

ISSN 2413-8665

Международный научный семинар  
им. Ю.Н.Руденко

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

Исследование и обеспечение надежности  
систем энергетики

Выпуск 68

Иркутск  
2017 г.

<b>Можеев А.В.</b> Повышения надежности и эффективности работы энергосистем на основе внедрения интеллектуальных систем с использованием технологии синхронизированных векторных измерений.....	293
<b>Стенников В.А., Постников И.В., Пеньковский А.В.</b> Методы и модели оптимального управления ТСС с активными потребителями тепловой энергии.....	303
<b>Постников И.В., Стенников В.А.</b> Методы и модели обеспечения надежности ТСС с активными потребителями тепловой энергии.....	313
<b>Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Закиряев К.З.</b> Идентификация обрывов электрических линий трехфазных распределительных сетей в составе АСКУЭ.....	323
<b>Чукреев Ю.Я., Чукреев М.Ю., Чупров В.С.</b> Характеристики режима электропотребления применительно к задачам балансовой надежности при управлении развитием электроэнергетических систем.....	328
<b>Илюшин П.В., Музалев С.Г.</b> Подходы к обеспечению динамической устойчивости по напряжению ответственной нагрузки промышленных предприятий.....	338
<b>Крупенёв Д.С.</b> Применение моделей чувствительности установившегося режима электроэнергетических систем для учёта отказов элементов.....	348
<b>Юсифбейли Н.А., Гусейнов А.М., Гулиев Г.Б., Алиева А.Ф., Азадханов О.Б.</b> Мониторинг динамических показателей режимной надежности энергосистемы Азербайджана и условиях транзита мощности.....	357
<b>Гаджиев М.Г., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Шарон Ю.В.</b> Построение эквивалентов больших систем уравнений электрической сети на основе аннуляторов матриц.....	363
<b>Фурсанов М.И., Дуль И.И.</b> Анализ интервалов электрических параметров воздушных линий электропередачи.....	373
<b>Каганов В.И.</b> Передача энергии с солнечно-космических электростанций на землю.....	383
<b>Павловский П.А., Бузина Е.Я.</b> Анализ режимной	391

<b>Голуб И.И., Войтов О.Н., Болоев Е.В., Семенова Л.В.</b> Учет неопределенности информации о значениях нагрузок и генераций при суточной реконфигурации первичной распределительной сети.....	401
<b>Курбацкий В.Г., Реуцкий И.С., Томин Н.В.</b> Исследование режимной надёжности «узких» мест энергосистемы Иркутской области на примере Бодайбинского энергорайона.....	413
<b>Корнилов В.Н., Курбацкий В.Г., Томин Н.В.</b> Совершенствование принципов краткосрочного прогнозирования электропотребления Иркутской области.....	421
<b>Касымова В.М., Куржумбаева Р.Б., Архангельская А.В.</b> Анализ и прогноз обеспечения надежности Кыргызской энергосистемы в проекте концепции развития энергетики на долгосрочную перспективу.....	431
<b>Папков Б.В.</b> Уязвимость и стойкость объектов электроэнергетики.....	441
<b>Сулайманов А.О., Хлебов А.В., Разживин И.А., Сулайманова В.А.</b> Использование моделей реального времени при построении систем поддержки принятия решений диспетчерским персоналом ЭЭС.....	452
<b>Болшев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С.</b> Формализация формирования расчетных моделей электроэнергетических систем для оценки показателей балансовой надежности.....	458
<b>Куликов А.Л., Папков Б.В., Вуколов В. Ю., Колесников А.А.</b> Повышение надежности функционирования дифференциальной релейной защиты за счет применения метода двойной записи.....	467
<b>Джунуев Т.Т., Мамакеева А.К.</b> Полная модель синхронной машины в асинхронном режиме при потере возбуждения.....	477
<b>Хожлов М.В.</b> Методы оптимального размещения РМУ с учетом ограничений по надежности наблюдаемости ЭЭС для систем большой размерности.....	484
<b>Хожлов М.В., Готман Н.Э.</b> Робастное обобщенное оценивание состояния ЭЭС: метод на основе целочисленного линейного программирования.....	495

эксплуатацию собственных источников, анализ надежности их эксплуатации, системную экономию затрат на производство тепловой энергии и других аспектов, позволят сформулировать более обоснованную оценку целесообразности внедрения АП в теплоснабжении.

