

*Осмонова Р.Ч., Такырбашев Б.К., Дуйшенкулова Ы.С., Оморов Т.Т.*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМАЛАРЫНДАГЫ  
ЭНЕРГИЯНЫ КЕРЕКТӨӨНҮН БӨЛҮШТҮРҮҮЧҮ ТАРМАК  
ПРОЦЕССТЕРИНИН ПАРАМЕТРЛЕРИН ИДЕНТИФИКАЦИЯЛОО**

*Осмонова Р.Ч., Такырбашев Б.К., Дуйшенкулова Ы.С., Оморов Т.Т.*

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В СИСТЕМАХ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ**

*R.Ch. Osmonova, B.K. Takyrbashev, Y.S. Duishenkulova, T.T. Omorov*

**IDENTIFICATION OF PARAMETERS DISTRIBUTION NETWORKS IN AUTOMATION  
SYSTEMS PROCESSES ENERGY CONSUMPTION**

УДК: 681.5

*Үч фазалуу 0,4кВ чыналуудагы бөлүштүрүүчү электр тармагы каралат. Анын абоненттер аралыгындагы электр линиясынын сырткы факторолого байланыштуу (температура, нымдуулук ж.б.) өзгөрүлүп турган активдүү каршылык жана индуктивдүүлүк сыяктуу параметрлерин идентификациялоо маселеси коюлган. Энергия керектөө процесстерин реалдуу режимде мониторингдоо жана электр тармагынын абалын диагностикалоо подсистемаларын тургузууга багытталган жогоруда көрсөтүлгөн маселени чечүүчү алгоритм сунушталат.*

**Негизги сөздөр:** үч фазалуу тармак, тармактын параметрлерин идентификациялоо, активдүү каршылык, индуктивдүүлүк, штрафдык функциялар, идентификациялоо алгоритми.

*Рассматривается трехфазная распределительная электрическая сеть (РЭС) напряжением 0,4кВ. Формулируется задача идентификации ее параметров, таких как активные сопротивления и индуктивности межабонентских участков сети, которые время от времени изменяются в зависимости от внешних факторов (температуры, влажности и др.). Предлагается алгоритм решения сформулированной задачи, ориентированный на создание подсистемы мониторинга процессов энергопотребления и диагностики состояния распределительной электрической сети в режиме реального времени.*

**Ключевые слова:** трехфазная сеть, идентификация параметров сети, активные сопротивления, индуктивности, штрафные функции, алгоритм идентификации.

*The three-phase distributive electric network (DEN) of 0,4 kV is considered. The problem of identification of her parameters, such as active resistance and inductance the between subscriber of sites of a network which change depending on external factors from time to time is formulated (temperatures, humidity, etc.). The algorithm of the solution of the formulated task focused on creation of a subsystem of monitoring of processes of energy consumption and diagnostics of a condition of distributive electric network in real time is offered.*

**Key words:** three-phase network, identification of parameters of a network, active resistance, inductance, penal functions, algorithm of identification.

**Введение.** В современных условиях, когда в практике автоматизации процессов энергопотребления широко внедряются автоматизированные систе-

мы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [5] на уровне распределительных электрических сетей (РЭС). Они представляют собой информационно-измерительные системы, включающие концентраторы данных (КД), комплекс измерительных приборов, содержащий счетчиков электроэнергии (Сч) и телекоммуникационные модули (ТКМ). Концентраторы данных строятся на основе микропроцессорной техники, которые располагаются в трансформаторных подстанциях РЭС, и выполняют функции сбора данных со счетчиков, их хранение и обработку с целью решения соответствующих функциональных задач на уровне РЭС (оценка потерь электроэнергии, расчет энергобалансов РЭС, контроль технического состояния Сч, управление нагрузкой абонентов и др.), а также организации обмена технологической информацией и служебными (командными) сигналами между подсистемами АСКУЭ с помощью ТКМ.

