

## ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

*Ученый секретарь Мерзюкова И.К.*



*Оморов Туратбек Турсунбекович*  
д-р техн. наук, член-корр.

*Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек*

*Осмонова Рима Чынарбековна*  
млад. науч. сотруд.

*Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек*

*Такырбашев Бейшеналы Касымалиевич*  
начальник службы релейной защиты и автоматики  
ОАО «Северэлектро» Кыргызской Республики, г. Бишкек

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается трехфазная распределительная электрическая сеть (РЭС) напряжением 0,4 кВ. Формулируется задача идентификации ее параметров, таких как активные сопротивления и индуктивностей участков магистральных линий, 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 РЭС в режиме реального времени.

### ABSTRACT

The three-phase distributive electric network (DEN) of 0,4 quarter is considered. The problem of identification of her parameters, such as active resistance and inductance of sites of the main lines 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 RES in real time is offered.

**Ключевые слова:** трехфазная сеть, активные сопротивления, индуктивности, идентификация, алгоритм идентификации.

**Keywords:** three-phase network, active resistance, inductance, identification, algorithm of identification.

В настоящее время на уровне распределительных электрических сетей (РЭС) внедряются автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) [5, с.15] 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 энергобаланса в сети, 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 является оценка переменных состояния и параметров РЭС, которые в процессе функционирования сети не измеряются и не контролируются. К ним, в частности, относятся активные и реактивные сопротивления участков магистральной линии, а также протекающие через них токи. Применение существующих в настоящее время подходов и методов [1, с.56, 4, с.30, 8, с.7] для решения рассматриваемой задачи в режиме реального времени представляет определенные 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 напряжением 0,4 кВ, функционирующей в несимметричном режиме. Схема замещения части сети представлена на рисунке.

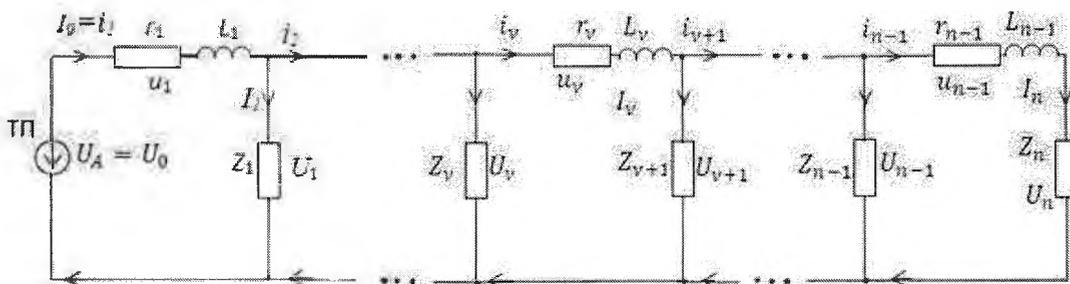


Рисунок. Схема замещения части трехфазной сети )

Она включает питающую трансформаторную подстанцию (ТП), группу из  $n$  нагрузок потребителей (абонентов) и магистральные линии (МЛ) передачи электроэнергии. На рисунке:  $Z_v$  – нагрузка  $v$ -го абонента ( $v = \overline{1, n}$ );  $r_v, L_v$  – активное сопротивление и индуктивность соответственно  $v$ -го участка МЛ;  $I_v, U_v$  – мгновенные значения тока и напряжения на нагрузке потребителя  $Z_v$ ;  $i_v$  – мгновенный фазный ток в  $v$ -ом участке МЛ сети;  $u_v^r$  – мгновенное значение напряжения на активном сопротивлении  $r_v$ ;  $u_v^L$  – мгновенное напряжение на  $L_v$ ;  $U_A$  – напряжение на входе рассматриваемой фазы.

