

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Осмонова Рима Чынарбековна, науч.сотр., НАН КР, Кыргызстан, 720040, г.Бишкек, пр. Чуй, 66а, e-mail: r.osmonova@mail.ru. ORCID ID 0000- 0002- 7305- 1146

Эралиева Аида Шаршенбековна, аспирант, НАН КР, Кыргызстан, 720040, г.Бишкек, пр. Чуй, 66а, e-mail: loran84@mail.ru.

Темиркулова Наргис Темиркуловна, ст. преподаватель, КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Ч Айтматова, 66, e-mail: temirkulova.n@gmail.com.

Аннотация. Рассматривается несимметричная распределительная электрическая сеть в условиях функционирования автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). Сформулирована задача идентификации ее математической модели в комплексной форме, которая сводится к определению вещественных и мнимых частей (параметров) токов и напряжений на нагрузках трехфазной сети. Предложен метод ее решения, основанный на математических соотношениях, описывающих функциональные связи между переменными состояния модели и использовании алгоритмов параметрической оптимизации. Получены системы алгебраических уравнений относительно искомых параметров и дифференциальные уравнения их адаптации, описывающие процесс движения параметров к их искомым значениям. Реализация процедуры идентификации модели распределительной сети

осуществляется с непосредственным использованием исходных данных, полученных по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии. Метод можно использовать для решения задач диагностики состояний магистральной линии и оптимизации режимов работы распределительной сети в составе АСКУЭ.

Ключевые слова: распределительная сеть, математическая модель, метод идентификации модели.

IDENTIFICATION OF THE DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORK MODEL AS AN OBJECTIVES OF CONTROL

Osmonova Rima Chynarbekovna, researcher, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek c., Chui av. 66a, e-mail: r.osmonova@mail.ru, ORCID ID 0000- 0002- 7305- 1146

Eralieva Aida Sharshenbekovna, aspirant, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Chui av. 66a, e-mail: loran84@mail.ru.

Temirkulova Nargis Temirkulovna, senior teacher , KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek c., Aitmatov street 66, e-mail: temirkulova.n@gmail.com.

Abstract. The article considers asymmetric distribution electric network in the conditions of functioning of the automated system of control and metering of the energy resources (ASCME - automated system of control and metering of energy resources). Formulated the problem of identification of its mathematical model in the complex form which is reduced to definition of real and imaginary parts (parameters) of currents and voltages on loadings of a three-phase network. we propose a method of its solution based on the mathematical ratios describing functional communications between state variables of model and use of algorithms of parameter optimization. Received the systems of the algebraic equations of rather required parameters and the differential equations of their adaptation describing process of the movement of parameters to their required values. The realization of identification procedure of model of a distribution network is enabled with direct use of the basic data obtained on communication channels from abonent's counters of the electric power. The method can be used to solve problems of diagnosing the states of the trunk line and optimize the operating modes of the distribution network The method can be used to solve problems of diagnosing the states of the trunk line and optimize the operating modes of the distribution network in the as part of ASCME.

Keywords: distribution network, mathematical model, method of identification of model.

В настоящее время в целях комплексной автоматизации распределительных электрических сетей (РЭС) напряжением 0,4 кВ активно внедряются цифровые технологии в виде автоматизированных систем контроля и учёта электроэнергии (АСКУЭ) [1]. В структуру этих систем входят: концентраторы данных (КД) и группа счётчиков электроэнергии, установленных у потребителей (абонентов) электроэнергии. КД обеспечивают сбор данных с абонентских счетчиков, их хранение и обработку в целях выполнения соответствующих функций АСКУЭ. Обмен данными между функциональными элементами автоматизированной системы осуществляют телекоммуникационные модули на основе различных технологий передачи данных (PLC, GSM и пр.). Известно, что основной задачей АСКУЭ является коммерческий учёт электроэнергии. Вместе с тем повышение эффективности системы требует решения ряда диагностических [10,8,14] и оптимизационных задач [9,5,3] в составе АСКУЭ, к числу которых, в частности, относятся задачи идентификации несанкционированных отборов (хищения) электроэнергии [23,15,16] и оптимизации режимов работы РЭС [17, 18]. Для этой цели имеется необходимость решения задачи идентификации

математической модели распределительной сети в условиях несимметрии токов и напряжений [19,4,22] в режиме реального времени. Применение существующих методов [6,13,11,12,1] для этой цели представляет определённые трудности. В работе предлагается один из возможных методов построения модели трехфазной РЭС в комплексной форме.