С внедрением АСКУЭ все более актуальной становится проблема оперативного мониторинга процессов энергопотребления и диагностики состояния РЭС в режиме реального времени. Для этой цели имеется необходимость создания в составе АСКУЭ соответствующей подсистемы, основной функцией которой и является решение этой проблемы. В связи с этим периодически возникает задача оценки переменных состояния и параметров РЭС, которые в процессе функционирования РЭС не измеряются и не контролируются. К ним, в частности, относятся активные и реактивные сопротивления межабонентских участков (МАУ) сети, а также протекающие через них токи. Они из-за воздействий внешних факторов (утечки токов, температуры, влажности и др.) имеют случайный характер. Применение существующих в настоящее время подходов и методов [4, 8] в указанных условиях для решения указанной задачи в режиме реального времени представляет значительные трудности. В статье предлагается алгоритм оценки активных сопротивлений и индуктивностей межабонентских участков РЭС, ориентированный для применения в составе АСКУЭ.

**Постановка задачи.** Для удобства изложения без потери общности рассмотрим одну из фаз (например, фазу А) трехфазной распределительной

сети с напряжением 0,4 кВ, схема замещения которой представлена на рисунке 1.

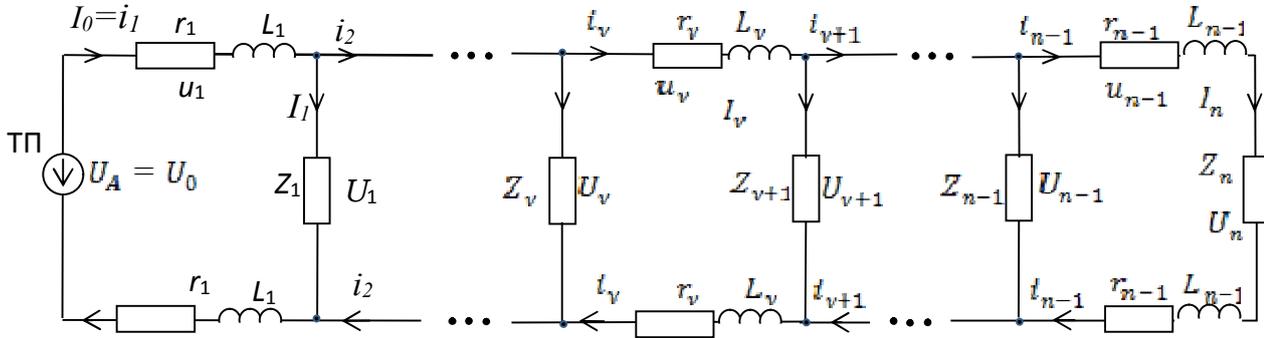


Рис. 1. Схема замещения части трехфазной сети (фазы А).

Она включает трансформаторную подстанцию (ТП), группу из n нагрузок потребителей (абонентов) и межабонентские участки (силовые линии) передачи электроэнергии.

Обозначения имеют следующий смысл:

$Z_v$  – нагрузка  $v$ -го абонента ( $v = \overline{1, n}$ );

$r_v, L_v$  – активное сопротивление и индуктивность соответственно  $v$ -го межабонентского участка сети;

$i_v, U_v$  – мгновенный ток и напряжение на нагрузке потребителя  $Z_v$ ;

$i_v$  – мгновенный фазный ток в  $v$ -том межабонентском участке сети;

$u_v^r$  – мгновенное напряжение на активном сопротивлении  $r_v$  МАУ;

$u_v^L$  – мгновенное напряжение на  $L_v$  МАУ.

Предположим, что выполняются следующие условия:

- 1) Электрическая сеть относится к классу линейных систем;
- 2) РЭС функционирует в нормальном режиме, т.е. в ней отсутствуют возмущающие факторы;
- 3) Действующие значения напряжений  $U_v$  и токов  $I_v$ , а также активные и реактивные мощности измеряются с заданной точностью счетчиками электроэнергии (Сч), установленными у абонентов сети, которые передаются регулярно по ТКМ концентратору (КД).

В каждый момент времени  $t$  суммарный мгновенный ток  $I_a(t)$ , потребляемый абонентами сети, определяется выражением:

$$I_a(t) = \sum_{v=1}^n I_v(t). \quad (1)$$

Нормальный режим работы сети характеризуется тем, что для всех моментов времени  $t \in [t_0, t_1]$  с определенной точностью выполняется балансовое соотношение:

$$I_0(t) = I_a(t), t \in [t_0, t_1], \quad (2)$$

где  $I_0(t)$  – мгновенный ток в соответствующем фазном проводе на входе сети;  $t_0, t_1$  – начальный и конечный моменты наблюдения.

