

## К ПРОБЛЕМЕ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЙ МАГИСТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ТРЕХФАЗНОЙ РАСПРЕДЕСЕТИ В СОСТАВЕ АСКУЭ

**Оморов Туратбек Турсунбекович**, д.т.н., член-корреспондент Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек, пр. Чуй, 66а, [omorovti@mail.ru](mailto:omorovti@mail.ru). ORCIDID 0000- 0002-5902- 0220

**Койбагаров Таалайбек Джергалбекович**, аспирант, Национальная академия наук Кыргызской Республики, г.Бишкек. [koibagarov@bk.ru](mailto:koibagarov@bk.ru).

**Жаныбаев Тилебалды Оторбекович**, зам.ген.директора, ОАО «Северэлектро», Кыргызская Республика, Чуйская область, Аламудунский район, с.Лебединовка, ул.Чкалова, e-mail: [zhanybaev1979@mail.ru](mailto:zhanybaev1979@mail.ru)

**Осмонова Рима Чынарбековна**, с.н.с., Национальная академия наук Кыргызской Республики, г.Бишкек. [r.osmonova@mail.ru](mailto:r.osmonova@mail.ru)

**Аннотация.** Рассматривается проблема диагностики состояний проводов магистральной линии трехфазной распределительной электрической сети (РЭС), характеризующихся такими параметрами, как сопротивления ее межабонентских участков. Для этой цели предварительно решается задача параметрической идентификации РЭС на основе измерительных данных, полученных по каналам связи со счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети. При эксплуатации сети эти параметры изменяются во времени. Сформулированы критериальные условия, позволяющие оценить уровни износа линий электропередач с использованием идентифицированных значений сопротивлений межабонентских участков сети. При этом в качестве их базовых значений берутся оценки, полученные на основе паспортных данных проводов сети. На основе указанных критериальных условий и результатов решения задачи параметрической идентификации разработан алгоритм диагностики состояний проводов магистральной линии РЭС. Полученные результаты ориентированы для разработки специального программного обеспечения подсистемы диагностики функциональных элементов распределительной сети в составе автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ).

**Ключевые слова:** распределительная сеть, сопротивления проводов, параметры сети, критерии диагностики, алгоритм диагностики.

## TO THE PROBLEM OF DIAGNOSTICS OF THE STATES OF THE MAIN LINES OF THE THREE-PHASE DISTRIBUTION IN THE ASKUE COMPOSITION

*Omorov Turatbek Tursunbekovich, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 66a Chui Ave., omorovtt@mail.ru. ORCIDID 0000-0002-5902-0220*

*Koibagarov Taalaibek Dzhergalbekovich, graduate student, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek. koibagarov@bk.ru.*

*Zhanybaev Tilebaldy Otorbekovich, Deputy General Director, OJSC Severelectro, Kyrgyz Republic, Chuy Oblast, Alamudunsky District, Lebedinovka village, Chkalova St., e-mail: zhanybaev1979@mail.ru*

*Osmonova Rima Chynarbekovna, Senior Researcher, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek. r.osmonova@mail.ru*

**Annotation.** The problem of diagnosing the state of the wires of the trunk line of a three-phase distribution electric network (RES), characterized by such parameters as the resistance of its interpersonal sections, is considered. For this purpose, the problem of parametric identification of RESs is preliminarily solved on the basis of measurement data obtained via communication channels from electricity meters installed at network subscribers. During network operation, these parameters change over time. Criteria are formulated to assess the levels of wear of power lines using identified resistance values of interpersonal network sections. In this case, the estimates obtained on the basis of the passport data of the network wires are taken as their basic values. Based on the specified criteria conditions and the results of solving the parametric identification problem, an algorithm for diagnosing the state of the wires of the main line of RES is developed. The results obtained are oriented for the development of special software for the subsystem of diagnostics of functional elements of the distribution network as part of an automated system for monitoring and accounting for electricity (ASKUE).

**Key words:** distribution network, wire resistance, network parameters, diagnostic criteria, diagnostic algorithm.

В настоящее время активно внедряются автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1] в целях комплексной автоматизации распределительных электрических сетей (РЭС) напряжением 0,4 кВ, иерархия которых, в основном, состоит из двух уровней. Структура нижнего уровня включает группу счетчиков электроэнергии (Сч), устанавливаемых у абонентов сети, и концентратор данных (КД), который строится на базе микропроцессорного контроллера и устанавливается в трансформаторной подстанции (ТП). Концентратор дистанционно осуществляет оперативный сбор данных со счетчиков электроэнергии в автоматическом режиме, их хранение и после предварительной обработки требуемые данные передает в центральный компьютер верхнего уровня, который располагается в диспетчерском пункте управления. Обмен данными между структурными элементами автоматизированной системы осуществляется по каналам связи. Основной функцией традиционных АСКУЭ является автоматизация коммерческого учета электроэнергии. В то же время в распределительных сетях наиболее важной является задача автоматизации процессов диагностики состояний ее функциональных элементов [2-6]. При этом часть проблемы связана с диагностикой состояний фазных и нейтрального проводов трехфазной распределительной сети. Анализ показывает, что формализация и алгоритмизация этой задачи требует разработки соответствующей математической модели и метода идентификации

