

К проблеме диагностики обрывов электрических линий трехфазных распределительных сетей в составе АСКУЭ

ОМОРОВ Т.Т., ТАКЫРБАШЕВ Б.К., ЗАКИРЯЕВ К.Э.

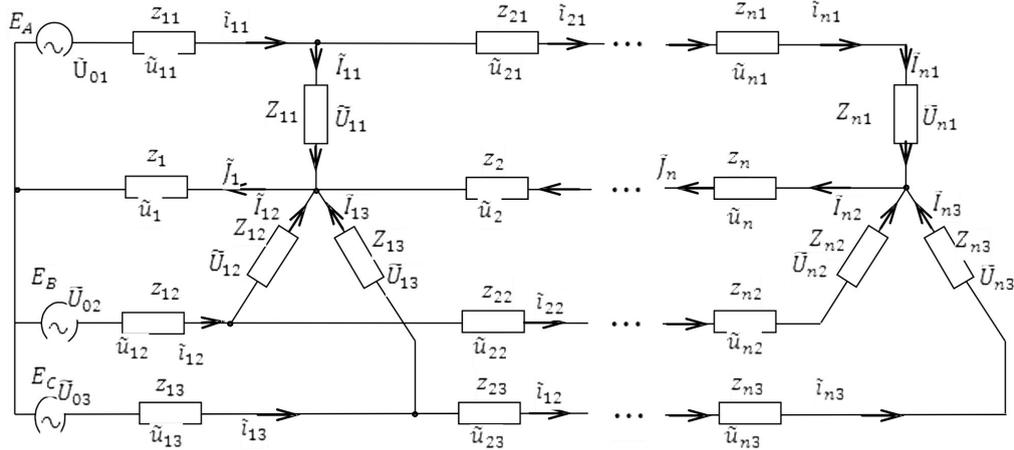
Рассмотрена проблема идентификации и локализации обрывов линий электропередачи трехфазной распределительной электрической сети (РЭС) напряжением 0,4 кВ. Разрабатываются математические модели и методы, позволяющие идентифицировать текущее электрическое состояние РЭС в режиме реального времени по измерительным данным, поступающим с электронных счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети. При этом состояние сети характеризуется набором электрических переменных, который определяется комплексными токами, напряжениями и сопротивлениями межабонентских участков магистральной линии. На основе анализа этих данных предложены критерии, которые позволяют обнаруживать критические ситуации, связанные с обрывами линий электропередачи. Использование этих критериев дает возможность локализовать места обрывов фазных и нейтрального проводов трехфазной сети. Полученные результаты ориентированы на диагностику состояний электрических линий распределительной сети в составе автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *распределительная сеть, состояние проводов, диагностика, обрывы линий, идентификация*

В настоящее время в практике автоматизации электроэнергетических систем широкое применение находят интеллектуальные системы на базе современных информационных и телекоммуникационных технологий. На уровне распределительных электрических сетей (РЭС) указанные технологии внедряются в виде автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1]. Основными функциями этих информационных систем являются контроль данных с электронных счетчиков, установленных у абонентов трехфазной сети, и коммерческий учет электроэнергии. В то же время задачи дальнейшего повышения их эффективности и технико-экономических показателей распределительных компаний сегодня требуют, прежде всего, разработки оптимизационной и диагностической подсистем в составе АСКУЭ. При этом процедура оптимизации режима работы РЭС, в основном связана с решением проблемы компенсации фактора несимметрии токов и напряжений [2–4], а процедура диагностики состояний сети – идентификацией состояний электрических проводов магистральной линии [5–7]. Среди проблем диагностики сети чрезвычайно важное значение имеет идентификация и локализация обрывов фазных и нейтрального проводов трехфазной сети, что обуславливается необходимостью защиты населения от поражений электрическим током при обрывах воздушных электрических линий РЭС. К настоящему времени разработан ряд подходов и технических средств, направленных на решение этой актуальной проблемы [8–10]. Несмотря на это их