Постановка задачи. В качестве объекта рассматривается четырехпроводная РЭС, расчетная схема которой показана на рис.1.

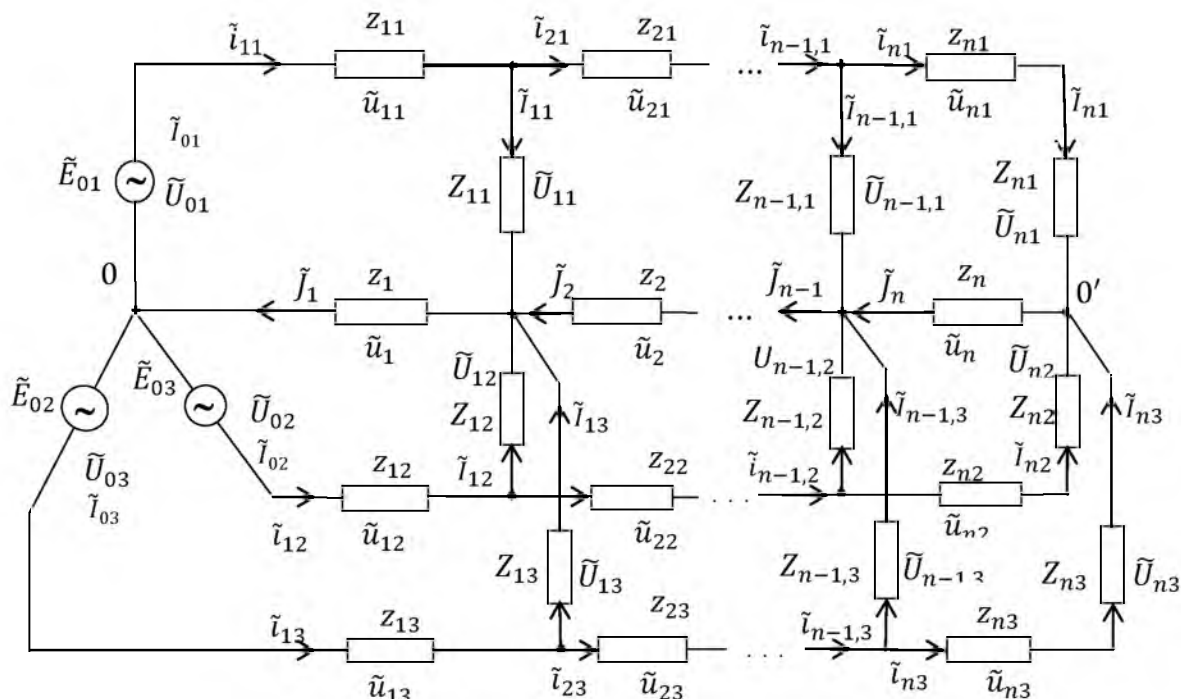


Рис.1. Расчетная схема трехфазной сети

Обозначения имеют следующий смысл: k, v - индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С ($k = \overline{1,3}$) и электрических контуров сети ($v = \overline{1,n}$); $\tilde{E}_{0k}$ - ЭДС k -ой фазы; $\tilde{U}_{0k}$, $\tilde{I}_{0k} = \tilde{i}_{1k}$ - мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз; $\tilde{i}_{vk}$, $\tilde{U}_{vk}$, Z_{vk} - синусоидальные мгновенные ток, напряжение и сопротивление нагрузки (электроприемника) с координатой (v, k) ; $\tilde{i}_{vk}$, Z_{vk} - мгновенный ток и комплексное сопротивление v -го межабонентского участка (МАУ) k -ой фазы; $\tilde{u}_{vk}$, $\tilde{u}_v$ - напряжения соответственно на v -ом МАУ k -й фазы и нейтрального провода; $\tilde{J}_v, Z_v$ - мгновенный ток и комплексное сопротивление v -го участка нейтрального провода.