параметров РЭС, таких как сопротивления межабонентских участков, в режиме реального времени. Как известно, при эксплуатации РЭС эти параметры изменяются во времени случайным образом в зависимости от состояния внешней среды, что приводит к определенным трудностям при разработке моделей физических процессов в РЭС и алгоритмов параметрической идентификации [2, 4, 7, 8]. Известные методы параметрической идентификации [14-16] в недостаточной степени адаптированы для их применения в режиме реального времени. Один из возможных подходов в этом направлении – это проблема идентификации параметров распределительных сетей на основе методов оптимизации [13].

В [17, 18] предложены вычислительные схемы, предназначенные для определения параметров четырехпроводной РЭС напряжением 0,4 кВ, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений. При этом предварительно решается задача математического описания токов и напряжений на нагрузках сети в комплексной форме с определением их неизвестных фазовых сдвигов, что в определенной степени усложняет проблему нахождения искомым параметров. В данной статье предлагается метод диагностики состояний межабонентских участков магистральной линии распределительной сети на основе предварительной оценки их комплексных сопротивлений, вычислительная схема которого базируется только на измерительных данных АСКУЭ, полученных по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии. Алгоритм метода ориентирован для создания специального программного обеспечения диагностических задач в составе традиционных АСКУЭ.

**Постановка задачи.** В качестве объекта рассматривается четырехпроводная РЭС напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рис. 1.

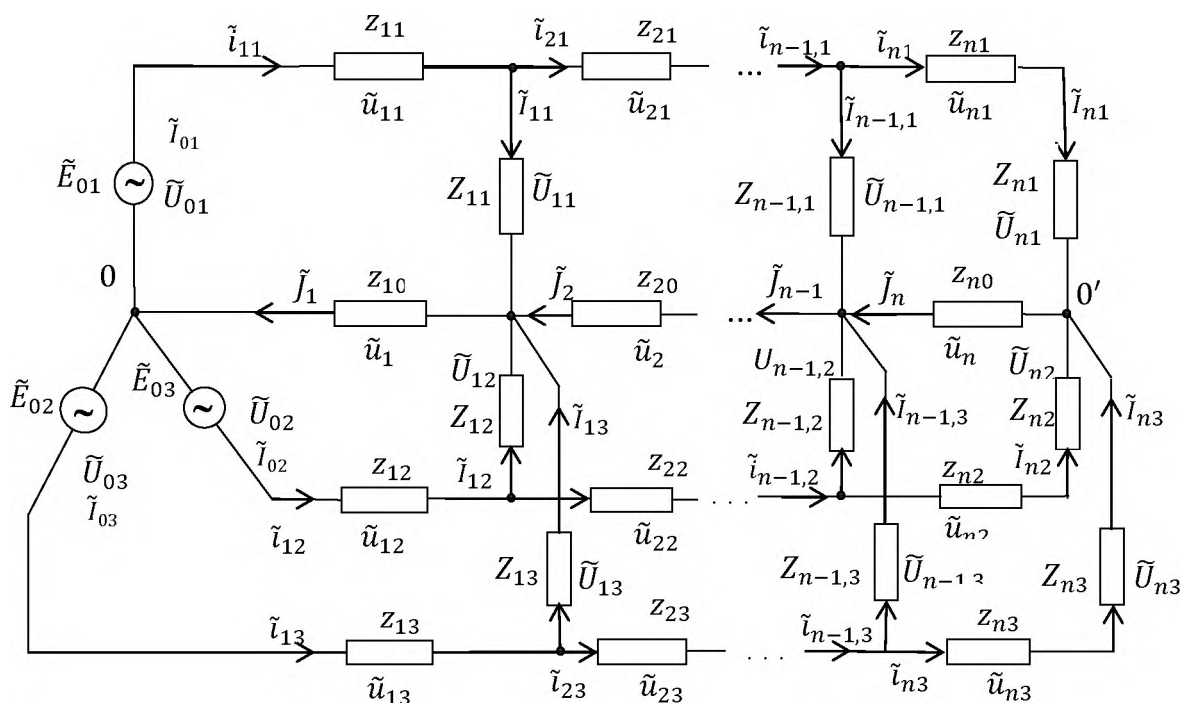


Рис. 1. Расчетная схема трехфазной сети

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  $\nu$ -ом МАУ  $k$ -й фазы и нейтрального провода;  $\tilde{I}_{\nu}, Z_{\nu 0}$  – мгновенный ток и комплексное сопротивление  $\nu$ -го участка нейтрального провода.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