Концентратор данных регулярно вычисляет величины токов  $I_0(t)$ ,  $I_a(t)$  и осуществляет непрерывный контроль выполнения условия (2). Далее рассматривается случай, когда в интервале  $[t_0, t_1]$  условие (2) выполняется, т.е. в сети отсутствуют возмущающие факторы. При этом через межабонентские участки сети в каждый момент времени  $t \in [t_0, t_1]$  будут протекать токи  $i_v(t)$  ( $v = \overline{1, n}$ ).

Задача идентификации заключается в определении межабонентских активных сопротивлений  $r_v$  и индуктивностей  $L_v$  (реактивных сопротивлений) на основе данных по измерениям действующих токов  $I_v$  и напряжений  $U_v$ , а также потребляемых мощностей абонентов, определяемых счетчиками электроэнергии (Сч), установленными у абонентов сети.

**Метод решения задачи.** Рассмотрим  $v$ -ый межабонентский участок сети (рис.1). Для этого электрического контура запишем закон Ома:

$$2u_v^r(t) + 2u_v^L(t) + U_{v+1}(t) - U_v(t) = 0, \quad v = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где

$$u_v^r(t) = r_v i_v(t), \quad u_v^L(t) = L_v \frac{di_v(t)}{dt}, \quad (4)$$

С учетом (4) соотношения (3) имеют вид:

$$2L_v \frac{di_v(t)}{dt} = -2\eta_v i_v(t) + U_v(t) - U_{v+1}(t),$$

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

Уравнения (5) представим в виде:

$$\frac{di_v(t)}{dt} = -\frac{\eta_v}{L_v} i_v(t) + \frac{1}{2L_v} [U_v(t) - U_{v+1}(t)],$$

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

Рассмотрим дискретные моменты времени  $t_k = k\Delta t$  и соответствующие значения токов и напряжений:

$$i_v(k) = i_v(k\Delta t), U_v(k) = U_v(k\Delta t), \quad k = \overline{1, N}. \quad (7)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени;  $N$  – количество точек дискретизации.

Производные  $di_v(t)/dt$  приближенно можно заменить соотношениями:

$$\frac{di_v(t)}{dt} \approx \frac{i_v(k) - i_v(k-1)}{\Delta t},$$

При этом дифференциальные уравнения (6) аппроксимируются следующими разностными уравнениями:

$$i_v(k) = \alpha_v i_v(k-1) + \eta_v [U_v(k-1) - U_{v+1}(k-1)],$$

$$v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (8)$$

$$\alpha_v = \frac{2L_v - \eta_v \Delta t}{L_v}, \quad \eta_v = \frac{\Delta t}{2L_v},$$

Введем вектор – параметр  $p_v = [\alpha_v, \eta_v]$ .

Отметим, что межабонентские мгновенные токи  $i_v(t)$  и напряжения  $U_v(t)$  определяются на основе данных, полученных со счетчиков электроэнергии (Сч), установленных у абонентов. В частности, токи  $i_v(t)$  в нормальном режиме РЭС вычисляются на основе закона Кирхгофа [3]:

$$i_v(t) = \sum_{i=v}^n I_i(t), \quad v = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Таким образом, в нормальном режиме токи  $i_v(k)$  и напряжения  $U_v(k)$ , входящие в разностные уравнения (8), являются известными величинами, а параметры  $\alpha_v$  и  $\eta_v$  – неизвестными. Произвольный выбор значений векторов  $p_v = [\alpha_v, \eta_v]$ , как правило, не удовлетворяет соотношениям (8). При этом для  $v$ -го контура ошибки идентификации в дискретные моменты времени имеют вид:

$$e_v(k) = i_v(k) - \alpha_v i_v(k-1) - \eta_v [U_v(k-1) - U_{v+1}(k-1)],$$

$$k = \overline{1, N}. \quad (11)$$

Для оценки качества идентификации векторов  $p_v$  введем штрафные функции в следующем виде:

$$E_v(p_v) = \sum_{k=1}^N e_v^2(k), \quad v = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Тогда исходную задачу можно свести к задаче определения векторов  $p_v^* = [\alpha_v^*, \eta_v^*]$ , обеспечивающих минимумы штрафных функций (12), т.е. к решению экстремальных задач:

$$\min_{p_v \in R^2} E_v(p_v) = E_v(p_v^*), \quad v = \overline{1, n}. \quad (13)$$

где  $R^2$  – двумерное арифметическое пространство.