#### Литература

1. Надежность систем теплоснабжения / Справ., Отв. ред. Сеннова Е.В. – Новосибирск: Наука, 2000. – 360 с.
2. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. – Новосибирск, 1985. – 222 с.
3. Соколов В.Я. Теплофикация и тепловые сети / М.: Издательство МЭИ, 1999. – 472 с.
4. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
5. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / Под ред. Ю.Н.Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 474 с.
6. Червонный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
7. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
8. Каштанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем. – М.: Физматлит, 2010. – 608 с.
9. Стенников В.А., Постников И.В. Комплексный анализ надежности теплоснабжения потребителей // Известия РАН. Энергетика. № 2, 2011. – М.: Наука, с. 107–121.
10. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Methods for the integrated reliability analysis of heat supply // Power Technology and Engineering. Vol. 47, No. 6, March, 2014, p. 446–453.
11. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Methodological support for a comprehensive analysis of fuel and heat supply reliability / Sustaining power resources through energy optimization and engineering, Vasant P., Voropai N.I., editors. – Hershey PA: Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), 2016, p. 102–126.
12. Ivan V. Postnikov, Valery A. Stennikov, Ekaterina E. Mednikova, Andrey V. Penkovskii. A methodology for optimization of component reliability of heat supply systems // Energy Procedia 105 (2017), – P. 3083–3088.
13. Ekaterina E. Mednikova, Valery A. Stennikov, Ivan V. Postnikov. Heat supply systems development: the influence of external factors and reliability // Energy Procedia 105 (2017), – P. 3152–3157.

С 620.9: 658.011.56

#### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБРЫВОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ЕХФАЗНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ В СОСТАВЕ АСКУЭ

Оморов\* Т.Т., Такырбашев Б.К., Закиряев К.З.

В настоящее время в целях автоматизации и информатизации процессов энергопотребления в распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 0,4 кВ широко внедряются автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1-4]. Основными структурными и функциональными элементами этих систем являются концентраторы данных (КД) и комплекс счетчиков электроэнергии (Сч), установленных у абонентов сети. Для обмена технологической и служебной информацией между подсистемами АСКУЭ в составе КД и Сч имеются телекоммуникационные модули (ТКМ), построенные с использованием современных технологий передачи данных (GSM, Zigbee, PLC и др.). Основные функции КД: оперативный сбор данных с группы счетчиков электроэнергии (Сч); хранение полученных данных; цифровая обработка информации по решению соответствующих функциональных задач; обмен информацией с верхним уровнем управления. Необходимо отметить, что в рамках АСКУЭ, в основном, решаются задачи коммерческого учета электроэнергии. В то же время в целях повышения эффективности и интеллектуального уровня автоматизированных систем в их составе целесообразно решение таких важных функциональных задач, как оперативная диагностика состояний [5-7] и оптимизация режимов работы РЭС [8-10]. Среди задач диагностики особо следует выделить задачу идентификации и локализации мест обрывов электрических линий трехфазной распределительной сети. К настоящему времени разработан ряд подходов и средств ее решения [7]. В работе предлагается один из возможных методов ее решения в составе АСКУЭ с использованием данных, поступающих в режиме реального времени со счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети.