- 1) трехфазная сеть является линейной системой;
- 2) в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети;
- 3) со счетчиков электроэнергии (Сч $_{\nu k}$ ), установленных у абонентов сети и в трансформаторной подстанции, в базу данных АСКУЭ по каналам связи в дискретные моменты времени  $t \in [t_{\xi}, t_{\xi+1}]$  с шагом дискретизации  $\Delta t_{\xi} = t_{\xi+1} - t_{\xi}$  ( $\xi = 1, 2, \dots$ ) поступают следующие данные:

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

Как известно, в традиционных АСКУЭ межабонентские комплексные токи  $i_{\nu k}, j_{\nu}$  и напряжения  $\dot{u}_{\nu k}, \dot{u}_v$  не идентифицируются и не контролируются. В то же время в АСКУЭ имеется возможность их определения по данным со счетчиков электроэнергии системы, что позволяет осуществлять оперативный мониторинг электрического состояния РЭС [54, 56, 58]. При этом, мгновенные синусоидальные токи  $\tilde{I}_{\nu k}$ , напряжения  $\tilde{U}_{\nu k}$  на соответствующих нагрузках и их сопротивления  $Z_{\nu k}$  в установившемся режиме можно представить в комплексной форме [55, 82]:

$$\dot{i}_{\nu k} = I_{\nu k}^B + jI_{\nu k}^M = I_{\nu k} e^{j(\beta_k + \alpha_{\nu k})}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_{\nu k} = U_{\nu k}^B + jU_{\nu k}^M = U_{\nu k} e^{j(\beta_k + \psi_{\nu k})},$$

$$Z_{\nu k} = Z_{\nu k}^B + jZ_{\nu k}^M = \bar{Z}_{\nu k} e^{j\varphi_{\nu k}}, \quad \nu = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где символы «в» и «м» обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных;  $I_{\nu k}, U_{\nu k}, \bar{Z}_{\nu k}$  – модули этих переменных. При этом

$$\varphi_{\nu k} = \psi_{\nu k} - \alpha_{\nu k}, \quad \beta_k = 2(k - 1)\pi/3,$$

где  $\alpha_{\nu k}, \psi_{\nu k}$  – приращения фазовых сдвигов относительно их номинальных значений  $\beta_k$ , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети. В случае, когда построена модель нагрузок в установившемся режиме в форме (1) и (2) межабонентские токи и напряжения можно оценить на основе известных законов электротехники [82] (рис. 1), т.е.:

$$i_{\nu k} = \sum_{l=\nu}^n \dot{i}_{lk} = \sum_{l=\nu}^n (I_{lk}^B + jI_{lk}^M) = I_{\nu k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{\nu k})}, \quad (3)$$

$$j_{\nu} = i_{\nu 1} + i_{\nu 2} + i_{\nu 3}, \quad \dot{u}_v = j_{\nu} Z_{\nu 0}, \quad \nu = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (4)$$

где  $I_{\nu k}, \tilde{\alpha}_{\nu k}$  – действующее значение и приращение фазового сдвига межабонентского комплексного тока  $i_{\nu k}$  соответственно.

Далее будем предполагать, что с использованием методов, предложенных в [\*\*], построена модель распределенности в комплексной форме (1)-(4) и на ее основе идентифицированы сопротивления межабонентских участков фазных проводов  $Z_{\nu k}$  и нейтрального провода  $Z_{\nu 0}$  трехфазной сети.