Далее будем считать, что распределительная сеть функционирует в штатном режиме и в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети.

В дискретные моменты времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ с шагом дискретизации $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$ ($\xi = 1, 2, \dots$) осуществляется опрос головного и абонентских счетчиков электроэнергии. При этом в базу данных АСКУЭ по каналам связи поступают следующие данные:

- действующие значения токов I_{vk} и напряжений U_{vk} на нагрузках сети;
- коэффициенты мощности $c_{vk} = \cos \varphi_{vk}$, определяемые фазовыми сдвигами φ_{vk} между соответствующими напряжениями $\tilde{U}_{vk}$ и токами $\tilde{i}_{vk}$ ($k = \overline{1,3}$, $v = \overline{0,n}$);
- активные и реактивные мощности, потребляемые нагрузками сети.

Как известно, мгновенные синусоидальные токи $\tilde{i}_{vk}$ и напряжения $\tilde{U}_{vk}$ на нагрузках сети в установившемся режиме можно представить в комплексной форме [16, 6]:

$$\tilde{i}_{vk} = I_{vk}^B + jI_{vk}^M = I_{vk} e^{j\tilde{\alpha}_{vk}}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_{vk} = U_{vk}^B + jU_{vk}^M = U_{vk}e^{j\tilde{\psi}_{vk}}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где символы «В» и «М» обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных; $I_{vk}, U_{vk}, \tilde{\alpha}_{vk}, \tilde{\psi}_{vk}$ – модули и фазовые сдвиги этих переменных. При этом

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_{vk} &= \beta_k + \alpha_{vk}, & \tilde{\psi}_{vk} &= \beta_k + \psi_{vk}, \\ \varphi_{vk} &= \psi_{vk} - \alpha_{vk}, & \beta_k &= 2(k-1)\pi/3, \end{aligned}$$

где α_{vk}, ψ_{vk} – приращения фазовых сдвигов относительно их номинальных значений β_k , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети. В случае, когда построена модель нагрузок в форме (1) и (2), а также известны сопротивления участков сети Z_{vk} , Z_v межабонентские комплексные токи i_{vk}, j_v и напряжения $\dot{u}_{vk}, \dot{u}_v$ можно определить на основе известных законов электротехники (рис.1):

$$i_{vk} = \sum_{l=v}^n i_{lk} = \sum_{l=v}^n (I_{lk}^B + jI_{lk}^M) = I_{vk}e^{j(\beta_k^* + \tilde{\alpha}_{vk})}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{u}_{vk} &= i_{vk}Z_{vk}, & v &= \overline{1, n}, & k &= \overline{1, 3}. \\ j_v &= i_{v1} + i_{v2} + i_{v3}, & \dot{u}_v &= j_vZ_v, & v &= \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношения (1) – (4) представляют собой математическую модель трехфазной РЭС. Анализ этих соотношений показывает, что для построения модели несимметричной распределительной сети необходимо идентифицировать вещественные I_{lk}^B, U_{vk}^B и мнимые I_{lk}^M, U_{vk}^M части комплексных токов и напряжений на нагрузках сети. Задача заключается в идентификации неизвестных величин (параметров) $U_{vk}^B, U_{vk}^M, I_{vk}^B$ и I_{vk}^M .