Таким образом, наличие соотношений (9) дает возможность исходную задачу идентификации решать в два этапа. На первом этапе ищутся параметры модели (8)  $v$ -го контура, т.е. векторы  $p_v^* = [\alpha_v^*, \eta_v^*]$ , а на втором - на основе соотношений (9) определяются искомые параметры  $\eta_v^*, L_v^*$  ( $v = \overline{1, n}$ ) распределительной сети.

Для оценки ошибок идентификации  $e_v(k)$  необходимо вычислить мгновенные токи  $i_v(k)$  и напряжения  $U_v(k)$ . Для этой цели вначале необходимо представить токи  $I_v(t)$  и напряжения  $U_v(t)$  в комплексной форме:

$$I_v = I_v^e + jI_v^m = I_v e^{j\alpha_v},$$

$$U_v = U_v^e + jU_v^m = U_v e^{j\psi_v}, \quad v = \overline{1, n},$$

где  $e, m$  – символы, обозначающие соответственно вещественные и мнимые части комплексных токов и напряжений;  $j$  – мнимое число; соответствующие модули и аргументы (фазовые сдвиги) комплексных переменных определяются последующим формулам:

$$I_v = \sqrt{(I_v^e)^2 + (I_v^m)^2}, \quad U_v = \sqrt{(U_v^e)^2 + (U_v^m)^2}, \quad (14)$$

$$\alpha_v = \arctg(I_v^m/I_v^e), \quad \psi_v = \arctg(U_v^m/U_v^e), \quad (15)$$

Необходимо отметить, что счетчиками электроэнергии, установленными у абонентов сети, измеряются лишь модули  $I_v$  и  $U_v$  комплексных величин  $I_v$  и  $U_v$ , а их вещественные и мнимые части, а также аргументы являются неизвестными величинами. Для их определения будем использовать данные по измерениям потребляемых мощностей на нагрузках абонентов. Так, для комплексной мощности  $\dot{P}_v$  на нагрузке  $Z_v$  имеем:

$$\dot{P}_v = U_v I_v^* = p_v^e + jp_v^m = \tilde{p}_v e^{j\varphi_v},$$

где

$$p_v^e = U_v^e I_v^e + U_v^m I_v^m = U_v I_v \cos\varphi_v,$$

$$p_v^m = U_v^m I_v^e - U_v^e I_v^m = U_v I_v \sin\varphi_v, \quad (16)$$

$$\tilde{p}_v = \sqrt{(p_v^e)^2 + (p_v^m)^2},$$

$$\varphi_v = \arctg(p_v^x/p_v^y).$$

Тогда мгновенные токи и напряжения

$$I_v(t) = \sqrt{2}I_v \sin(\omega t + \alpha_v), \quad (17)$$

$$U_v(t) = \sqrt{2}U_v \sin(\omega t + \psi_v), \quad v = \overline{1, n}, \quad (18)$$

где  $\omega = 2\pi f$  ( $f=50$  Гц).

Поскольку величины  $p_v^x, p_v^y, I_v$  и  $U_v$  измеряются счетчиками электроэнергии (Сч), искомые переменные можно определить на основе формул (14) и (16) путем решения следующей системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} U_v^x I_v^x + U_v^y I_v^y = p_v^x, \\ U_v^x I_v^y - U_v^y I_v^x = p_v^y, \\ (I_v^x)^2 + (I_v^y)^2 = I_v^2, \\ (U_v^x)^2 + (U_v^y)^2 = U_v^2, \end{cases} \quad (19)$$

Используя один из известных численных методов [1]. Далее на основе решения системы (19) неизвестные фазовые сдвиги  $\alpha_v$  и  $\psi_v$  определяются по формулам (15).

Для решения задачи (13) будем использовать алгоритм, предложенный в [6, 7]. Основная его идея состоит в следующем. На основе ошибок идентификации (11) формируются штрафные функции  $E_v(p_v)$  для каждого электрического контура сети по формулам (12).

В процессе идентификации, т.е. поиска экстремума штрафной функции  $E_v(p_v)$  вектор - параметры  $p_v$  изменяются во времени  $t$  ( $p_v = p_v(t)$ ), следовательно, варьируются и значения функций  $E_v$ , т.е.  $E_n = E_n(t) = E_n[p_n(t)]$ .