Теперь введем векторы  $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3$ , составленные из оценок параметров межабонентских участков фазных и нейтрального проводов в текущий момент времени  $t \in t_{\xi}$ :

$$Z_0 = [z_{10}, z_{20}, \dots, z_{n0}],$$

$$Z_1 = [z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}],$$

$$Z_2 = [z_{21}, z_{22}, \dots, z_{n2}],$$

$$Z_3 = [z_{13}, z_{23}, \dots, z_{n3}].$$

На основе указанных векторов составляем матрицу  $Z$ :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{10} & z_{20} & \dots & z_{n0} \\ z_{11} & z_{21} & \dots & z_{n1} \\ z_{12} & z_{22} & \dots & z_{n2} \\ z_{13} & z_{23} & \dots & z_{n3} \end{bmatrix}.$$

Далее будем предполагать, что по паспортным данным предварительно определены и записаны в базе данных концентратора (КД) базовая матрица  $Z^*$ , составленная соответственно из номинальных значений параметров сети  $z_{v\rho}^*$  и  $z_{v0}^*$ :

$$Z^* = \begin{bmatrix} Z_0^* \\ Z_1^* \\ Z_2^* \\ Z_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{10}^* & z_{20}^* & \dots & z_{n0}^* \\ z_{11}^* & z_{21}^* & \dots & z_{n1}^* \\ z_{12}^* & z_{22}^* & \dots & z_{n2}^* \\ z_{13}^* & z_{23}^* & \dots & z_{n3}^* \end{bmatrix}.$$

Для диагностики состояний межабонентских участков магистральной линии используются данные идентификации текущих параметров РЭС, т.е. матрица  $Z$  и базовая матрица  $Z^*$ .

В общем случае для оценки уровня износа электрических линий межабонентских участков сети можно поступить следующим образом. В начале вычисляются относительные отклонения текущих значений параметров сети от их номинальных значений:

$$\Delta z_{v\rho} = (|z_{v\rho} - z_{v\rho}^*|) / z_{v\rho}^*, \quad v = \overline{1, n}, \quad \rho = \overline{0, 3}. \quad (5)$$

Как известно, технические потери электроэнергии в соответствующих участках сети увеличиваются, если найденные оценки  $\Delta z_{v\rho}$  превышают их критических значений. Поэтому критерием нормального состояния электрических линий РЭС можно принять выполнение следующих условий:

$$\Delta z_{v\rho} \leq \Delta z_{v\rho}^{max}, \quad v = \overline{1, n}, \quad \rho = \overline{0, 3} \quad (6)$$

где  $\Delta z_{v\rho}^{max}$  – максимально допустимые уровни износа соответствующих линий электроснабжения.

В целях алгоритмизации решение задачи диагностики состояний межабонентских участков магистральной линии распределительной сети введем в рассмотрение матрицу  $D = \{d_{\rho, v}\}_{4 \times n}$ , имеющую такую же размерность, как и матрица  $Z$ , т.е.  $\rho = \overline{0, 3}$   $v = \overline{1, n}$ . При этом первая строка соответствует состояниям межабонентских участков (МАУ) нейтрального (нулевого) провода, а остальные три строки соответствуют состояниям МАУ трех фазовых проводов сети. Компоненты этой матрицы  $d_{\rho, v}$  определим по следующему правилу:

$$d_{\rho, v} = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta z_{\rho v} \leq \Delta z_{\rho v}^*, \\ 1, & \text{если } \Delta z_{\rho v} > \Delta z_{\rho v}^*, \end{cases} \quad \rho = \overline{1, 4}, \quad v = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Формирование матрицы  $D$  осуществляется на основе критериальных условий (6), т.е., если состояние соответствующего провода с координатой  $(\rho, v)$  отвечает заданным требованиям, то  $d_{\rho, v} = 0$ , в противном случае  $d_{\rho, v} = 1$ . Алгоритм диагностики состояний МАУ трехфазной сети, полученный на основе результатов раздела 1 и критериальных условий (6), приведен на рис. 1.

Таким образом, использование критериальных условий (6) позволяет распределительным компаниям принимать оперативные меры по поддержанию электрических линий распределительной сети в требуемом (нормальном) состоянии.