Предположим, что выполняются следующие условия:

- электрическая сеть относится к классу линейных систем;
- РЭС функционирует в нормальном (штатном) режиме, т.е. в ней отсутствуют возмущающие факторы;
- 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:

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

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

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

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. При этом через

участки МЛ в каждый момент времени  $t \in [t_0, t_1]$  будут протекать токи  $i_\nu(t)$  ( $\nu = \overline{1, n}$ ).

Задача идентификации заключается в оценке значений активных сопротивлений  $r_\nu$  и индуктивностей  $L_\nu$  (реактивных сопротивлений) участков МЛ на основе измерительных данных, поступающих в концентратор.

Метод решения задачи. В случае, когда выполняется условие (2) комплексные токи  $\dot{i}_\nu$  ( $\nu = \overline{1, n}$ ), протекающие через участки МЛ, определяются на основе первого закона Кирхгофа [3, с.173]:

$$\dot{i}_\nu = \sum_{k=\nu+1}^n \dot{I}_k = \dot{i}_\nu^a + j\dot{i}_\nu^i, \quad \nu = \overline{1, n} \tag{3}$$

где  $v, m$  – символы, обозначающие здесь и далее вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимое число.

Комплексные напряжения  $\dot{U}_\nu$  на участках МЛ:

$$\dot{U}_\nu = \dot{U}_\nu - \dot{U}_{\nu+1}, \quad \nu = \overline{1, n} \tag{4}$$

С другой стороны по закону Ома [3, с.173]

$$\dot{U}_\nu = \dot{i}_\nu z_\nu, \quad \nu = \overline{1, n} \tag{5}$$

где комплексные сопротивления

$$z_\nu = r_\nu + jx_\nu,$$

а  $r_\nu, x_\nu$  – активные и реактивные сопротивления соответственно  $\nu$ -го участка МЛ.

Сравнение соотношений (4) и (5) позволяет записать следующие уравнения относительно  $r_\nu, x_\nu$ :

$$\dot{U}_\nu - \dot{U}_{\nu+1} = \dot{i}_\nu (r_\nu + jx_\nu), \quad \nu = \overline{1, n} \tag{6}$$

где комплексные токи  $\dot{i}_\nu$  определяются по формуле (3). Для идентификации параметров сети переменные  $I_v$  и  $U_v$  необходимо представить в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_\nu &= I_\nu^a + jI_\nu^i, \\ \dot{U}_\nu &= U_\nu^a + jU_\nu^i, \quad \nu = \overline{0, n-1} \end{aligned} \tag{7}$$

Счетчиками электроэнергии измеряются лишь модули  $\Gamma v$  и  $U v$  компонентов векторов  $\Gamma$  и  $U$ , а их вещественные и мнимые части, а также аргументы являются неизвестными величинами. Для их определения можно использовать по

измерениям активных  $P_v^a$  и реактивных  $P_v^i$  мощностей на нагрузках потребителей энергии. Так, для комплексной мощности  $P v$  на нагрузке  $Z_v$  имеем

$$\dot{P}_v = \dot{U}_v \dot{I}_v^* = p_v^a + j p_v^i = p_v e^{j\varphi_v}$$

При этом справедливы следующие соотношения:

$$U_v^a I_v^a + U_v^i I_v^i = p_v^a, \quad U_v^i I_v^a - U_v^a I_v^i = p_v^i \tag{8}$$

$$(p_v^a)^2 + (p_v^i)^2 = p_v^2$$

$$\varphi_v = \psi_v - \alpha_v = \arctg(p_v^i / p_v^a)$$

где  $\psi_v, \alpha_v, \varphi_v$  - фазовые сдвиги соответственно напряжений  $U v$ , токов  $I v$  и между этими переменными.

Поскольку величины  $p_v^a, p_v^i, \Gamma v$  и  $U v$  измеряются счетчиками электроэнергии (Сч), искомые переменные можно определить путем решения системы уравнений (8) на основе численных методов [2, с.115].

