulation Parameters the Power Distribution Network]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [University News. Energy Problems], 2014, no. 9–10, pp. 75–81. (in Russ.)
16. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin A.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Vol. 1. St. Petersburg, 2009. 512 p.
17. Zelenskiy E.G., Kononov Y.G., Levchenko I.I. Identification of the Parameters of Distribution Networks by Synchronized Current and Voltage Measurements. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 7, pp. 363–368. DOI: 10.3103/s1068371216070129
18. Genin V.S., Koznov V.V., Fel'dman S.O. Diagnostic Monitoring in a Distribution Network. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 2, pp. 79–82. DOI: 10.3103/s1068371215020054
19. Stepanov A.S., Stepanov S.A., Kostyukova S.S. Identification of Parameters of Models of Electric Network Elements on the Basis of Tellegen's Theorem. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 7, pp. 369–372. DOI: 10.3103/s1068371216070105
20. Vasilieva T.N., Kostin Yu.V. [Analysis of the Symmetry of the Voltage in the Distribution Electrical Networks of 0.38 kV]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2016, no. 11 (115), pp. 291–297.
21. Omorov T.T. [To a Problem of Assessment of Influence of Asymmetry of Currents and Tension in Distributive Network on Losses of the Electric Power as a Part of ACSAE]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2017, no. 9, pp. 17–23. (in Russ.) DOI: 10.24160/0013-5380-2017-9-17-23
22. Omorov T.T. [To the Problem of Localization of Unauthorized Selection of the Electric Power in Distributive Networks as a Part of ASCAE]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika* [Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics], 2017, no. 7, pp. 27–32. (in Russ.)
23. Omorov T.T., Takyrbashev B.K., Osmonova R.Ch. [To calculation of three-phase distributive networks in control and accounting of the electric power automation systems]. *Energetik* [Power Engineer], 2017, no. 4, pp. 28–31.

*Received 23 October 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

К проблеме локализации утечек тока в распределительной сети по данным АСКУЭ / Т.Т. Оморов, Т.Ж. Койбагаров, Б.К. Такырбашев, Р.Ч. Осмонова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 79–86. DOI: 10.14529/power190409

### FOR CITATION

Omorov T.T., Koibagarov T.Zh., Takyrbashev B.K., Osmonova R.Ch. The Localization of Current Leakage in the Distribution Network Based on Automated Meter Reading and Control System (AMRCS) Data. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 79–86. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190409

---