практическое применение связано с рядом трудностей, к которым, в частности, относятся фактор несимметрии токов и напряжений [11, 12], а также то, что распределительные сети функционируют в условиях неопределенности [7, 13]. Фактор неопределенности в основном обуславливается тем, что переменные (токи и напряжения) и параметры (сопротивления), определяющие электрическое состояние межабонентских участков магистральной линии, не доступны для измерения и поэтому не контролируются. В статье рассмотрен один из возможных подходов к решению рассматриваемой проблемы в составе АСКУЭ с использованием данных, поступающих в режиме реального времени с группы абонентских счетчиков электроэнергии.

Постановка задачи. Рассматривается трехфазная РЭС с напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рисунке. Для удобства на схеме фазы A, B, C пронумерованы соответственно через индексную переменную k ($k=1,3$). Остальные обозначения: E_A, E_B, E_C – мгновенные фазные ЭДС; Z_{vk} – v -я нагрузка (электроприемник), подключенная к фазе с номером 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; $\tilde{u}_{vk}, \tilde{u}_v$ – мгновенные напряжения соответственно на v -м МАУ k -й фазы и нейтрального провода; \tilde{I}_v, z_v – мгновенный ток и сопротивление v -го участка нейтрального провода;



Расчетная схема трехфазной РЭС

$\tilde{U}_{0k}, \tilde{i}_k$, – мгновенные напряжения и токи на входах соответствующих фаз соответственно.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

- 1) РЭС функционирует в несимметричном режиме;
- 2) сопротивления z_{vk} и z_v ($k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$) межабонентских участков трехфазной сети считаются априори неизвестными;

3) в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети;

4) со счетчиков электроэнергии (Сч_{vk}) в базу данных АСКУЭ по каналам связи в дискретные моменты времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ с шагом дискретизации $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$ ($\xi = \overline{1,2,\dots}$) поступают следующие данные:

действующие значения токов I_{vk} и напряжений U_{vk} на нагрузках Z_{vk} ;
коэффициенты мощности $\cos \varphi_{vk}$, определяемые фазовыми сдвигами φ_{vk} между соответствующими напряжениями \tilde{U}_{vk} и токами \tilde{I}_{vk} .

Отметим, что электрическое состояние сети в момент времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ описывается следующими комплексными векторами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_k &= [\dot{I}_{1k}, \dot{I}_{2k}, \dots, \dot{I}_{nk}]; \quad \dot{U}_k = [\dot{U}_{1k}, \dot{U}_{2k}, \dots, \dot{U}_{nk}]; \\ \dot{u}'_k &= [\dot{u}'_{1k}, \dot{u}'_{2k}, \dots, \dot{u}'_{nk}]; \quad \dot{i}'_k = [\dot{i}'_{1k}, \dot{i}'_{2k}, \dots, \dot{i}'_{nk}]; \\ \dot{u} &= [\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dots, \dot{u}_n]; \quad \dot{J} = [\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dots, \dot{J}_n]; \\ Z_k &= [z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{nk}]; \quad Z_N = [z_1, z_2, \dots, z_n]; \\ k &= \overline{1,3}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где $\dot{I}_{vk}, \dot{U}_{vk}, \dot{i}'_{vk}, \dot{u}'_v, \dot{J}_v$, – комплексные электрические переменные, которые являются неизвестными величинами и указаны на расчетной схеме трехфазной РЭС.

Далее рассматриваются следующие задачи:

1) определение компонентов векторов $\dot{I}_k, \dot{U}_k, \dot{u}'_k, \dot{i}'_k, \dot{u}, \dot{J}, Z_k, Z_N$, описывающих электрическое состояние трехфазной сети;

2) идентификация и локализация координат обрывов фазных и нейтрального проводов РЭС.