Таким образом, с учетом (3) и (7) систему уравнений (6) можно представить в виде:

$$\Delta U_v^a(t) + j \Delta U_v^i(t) = (i_v^a r_v - i_v^i x_v) + j(i_v^i r_v + i_v^a x_v),$$

$$\nu = \overline{1, n} \tag{9}$$

$$\text{где } \Delta U_v^a = U_v^a - U_{v+1}^a, \quad \Delta U_v^i = U_v^i - U_{v+1}^i$$

Приравнявая соответствующие вещественные и мнимые части левых и правых частей уравнений (9) для каждого получаем следующие соотношения:

$$U_v^a(t) - U_{v+1}^a(t) = i_v^a(t)r_v - i_v^i(t)x_v, \tag{10}$$

$$U_v^i(t) - U_{v+1}^i(t) = i_v^i(t)r_v + i_v^a(t)x_v, \quad \nu = \overline{1, n}$$

Значения параметров  $r v$  и  $x v$ , определенные для фиксированного момента времени  $t$ , могут сильно отличаться от их реальных значений  $r_v^0$  и  $r_v^0$  ( $v=\overline{1, n}$ ) из-за погрешностей измерений величин  $p_v^a, p_v^i, \Gamma v$  и  $U v$ . Поэтому целесообразно провести ряд измерений в дискретные моменты  $t_k=k\Delta t$  ( $k=\overline{1, N}$ ), где  $\Delta t$  - шаг дискретизации,  $N$  - количество дискретных точек, с последующей соответствующей обработкой полученных данных.

Для построения процедуры идентификации будем использовать алгоритм, предложенный в [6, 7]. Основная его идея состоит в следующем. Для каждого электрического контура вводятся невязки:

$$e_v^a(k) = i_v^a(k)r_v - i_v^i(k)x_v - [U_v(k) - U_{v+1}(k)] \tag{11}$$

$$e_v^i(k) = i_v^i(k)r_v + i_v^a(k)x_v - [U_v(k) - U_{v+1}(k)],$$

$$\nu = \overline{1, n}$$

$$p_v = [r_v, x_v]$$

и векторы

Далее на их основе определяются оценочные (штрафные) функции в виде:

$$E_v = \sum_{k=1}^N [e_v^a(k)]^2 + [e_v^i(k)]^2$$

$$\nu = \overline{1, n} \tag{12}$$

Тогда исходную задачу можно свести к задаче определения векторов  $p_v^*=[r_v^*, x_v^*]$ , обеспечивающих минимумы штрафных функций  $E v=E v(p v)$ , т.е. к решению экстремальных задач:

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

где  $R^2$  - двумерное арифметическое пространство.

Для решения экстремальной задачи (13).

В процессе решения задачи (13), т.е. поиска экстремума штрафной функции  $E v(p v)$ , вектор-параметры  $p v$  изменяются во времени  $t$ , следовательно, варьируются и значения

$$\text{функций } E v, \text{ т.е. } E_v = E_v(t) = E_v[p_v(t)]$$

Для того, чтобы штрафные функции  $E_v(t)$  убывали с течением времени достаточно выполнения следующих соотношений [7]:

$$\int_{t_0}^t E_v(\tau) \dot{E}_v(\tau) d\tau < 0, \quad \nu = \overline{1, n} \tag{14}$$

В результате проблема идентификации сводится к задаче поддержания соотношений (14). В [7] получены уравнения адаптации компонентов векторов  $p v=[\alpha v, \eta v]$ , обеспечивающие выполнение критериальных соотношений (14):

$$\dot{r}_v(t) = \xi_v s_v(t) E_v(t),$$

$$\dot{x}_v(t) = \gamma_v \beta_v(t) E_v(t), \quad \nu = \overline{1, n} \tag{15}$$

где  $\gamma v, \xi v$  - отрицательные числа;  $\beta v(t), s v(t)$  - функции, определяемые формулами:

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

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

При этом установившиеся решения  $r_v^*, x_v^*$  системы уравнений (15):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r_{\nu}(t) = r_{\nu}^*, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} x_{\nu}(t) = x_{\nu}^*,$$

$$\nu = \overline{1, n}.$$

являются оценками искомым вектор – параметров  $p_{\nu}^*$ , т.е.  $p_{\nu}^* = [r_{\nu}^*, x_{\nu}^*]$ .