Метод решения задачи. Отметим, что с помощью счётчиков электроэнергии, входящих в состав АСКУЭ, измеряются лишь действующие значения токов I_{vk} и напряжений U_{vk} , а вещественные и мнимые части комплексных переменных $\dot{I}_{vk}$ и $\dot{U}_{vk}$ остаются неизвестными. Для их определения комплексные мощности $\dot{P}_{vk}$ нагрузок сети представим в следующем виде [6]:

$$\dot{P}_{vk} = \dot{U}_{vk} \dot{I}_{vk}^* = p_{vk}^B + jp_{vk}^M, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где $\dot{I}_{vk}^*$ – сопряжённое значение комплексного тока $\dot{I}_{vk}$; p_{vk}^B, p_{vk}^M – активные и реактивные мощности, потребляемые соответствующими электроприемниками. При этом значения величин p_{vk}^B и p_{vk}^M можно вычислить по данным счетчиков электроэнергии:

$$\begin{aligned} p_{vk}^B &= U_{vk} I_{vk} \cos \varphi_{vk}, \\ p_{vk}^M &= U_{vk} I_{vk} \sin \varphi_{vk}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}. \end{aligned}$$

Теперь подставляя выражения (1) и (2) для комплексных токов $\dot{I}_{vk}$ и напряжений $\dot{U}_{vk}$ в формулы (5) и после несложных преобразований получаем следующие равенства:

$$\begin{aligned} U_{vk}^B I_{vk}^B + U_{vk}^M I_{vk}^M &= p_{vk}^B, \\ U_{vk}^M I_{vk}^B - U_{vk}^B I_{vk}^M &= p_{vk}^M, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (6)$$

Как известно [6], действующие значения (модули) токов и напряжений удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} (I_{vk}^B)^2 + (I_{vk}^M)^2 &= I_{vk}^2, \\ (U_{vk}^B)^2 + (U_{vk}^M)^2 &= U_{vk}^2, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Соотношения (6) и (7) представляют собой системы алгебраических уравнений относительно искомых параметров ($U_{vk}^B, U_{vk}^M, I_{vk}^B$ и I_{vk}^M), для решения которых можно использовать численные методы [2, 21]. Для удобства дальнейших выкладок для фиксированных v и k введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} x_1 &= U_{vk}^B, & x_2 &= U_{vk}^M, & x_3 &= I_{vk}^B, & x_4 &= I_{vk}^M, \\ c_1 &= p_{vk}^B, & c_2 &= p_{vk}^M. \end{aligned}$$

Теперь образуем вектор $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]$, составленный из новых переменных. С учетом введенных обозначений системы уравнений (6) и (7) для фиксированных значений v и k запишутся в виде

$$\begin{cases} x_1x_3 + x_2x_4 = c_1, \\ x_2x_3 - x_1x_4 = c_2, \\ x_1^2 + x_2^2 = c_3, \\ x_3^2 + x_4^2 = c_4. \end{cases} \quad (8)$$

Для решения системы уравнений (8) будем использовать алгоритм, предложенный в [20, 21]. В соответствии с этим алгоритмом на основе соотношений (8) вначале определяются ошибки идентификации $E_1(x)$, $E_2(x)$, $E_3(x)$, $E_4(x)$:

$$\begin{aligned} E_1(x) &= x_1x_3 + x_2x_4 - c_1, \\ E_2(x) &= x_2x_3 - x_1x_4 - c_2, \\ E_3(x) &= x_1^2 + x_2^2 - c_3, \\ E_4(x) &= x_3^2 + x_4^2 - c_4. \end{aligned} \quad (9)$$

Далее для решения системы уравнений (8) в рассмотрение вводится квадратическая критериальная (штрафная) функция:

$$E(x) = E_1^2(x) + E_2^2(x) + E_3^2(x) + E_4^2(x). \quad (10)$$

В результате задача определения вектора $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]$, обеспечивающего решение системы уравнений (8), сводится к решению задачи минимизации:

$$\min_{x \in R^4} E(x) = E(x^*), \quad (11)$$

где R^4 – четырехмерное арифметическое пространство; $x^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*]$ – вектор-параметр, обеспечивающий минимум критериальной функции $E(x)$. Для того, чтобы найденный таким образом вектор-параметр x^* принять в качестве решения системы уравнений (8) достаточно выполнения следующего условия:

$$E(x^*) < \delta, \quad (12)$$

где δ – положительное число, близкое к нулю.