Рассматривается трехфазная РЭС напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рисунке 1. Для удобства на схеме фазы А, В, С пронумерованы соответственно через индексную переменную  $k$  ( $k = \overline{1,3}$ ). Остальные обозначения имеют следующий смысл:  $E_A, E_B, E_C$  – мгновенные фазные ЭДС;  $Z_{vk}$  – обозначение  $v$ -ой нагрузки (электроприемника) ( $v = \overline{1, n}$ ), подключенной к фазе с номером  $k$ ;  $I_{vk}, U_{vk}$  – мгновенные ток и напряжение на нагрузке  $Z_{vk}$ ;  $i_{vk}, z_{vk}$  – мгновенный ток и сопротивление  $v$ -го межабонентского участка (МАУ)  $k$ -ой фазы;  $\bar{i}_{vk}, \bar{u}_v$  – мгно-

\* НАН КР, Бишкек, Кыргызстан, omorovtt@mail.ru

венные напряжения соответственно на  $v$ -ом МАУ  $k$ -й фазы и нейтрального провода;  $I_{v,z_v}$  – мгновенный ток и сопротивление  $v$ -го участка нейтрального провода;  $\dot{U}_{0k}, \dot{i}_{1k}$  – мгновенные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз.

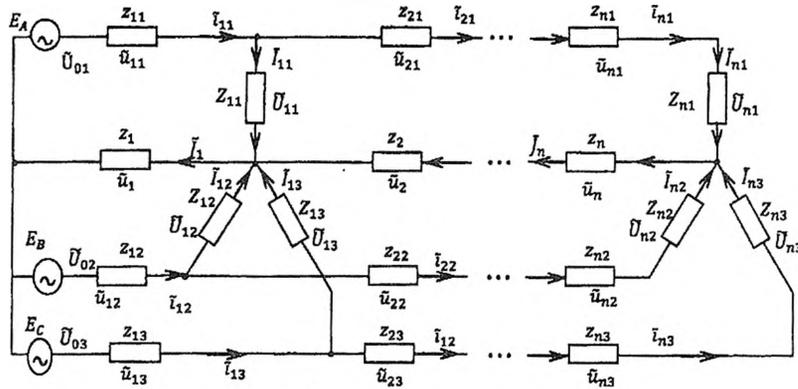


Рис. 1 – Расчетная схема трехфазной РЭС.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

- 1) РЭС функционирует в несимметричном режиме;
- 2) фазные и нейтральный провода сети могут иметь разные сечения, т.е. сопротивления  $z_{vk} \neq z_v$  ( $k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$ ), которые являются априори неизвестными;

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

4) со счетчиков электроэнергии (Сч<sub>vk</sub>) в концентратор (КД) 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  $I_{vk}$  и напряжений  $U_{vk}$  на нагрузках  $Z_{vk}$ ;
- коэффициенты мощности  $\cos \varphi_{vk}$ , определяемые фазовыми сдвигами  $\varphi_{vk}$  между соответствующими напряжениями  $\dot{U}_{vk}$  и токами  $I_{vk}$ .

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

$$\begin{aligned} \dot{I}_k &= [\dot{i}_{1k}, \dot{i}_{2k}, \dots, \dot{i}_{nk}], & \dot{U}_k &= [\dot{U}_{1k}, \dot{U}_{2k}, \dots, \dot{U}_{nk}], \\ \dot{u}'_k &= [\dot{u}'_{1k}, \dot{u}'_{2k}, \dots, \dot{u}'_{nk}], & \dot{i}_k &= [i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{nk}], \\ \dot{u} &= [\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dots, \dot{u}_n], & \dot{J} &= [j_1, j_2, \dots, j_n], \\ Z_k &= [z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{nk}], & Z_N &= [z_1, z_2, \dots, z_n], \quad k = \overline{1,3}, \end{aligned}$$

где  $\dot{I}_{vk}, \dot{U}_{vk}, \dot{u}'_{vk}, i_{vk}, \dot{u}_v, j_v$  – комплексные представления соответствующих электрических переменных, указанных на схеме трехфазной РЭС. Задача заключается в следующем:

1) определить векторы  $\dot{I}_k, \dot{U}_k, \dot{u}'_k, i_k, \dot{u}, \dot{J}, Z_k, Z_N$ , описывающие электрическое состояние сети;

2) идентифицировать координаты обрывов фазных и нейтрального проводов РЭС.