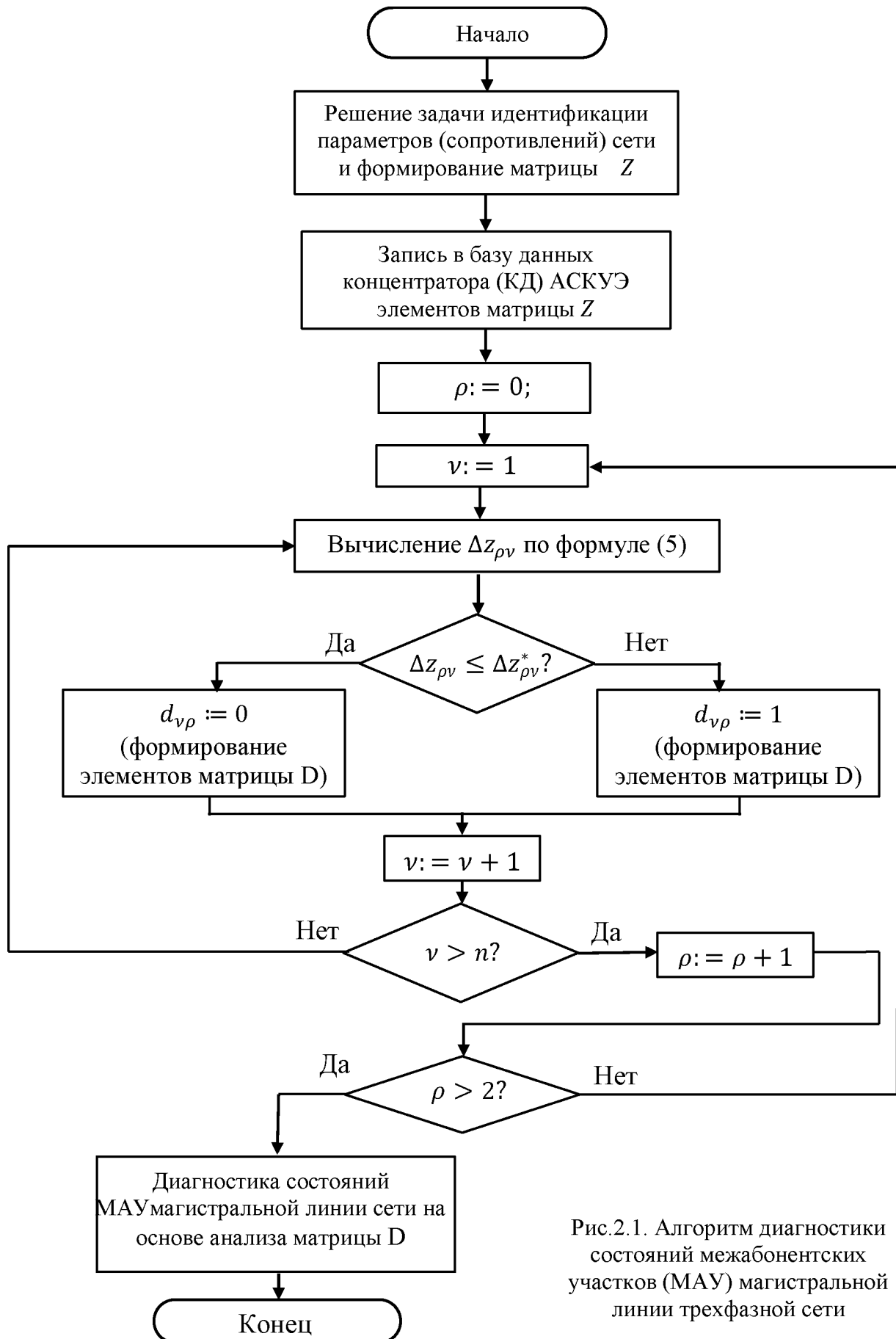


Рис.2.1. Алгоритм диагностики состояний межабонентских участков (МАУ) магистральной линии трехфазной сети

**Заключение.** Разработан метод диагностики состояний фазных и нейтрального проводов трехфазной распределительной сети напряжением 0,4 кВ, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений, по измерительным данным АСКУЭ, полученным с абонентских счетчиков электроэнергии. Основу метода составляет идея сравнения текущих значений сопротивлений (параметров) межабонентских участков сети с их значениями, полученными на основе паспортных данных проводов сети. При этом считается, что идентификация указанных параметров в текущий момент времени выполнена с использованием известных методов построения модели распределительной сети, представленной в комплексной форме. В целях диагностики предложен критерий, определяющий критический уровень износа проводов распределительной сети. На его основе разработан алгоритм диагностики состояний проводов трехфазной распределительной сети напряжением 0,4 кВ, который можно использовать для создания диагностической подсистемы в составе традиционных АСКУЭ. Дает возможность функционирование распределительной сети в нормальном режиме за счет принятия оперативных мер при обнаружении критических ситуаций.

#### **Литература**

1. Ожегов А.Н. Системы АСКУЭ. Киров: ВятГУ, 2006. -102 с.
2. 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.
3. 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. №6. С. 8-12.
4. 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.
5. Оморов Т.Т. , Такырбашев Б.К. Идентификация и мониторинг потерь электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ // Электричество. -2016, №11. – с.4–11.
6. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №11. –с. 651-656.
7. Арутюнян А.Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях // Электричество. 2015. №10. с.55-58.
8. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме идентификации состояний распределительных сетей в системах автоматизации контроля и учета электроэнергии // Автоматизация и управление в технических системах. – 2016. №3. URL: [auts.esrae.ru/20-380](http://auts.esrae.ru/20-380).
9. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. –СПб.: Питер, 2009. -512 с.