Для решения экстремальной задачи (12) используется следующее критериальное условие [23]:

$$\int_0^t E \frac{dE}{dt} dt < 0, \quad (13)$$

выполнение которого обеспечивает минимизацию штрафной функции $E(x)$ во времени t . Поиск искомых параметров на основе соотношений (13) осуществляется посредством уравнений адаптации компонентов вектора $x^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*]$ во времени. Для получения этих уравнений вначале определяется производная штрафной функции:

$$\frac{dE}{dt} = 2E_1 \frac{dE_1}{dt} + 2E_2 \frac{dE_2}{dt} + 2E_3 \frac{dE_3}{dt} + 2E_4 \frac{dE_4}{dt}. \quad (14)$$

При этом производные dE_1/dt , dE_2/dt , dE_3/dt и dE_4/dt можно вычислить на основе выражений (9):

$$\begin{cases} \frac{dE_1}{dt} = x_3 \frac{dx_1}{dt} + x_1 \frac{dx_3}{dt} + x_4 \frac{dx_2}{dt} + x_2 \frac{dx_4}{dt}, \\ \frac{dE_2}{dt} = x_3 \frac{dx_2}{dt} + x_2 \frac{dx_3}{dt} - x_4 \frac{dx_1}{dt} - x_1 \frac{dx_4}{dt}, \\ \frac{dE_3}{dt} = 2x_1 \frac{dx_1}{dt} + 2x_2 \frac{dx_2}{dt}, \\ \frac{dE_4}{dt} = 2x_3 \frac{dx_3}{dt} + 2x_4 \frac{dx_4}{dt}. \end{cases}$$

Подставляя полученные производные в выражение для dE/dt , определяемое формулой (14), получаем

$$\frac{dE}{dt} = 2 \left[(E_1x_3 - E_2x_4 + E_3x_1) \frac{dx_1}{dt} + (E_1x_4 + E_2x_3 + 2E_3x_2) \frac{dx_2}{dt} + \right.$$

$$+(E_1x_1 + E_2x_2 + 2E_4x_3) \frac{dx_3}{dt} + (E_1x_2 - E_2x_1 + 2E_4x_4) \frac{dx_4}{dt} \Big].$$

Теперь подставляя выражение для dE/dt в соотношение (13) на основе методики, изложенной в [20, 21], получаем следующие уравнения адаптации компонентов искомого вектор-параметра x :

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \gamma_1 f_1(x), \\ \frac{dx_2}{dt} &= \gamma_2 f_2(x), \\ \frac{dx_3}{dt} &= \gamma_3 f_3(x), \\ \frac{dx_4}{dt} &= \gamma_4 f_4(x), \end{aligned} \quad (15)$$

$$x^0 = [x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_4^0],$$

где x^0 – значение вектор – параметра в начальный момент времени $t_0 = 0$; $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$, $f_4(x)$, – функции, определяемые по формулам

$$\begin{aligned} f_1(x) &= E_1x_3 - E_2x_4 + E_3x_1, \\ f_2(x) &= E_1x_4 + E_2x_3 + 2E_3x_2, \\ f_3(x) &= E_1x_1 + E_2x_2 + 2E_4x_3, \\ f_4(x) &= E_1x_2 - E_2x_1 + 2E_4x_4; \end{aligned}$$

γ_ξ – вещественные отрицательные числа, т.е. $\gamma_\xi < 0$, $\xi = \overline{1,4}$.

Далее определяем установившиеся решения системы дифференциальных уравнений (15):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_\xi = x_\xi^*, \quad \xi = \overline{1,4}.$$

При выполнении условия (12) компоненты найденного вектора $x^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*]$ являются оценками искомым величин, т.е.

$$U_{vk}^B = x_1^*, \quad U_{vk}^M = x_2^*, \quad I_{vk}^B = x_3^*, \quad I_{vk}^M = x_4^*.$$

Таким образом, на основе формирования систем уравнений (8) и решения уравнения адаптации (15) искомым параметров можно идентифицировать модель трехфазной распределительной сети в комплексной форме. Далее ее можно использовать для решения диагностических и оптимизационных задач в составе АСКУЭ.