Для того, чтобы штрафные функции  $E_n(t)$  убывали с течением времени достаточно выполнения соотношений [6]:

$$\int_{t_0}^t E_n(t) \dot{E}_n(t) dt < 0, \quad v = \overline{1, n}. \quad (20)$$

В результате проблема идентификации сводится к задаче поддержания соотношения (20). В [6] получены уравнения динамики компонентов векторов  $p_v = [\alpha_v, \eta_v]$ , обеспечивающие выполнение критерильных соотношений (20):

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_v(t) &= \xi_v s_v(t) E_v(t), \\ \dot{\eta}_v(t) &= \gamma_v \beta_v(t) E_v(t), \quad v = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $\gamma_v, \xi_v$  – отрицательные числа;  $\beta_v(t), s_v(t)$  – функции, определяемые формулами:

$$\beta_v(t) = -2 \sum_{k=1}^N e_k(t) i_v(k-1),$$

$$s_v(t) = -2 \sum_{k=1}^N e_k(t) [U_v(k-1) - U_{v+1}(k-1)].$$

При этом установившиеся решения  $\alpha_v^*, \eta_v^*$  ( $v = \overline{1, n}$ ) системы уравнений (21):

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \alpha_v(t) &= \alpha_v^*, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \eta_v(t) &= \eta_v^*, \quad v = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (22)$$

являются оценками искомых вектор – параметров  $p_v^*$ , т.е.  $p_v^* = [\alpha_v^*, \eta_v^*]$ .

Алгоритм идентификации параметров сети включает выполнение следующих основных этапов:

1. Измерение компонентов векторов  $I = [I_0, I_1, \dots, I_n]$  и  $U = [U_0, U_1, \dots, U_n]$ .
2. Определение параметров комплексных токов  $I_v$  и напряжений  $U_v$  ( $v = \overline{1, n}$ ) по данным измерений векторов  $I$  и  $U$  на основе решения системы уравнений (19).
3. Определение мгновенных токов и напряжений на нагрузках потребителей по формулам (17) и (18).
4. Определение тока  $I_a(t)$  по формуле (1).
5. Проверка условия (2). Если оно выполняется, то перейти к п. 6, иначе перейти к режиму ожидания с последующим переходом к п. 1.
6. Формирование временных последовательностей (7).
7. Формирование ошибок идентификации, определяемых выражением (11).
8. Определение штрафных функций по формуле (20).
9. Формирование уравнений (21) настройки компонентов векторов  $p_v = [\alpha_v, \eta_v], v = \overline{1, n}$ .
10. Решение системы уравнений (21) и определение векторов  $p_v^* = [\alpha_v^*, \eta_v^*], v = \overline{1, n}$ .
11. На основе соотношений (9) определение искомых параметров  $r_v^*$  и  $L_v^*$  ( $v = \overline{1, n}$ ) межабонентских участков сети.

**Выводы.** Предложен алгоритм идентификации параметров межабонентских участков распределительной сети напряжением 0,4 кВ. Его основу составляет новый критерий идентификации динамических систем. Полученные результаты ориентированы на создание подсистемы мониторинга процессов энергопотребления и диагностики состояния сети в составе АСКУЭ в режиме реального времени.

**Литература:**

1. Бахвалов Н.С. Численные методы. - М.: Наука, 1975. - 632 с.
2. Гамм А.З., Герасимов Т.Н., Голуб И.И. Оценка состояния в электроэнергетике. - М.: Наука, 1983. - С. 302.
3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. - СПб.: Питер. - 2009.

4. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качества электроэнергии. - М.: ЭНАС, 2009.
5. Ожегов А.Н. Системы АСКУЭ. - Киров: Изд-во ВятГУ, 2006.
6. Оморов Т.Т., Курманалиева Р.Н., Осмонова Р.Ч. К проблеме идентификации модели управляемой системы по экспериментальным данным // URL: Universum: технические науки. - М.: 2015, №6.
7. Оморов Т.Т., Курманалиева Р.Н., Осмонова Р.Ч. Параметрическая идентификация линейной модели управляемой системы в форме «вход – выход» // URL: Автоматизация и управление в технических системах. - Красноярск, 2016. - №1.
8. Паздерин А.В. Проблема моделирования распределения потоков электрической энергии в сети // Электричество, №10. - С.2-8.

**Рецензент: д.т.н., профессор Джолдошев Б.О.**

---