Решение задачи диагностики. 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 [14]:

$$\dot{I}_{vk} = I_{vk}^B + I_{vk}^M = I_{vk} e^{j\alpha_{vk}}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{vk} = U_{vk}^B + U_{vk}^M = U_{vk} e^{j\psi_{vk}}; \quad v = \overline{1,n}; \quad k = \overline{1,3}, \quad (3)$$

где $I_{vk}, U_{vk}, \alpha_{vk}, \psi_{vk}$ – модули и фазовые сдвиги этих переменных.

При этом

$$\alpha_{vk} = \tilde{\alpha}_{vk} - \alpha_{vk}^*; \quad \psi_{vk} = \tilde{\psi}_{vk} - \psi_{vk}^*; \quad k = \overline{1,3};$$

$$\alpha_{vk}^* = 2(k-1)\pi/3; \quad \psi_{vk}^* = 2(k-1)\pi/3,$$

где $\tilde{\alpha}_{vk}, \tilde{\psi}_{vk}$ – приращения фазовых сдвигов относительно их номинальных значений α_{vk}^* и ψ_{vk}^* , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети.

Таким образом, для того чтобы модели нагрузок представить в форме (2) и (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 возможных методов решения этой задачи предложен в [15].

Определение текущего электрического состояния сети. В случае, когда построена модель нагрузок в форме (2) и (3) на основе первого закона Кирхгофа, можно вычислить межабонентские токи i_{vk} и J_v по следующим формулам (см. рисунок):

$$i_{vk} = \sum_{l=v}^n \dot{I}_{lk} = \sum_{l=v}^n (I_{lk}^B + jI_{lk}^M); \quad v=\overline{1,n}; \quad k=\overline{1,3}; \quad (4)$$

$$\dot{J}_v = i_{v1} + i_{v2} + i_{v3}; \quad v=\overline{1,n}.$$

Элементы векторов \dot{u}_{vk} , \dot{u}_v определяются на основе вычислительной схемы, предложенной в [15]. При этом используется второй закон Кирхгофа, описывающий баланс напряжений в v -х контурах сети:

$$\dot{u}_{vk} + \dot{u}_v = \dot{U}_{vk} - \dot{U}_{v-1,k} = 0; \quad v=\overline{1,n}; \quad k=\overline{1,3}. \quad (5)$$

В случае, когда сечения фазных и нейтрального проводов одинаковы, то соответствующие сопротивления $z_{vk} = z_v$. Для этого случая в [15] на основе соотношений (5) получены следующие выражения для искомых напряжений \dot{u}_{vk} :

$$\dot{u}_{v1} = (3\dot{b}_{v1} - \dot{b}_{v2} - \dot{b}_{v3})/4;$$

$$\dot{u}_{v2} = (-\dot{b}_{v1} + 3\dot{b}_{v2} - \dot{b}_{v3})/4;$$

$$\dot{u}_{v3} = (-\dot{b}_{v1} - \dot{b}_{v2} + 3\dot{b}_{v3})/4; \quad v=\overline{1,n},$$

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

При этом напряжения \dot{u}_v на участках нейтрального провода:

$$\dot{u}_v = \dot{u}_{v1} + \dot{u}_{v2} + \dot{u}_{v3}, \quad v=\overline{1,n}.$$

В случае, когда фазные и нейтральный провода имеют разные сечения, а их сопротивления имеют разные значения ($z_{vk} \neq z_v$), для определения искомых напряжений \dot{u}_{vk} и \dot{u}_v можно использовать вычислительный алгоритм, предложенный в [12].

Идентифицированные таким образом комплексные векторы \dot{I}_k , \dot{U}_k , \dot{u}'_k , \dot{i}_k , \dot{J} позволяют с определенной точностью определить оценки текущих значений компонентов вектор-параметров $Z_k = [z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{nk}]$ и $Z_N = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ трехфазной сети:

$$z_{vk} = \dot{u}_{vk} / i_{vk}; \quad v=\overline{1,n}; \quad (6)$$

$$z_v = \dot{u}_v / \dot{J}_v; \quad v=\overline{1,n}.$$

Реализация изложенных процедур (алгоритмов) оценки электрического состояния трехфазной сети осуществляется в режиме ее нормального функционирования (в штатном режиме). Предполагается,

что полученные данные в соответствующих интервалах наблюдения $[t_\xi, t_{\xi+1}]$ хранятся в базе данных АСКУЭ.