Выводы. Предложен метод построения математической модели распределительной электрической сети напряжением 0,4 кВ по данным счетчиков электроэнергии, входящих в состав АСКУЭ. Считается, что трехфазная сеть функционирует в условиях несимметрии токов и напряжений. Переменные модели (токи, напряжения, активные, реактивные мощности) представляются в комплексной форме. Задача идентификации модели сводится к определению вещественных и мнимых частей (параметров) переменных модели, определяющих электрическое состояние сети. На основе рассмотрения соотношений, описывающих функциональные связи между переменными сети, получены системы алгебраических уравнений относительно искомым параметров. Для их решения использован численный алгоритм, основу которого составляют уравнения адаптации параметров сети, установившиеся решения которых и определяют искомым величины. Полученные результаты можно использовать для решения задач диагностики состояний магистральной линии и оптимизации режимов работы распределительной сети в составе АСКУЭ.

Литература

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

2. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1975. –632с.
3. Войтов О.Н., Мантров В.А., Семенова Л.В. Анализ несимметричных режимов электроэнергетических систем и управление ими // Электричество. 1999. № 10. С.2-18.
4. Гринкруг М.С., Митин И.А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 3-4. С. 80-84.
5. Дулепов Д.Е., Кондраненкова Т.Е. Снижение потерь электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях 0,38 КВ // Дальневосточный аграрный вестник. 2017. № 2 (42). С. 139-145.
6. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1, –СПб.: Питер, 2009. –512 с.
7. Еремина М.А. Развитие автоматических систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) // Молодой ученый. 2015. №3. С. 135-138.
8. Ершов А.М., Филатов О.В., Млоток А.В. и др. Система защиты электрической сети напряжением 380В от обрывов проводов воздушной линии // Электрические станции. 2016, №5. С.28-33.
9. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем — М.: Энергоатомиздат, 1988. –288 с.
10. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Диагностика электрических цепей и систем. – Владивосток: Дальнаука, 2013. 242с.
11. Kavalero V.V. A method for development of software packages for mathematical simulation of electric power systems / Kavalero V.V., Petrochenkov A.B., Odin K.A., Tarasov V.A. // Russian Electrical Engineering. -2015. Т. 86. -№ 6. -pp. 331-338.
12. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А., Киташин П.А., Терехов К.И. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ // Fractal simulation. 2013. №1. С.5-13.
13. Кобелев А.В., Кочергин С.В., Джапарова Д.А Моделирование несимметричных сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 Кв. 2017. № 2 (26). С. 47-53.
14. Оморев Т.Т., Такырбашев Б.К. Идентификация состояния распределительной электрической сети всистемах автоматизации учета и управления энергопотреблением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 10. С. 651-656.
15. 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, №3. pp. 606-615.
16. Оморев Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч., Койбагаров Т.Ж. Идентификация утечек тока в распределительных сетях по данным АСКУЭ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 2. С. 48-54.
17. Оморев Т.Т., Такырбашев Б.К., Койбагаров Т.Д., Осмонова Р.Ч. Метод идентификации несанкционированного потребления электроэнергии в распредсети по данным АСКУЭ // Электрические станции. 2019. № 2 (1051). С. 37-41.
18. Оморев Т.Т. Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 3. С. 194-200.
19. Оморев Т.Т. Оценка влияния несимметрии токов и напряжений на потери электроэнергии в распределительной сети с использованием АСКУЭ / Оморев Т.Т. // Электричество. -2017. -№ 9. -С. 17-23.
20. Оморев Т.Т., Кожекова Г.А. Синтез законов управления взаимосвязанными электроприводами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №10. С.10-13.

21. Оморев Т.Т., Кожекова Г.А. Синтез системы управления синхронным генератором // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. №1. С. 5-9.
22. Пономаренко О.И., Холиддинов И.Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения // Энергетик. 2015. №12. С.6-8.
23. Сапронов А.А., Кужеков С.Л., Тынянский В.Г. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ // Изв.вузов. Электромеханика. 2004. №1. С.55-58.