Выводы. Предложен алгоритм идентификации параметров участков магистральной линии распределительной сети напряжением 0,4 кВ, функционирующей в несимметричном режиме. Основу алгоритма составляет новый критерий параметрической идентификации управляемых динамических систем. На его основе задача оценки параметров РЭС сводится к задаче квадратической оптимизации штрафной функции, определяемой ошибками идентификации. Получены уравнения адаптации параметров сети, обеспечивающие заданные критериальные условия. Результаты исследований ориентированы на создание подсистемы мониторинга процессов энергопотребления и диагностики состояния сети в составе АСКУЭ в режиме реального времени.

Список литературы:

1. Арутюнян А.Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях // Электричество. 2015. №10. С.55-58.
2. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1975. –632с.
3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. –СПб.: Питер. –2009. –512с.
4. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качества электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. –456с.
5. Ожегов А.Н. Системы АСКУЭ. Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. –102с.
6. Оморов Т.Т., Курманалиева Р.Н., Осмонова Р.Ч. К проблеме идентификации модели управляемой системы по экспериментальным данным // URL: Univerzum: 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. Пономаренко О.И., Холиддинов И.Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения // Энергетик. 2015. №12. С.6-8.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЗУЕМОСТИ ПВХ ЛИНОЛЕУМОВ

*Османов Тофик Рамазан оглы*

*доцент, кандидат технических наук, Азербайджанский Государственный Экономический Университет (UNEC), Баку*

*Самедов Эльчин Алескер оглы*

*доцент, кандидат технических наук, Азербайджанский Государственный Экономический Университет (UNEC), Баку*

*Мирзоев Герай Сурхай оглы*

*доцент, кандидат технических наук, Азербайджанский Государственный Экономический Университет (UNEC), Баку*

### АННОТАЦИЯ

В работе проводится исследование электризуемости различных видов ПВХ-линолеумов, составляющих основу их современного ассортимента, анализируются изменения показателей электризуемости при колебаниях относительной влажности воздуха. Результаты исследования позволяют определить преимущества и недостатки так или иных методов исследования и выявить определенные закономерности в изменениях показателя электризуемости ПВХ-линолеумов.

### ABSTRACT

In this paper we study different types of electrified PVC-linoleum, form the basis of their current range, analyzes changes electrified performance at fluctuations of relative humidity. The study results allow us to determine the advantages and disadvantages in one way or other methods of investigation and to identify specific patterns of changes in the index electrified PVC-linoleum.

**Ключевые слова:** ПВХ-линолеум, электризуемость, относительная влажность, потенциал заряда статического электричества, удельное поверхностное электрическое сопротивление, статическое электричество.

**Keywords:** PVC-linoleum, electrified, the relative humidity, the potential of static electricity, electrical surface resistance of the static electricity.

Цели исследования. С расширением производства и применения поли-мерных материалов в технике и быту защита от статического электричества стала серьезной научной проблемой [2]. Статическое электричество вызывает нарушение технологических процессов получения и переработки полимеров, может стать причиной пожаров и взрывов на производстве, ухудшает эргономические свойства, неблагоприятно воздействует на организм человека, пользующе-

гося изделиями из полимерных материалов. Поэтому изучение электризации полимеров [4] и разработка надежных методов борьбы с нею - чрезвычайно важная задача.

До настоящего времени фундаментальных научных исследований по защите полимеров от статического электричества с помощью поверхностной обработки, а также путем получения полимерных комплексов с переносом заряда и