Идентификация и локализация координат обрывов фазных и нейтрального проводов РЭС. Предположим, что для момента времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ при условии, что РЭС функционирует в нормальном (штатном) режиме, задача определения текущего электрического состояния сети решена, в частности, определены межабонентские комплексные токи \dot{i}_{vk} для k -й фазы, а также значения сопротивлений z_v^* межабонентских участков нейтрального провода, определяемые соответственно формулами (4) и (6). Далее на основе этих данных составляем следующие векторы:

$$i_k^* = [i_{1k}^*, i_{2k}^*, \dots, i_{nk}^*], \quad Z_N^* = [z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*].$$

Отметим, что значения базовых сопротивлений z_v^* , $v=\overline{1,n}$, изменяются медленно в зависимости от текущих климатических условий и для достаточно длинного периода времени остаются практически постоянными, т.е. $z_v^* = \text{const}$.

Как известно, в РЭС два типа обрывов: фазных линий; нейтрального провода.

В первом случае при обрыве провода q -го межабонентского участка k -й фазы $i_{vk} = 0$, $v=q, q+1, \dots, n$, так как соответствующие электроприемники (нагрузки) при этом отключены от питания. Тогда структура вектора i_k имеет следующий вид:

$$i_k = [i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{q-1,k}, 0, \dots, 0], \quad (7)$$

где $i_{vk} > 0$, $v=1, 2, \dots, q-1$.

Анализ показывает, что при обрыве провода η -го межабонентского участка нейтрального провода имеют место следующие соотношения для компонентов вектора Z_N :

$$z_\eta \neq z_\eta^*; \quad (8)$$

$$z_v = z_v^*; \quad v=1, 2, \dots, \eta-1, \eta+1, \dots, n,$$

где z_η – текущее значение сопротивления, определенного для рассматриваемого дискретного момента времени t .

При этом

$$Z_N = [z_1^*, z_2^*, \dots, z_{\eta-1}^*, z_\eta, z_{\eta+1}^*, \dots, z_n^*].$$

Таким образом, во втором случае при выполнении условия (8) векторы Z_N^* и Z_N не являются равными, т.е.

$$Z_N \neq Z_N^* \quad (9)$$

Очевидно, что в штатном режиме работы РЭС (при отсутствии обрывов линий электропередачи) с определенной точностью выполняется условие $Z_N = Z_N^*$.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие критерии для локализации обрывов фазных и нейтрального проводов сети.

Критерий 1: при обрыве провода q -го участка k -й фазы для вектора i_{vk} выполняется условие (7).

Критерий 2: при обрыве η -го участка нейтрального провода выполняются условия (8) и (9).

Сформулированные критерии можно рассматривать как методологическую и алгоритмическую основу для разработки подсистемы диагностики состояний электрических линий распределительных сетей в составе АСКУЭ.

Выводы. Предложен подход к решению проблемы диагностики обрывов электрических линий трехфазных распределительных сетей в режиме реального времени с использованием данных, поступающих в базу данных АСКУЭ с группы абонентских счетчиков электроэнергии. Его основу составляют математические модели нагрузок, построенные в комплексной форме, в условиях несимметрии токов и напряжений. Использование этих моделей дало возможность разработать вычислительные процедуры для идентификации недоступных для непосредственного измерения и контроля электрических переменных (токов, напряжений) и параметров (сопротивлений), определяющих состояния межабонентских участков магистральной линии сети. На основе полученных результатов сформулированы критерии, позволяющие идентифицировать и локализовать места обрывов фазных и нейтрального проводов.

Методологические и алгоритмические основы предложенного подхода ориентированы на создание специального программного обеспечения подсистемы диагностики состояний электрических проводов распределительных сетей в составе АСКУЭ, что дает возможность принять оперативные меры в критических ситуациях при их функционировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ожегов А.Н.** Системы АСКУЭ. Киров: ВятГУ, 2006, 102 с.
2. **Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О.** Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками. — Электротехника, 2014, No. 6, с. 8–12.
3. **Omorov T.T., Takyrbashev B. K., Osmonova R.Ch.** Synthesis of the managing director of the subsystem for optimization of the operating mode of the distributive electric network. — Engineering Studies, 2016, No. 3, pp. 606–615.
4. **Redkovsky N.N., Goureev V.A.** Optimization problems and calculation of electrical networks work regimes. — Optimization Methods and Software, 1997, т. 7, No. 2, pp. 139–155.
5. **Фардиев И.Ш., Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В., Губаев Д.Ф.** Диагностика воздушных линий распределительных электрических сетей. — Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2004, No. 7–8, с. 41–49.
6. **Kutina M.V.** Control system emergency mode for wire break in distribution networks. — Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2011, No. 6 (99), pp. 60–63.
7. **Оморов Т.Т., Осмонова Р.Ч., Такырбашев Б.К.** Диагностика состояний электрических линий распределительных сетей в составе АСКУЭ. — Контроль. Диагностика, 2017, No. 5, с. 44–48.
8. **Ершов А.М., Филатов О.В., Молоток А.В. и др.** Система защиты электрической сети напряжением 380 В от обрывов воздушной линии. — Электрические станции, 2016, No. 5, с. 28–33.
9. **Клочков А.Н.** Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода. — Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2011, No. 1, с. 221–223.
10. **Кутина М.В.** Система защиты от обрыва провода и поиск места повреждения в распределительных сетях напряжением 6–35 кВ. — Технічна електродинаміка, 2012, No. 2, с. 46–47.
11. **Пономаренко О.И., Холидинов И.И.** Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения. — Энергетик, 2015, No. 12, с. 6–8.
12. **Оморов Т.Т.** Оценка влияния несимметрии токов и напряжений на потери электроэнергии в распределительной сети с использованием АСКУЭ. — Электричество, 2017, No. 9, с. 17–23.
13. **Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А., Китагин П.А., Терехов К.И.** Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ. — Fractalsimulation, 2013, No. 1, с. 5–13.
14. **Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В.** Теоретические основы электротехники. Т.1. СПб.: Питер, 2009, 512 с.
15. **Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч.** К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ. — Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия энергетика, 2017, No. 1, с. 21–28.

[09.04.2018]

А в т о р ы: **Оморов Туратбек Турсунбекович**, Член-корреспондент НАН КР; окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина) в 1975 г. В 1997 г. защитил докторскую диссертацию в НПО «Кибернетика» АН РУз по проблемам автоматического управления техническими системами. Заведующий лабораторией Института физико-технических проблем и материаловедения НАН КР.

Такырбашев Бейшеналы Касымалиевич окончил Фрунзенский политехнический институт в 1973 г. Начальник службы релейной защиты и автоматики ОАО «Северэлектро».

Закиряев Кубанычбек Эсейович окончил Томский политехнический университет им. С.М. Кирова в 1992 г. Старший преподаватель Иссык-Кульского государственного университета им. К. Тыныстанована.

On the Problem of Diagnosing Open-Circuit Faults of Electric Lines in Three-Phase Distribution Networks

OMOROV Turatbek T. (*Institute of physical and technical problems, Bishkek, Kirgiz Republic*) – Head of the Laboratory, Corresponding Member of National Academy of Sciences

TAKYRBASHEV Beishenaly K. (*JSC «Severelectro», Bishkek, Kirgiz Republic*) – The chief of relay protection service and automation

ZAKIRYAYEV Kubanychbek E. (*Issyk-Kul State University named after K. Tynystanov, Bishkek, Kirgiz Republic*) – Senior teacher

The article considers the problem of identifying and isolating open-circuit faults in power lines of a 0.4 kV three-phase distribution electric network. Mathematical models and method using which it is possible to identify the current electrical state of the distribution electrical network in the online mode based on the measurement data arriving from electronic electricity counters installed in the network users are developed. In so doing, the network state is characterized by a set of electrical variables determined by complex currents, voltages, and impedances of a trunk line segments between the load nodes. Criteria elaborated from an analysis of the set data for identifying critical conditions connected with power line open-circuit faults are proposed. By using these criteria it becomes possible to isolate the places of open-circuit faults on three-phase network line and neutral wires. The obtained results are suggested to be used for diagnosing the state of distribution electric network lines in the composition of an electric power fiscal metering system (EPFMS).

Key words: distribution network, state of wires, diagnostics, line open-circuit faults, identification

REFERENCES

1. **Ozhegov A.N.** *Sistemy ASKUJe* [Systems of ACSEA]. Kirov, Vjat. St. Univ. 2006, 102 p.
2. **Kosoukhov F.D., Vasil'yev N.V., Filippov A.O.** *Elektrotehnika* – in Russ. (*Power Engineering*), 2014, No. 6, pp. 8–12.
3. **Omorov T.T., Takyrbashev B.K., Osmonova R.Ch.** Synthesis of the managing director of the subsystem for optimization of the operating mode of the distributive electric network. – *Engineering Studies*, 2016, No. 3, pp. 606–615.
4. **Redkovsky N.N., Goureev V.A.** Optimization problems and calculation of electrical networks work regimes. – *Optimization Methods and Software*, vol. 7, 1997, No. 2, pp. 139–155.
5. **Fardiyev I.Sh., Minullin R.G., Zakamskiy E.V.** *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki* – in Russ. (*News of Higher Education Institutions. Problems of Energy*), 2004, No. 7–8, pp. 41–49.
6. **Kutina M.V.** *Visnik Vinnitskogo Politekhnicnogo Institutu* – on Ukrainian (*Bulletin of the Vinnytsya Polytechnic Institute*), 2011, No. 6 (99), pp. 60–63.
7. **Omorov T.T., Osmonova R.Ch., Takyrbashev B.K.** *Kontrol'. Diagnostika*. – in Russ. (*Control. Diagnostics*), 2017, No. 5, pp. 44–48.
8. **Ershov A.M., Filatov O.V., Molotok A.V. et al.** *Elektricheskiye stantsii* – in Russ. (*Power Stations*), 2016, No. 5, pp. 28–33.
9. **Klochov A.N.** *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* – in Russ. (*Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*), 2011, No. 1, pp. 221–223.
10. **Kutina M.V.** *Tekhnichna elektrodinamika* – in Russ. (*Technical Electrodynamics*), 2012, No. 2, pp. 46–47.
11. **Ponomarenko O.I., Holiddinov I.I.** *Energetik* – in Russ. (*Power Engineering Specialist*), 2015, No. 12, pp. 6–8.
12. **Omorov T.T.** *Elektrichestvo* – in Russ. (*Electricity*), 2017, No. 9, pp. 17–23.
13. **Kochergin S.V., Kobelev A.V., Hrebtov N.A., Kitashin P.A., Terehov K.I.** Modeling of rural distributive electric networks 10/0,4 of kV. Fractal simulation, 2013, No. 1, pp. 5–13.
14. **Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin A.V.** *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical foundations of electrical engineering). SPb., Piter, 2009, vol. 1, 512 p.
15. **Omorov T.T., Takyrbashev B.K., Osmonova R.Ch.** *K probleme modelirovaniya nesimmetrichnykh raspredelitel'nykh elektricheskikh setey v sostave ASKUEH* (On modelling unbalanced distributive networks incorporated in ASCAE). *Bulletin of South Ural State University. Ser. Energetics*, 2017, No. 1, pp. 21–28.

[09.04.2018]