В начале предположим, что для момента времени  $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$  при условии, что РЭС функционирует в нормальном (штатном) режиме, задача определения состояния сети решена, в частности, определены межабонентские комплексные токи  $i_{vk}$  для  $k$ -й фазы, а также значения сопротивлений  $z_v^*$  участков нейтрального провода. Далее на основе этих данных составляем следующие векторы:

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

Отметим, что величины 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.  $z_v^* = const$ .

Как известно, в РЭС различают два типа обрывов силовых электрических линий:

- 1) обрывы фазных линий;
- 2) обрыв нейтрального провода.

В первом случае при обрыве провода  $q$ -го участка  $k$ -й фазы вектор  $\dot{i}_k$  имеет следующий вид:

$$\dot{i}_k = [i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{q-1,k}, 0, 0, \dots, 0]. \quad (1)$$

Во втором случае при обрыве провода  $\eta$ -го участка нейтрального провода вектор  $Z_N$  имеет следующий вид:

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

Анализ показывает, что при этом имеют место следующие соотношения для компонентов вектора  $Z_N$ :

$$\begin{aligned} z_\eta &\neq z_\eta^*, \\ z_v &= z_v^*, \quad v = 1, 2, \dots, \eta - 1, \eta + 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $z_\eta$  – текущее значение сопротивления, определенного для рассматриваемого дискретного момента времени  $t$ . Таким образом, во втором случае при выполнении условия (2) векторы  $Z_N^*$  и  $Z_N$  не являются равными, т.е.

$$Z_N \neq Z_N^*. \quad (3)$$

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

В результате для локализации обрывов фазных и нейтрального проводов сети можно сформулировать следующие критерии:

- **Критерий 1:** при обрыве провода  $q$ -го участка  $k$ -й фазы для вектора  $\dot{i}_{vk}$  выполняется условие (1).
- **Критерий 2:** при обрыве  $\eta$ -го участка нейтрального провода выполняется условие (3).

Следует отметить, что для идентификации и локализации обрывов электрических линий РЭС на основе сформулированных критериев необходимо решить задачу определения электрического состояния РЭС. Из-за ее сложности использование известных методов расчета трехфазной сети [11-14] представляет определенные трудности. В связи с этим в [4, 6, 15] предложены методологические и алгоритмические основы оценки переменных и параметров сети, ориентированные для применения в составе АСКУЭ. Основу этого направления исследований составляет математическая модель [15], которая позволяет токи и напряжения на нагрузках сети представить в комплексной форме:

$$\dot{I}_{vk} = I_{vk}^a + jI_{vk}^m = I_{vk} e^{j\alpha_{vk}}, \quad (4)$$

$$\dot{U}_{vk} = U_{vk}^a + jU_{vk}^m = U_{vk} e^{j\psi_{vk}}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где символы «в» и «м» обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных;  $I_{vk}$ ,  $U_{vk}$ ,  $\alpha_{vk}$ ,  $\psi_{vk}$  – модули (действующие токи и напряжения) соответствующих комплексных переменных и их фазовые сдвиги соответственно;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимое число.

Представления (4) и (5) дают возможность определить комплексные токи  $\dot{I}_{vk}$  и  $\dot{J}_v$ , протекающие в межбонентских участках сети, а также соответствующие напряжения  $u_{vk}$  и  $u_v$ . Соответствующие модели и алгоритмы описаны в [4, 6, 15]. Знание этих данных позволяет 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:

$$z_{vk} = \dot{u}_{vk} / \dot{I}_{vk}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3},$$

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

Реализация изложенных процедур (алгоритмов) оценки электрического состояния сети осуществляется в концентраторе данных в режиме реального времени.

Предложенные модели и вычислительные алгоритмы локализации обрывов фазных и нейтрального проводов трехфазной распределительной сети на основе сформулированных критериев ориентированы для создания специального программного обеспечения соответствующей подсистемы в составе АСКУЭ.

#### Литература

1. Ожегов А.Н. Системы АСКУЭ. Киров: ВятГУ, 2006. -102 с.
2. Сапронов А.А., Кужеков С.Л., Тынянский В.Г. Оперативное управление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ // Изв.вузов. Электромеханика. 2004. №1. с.55-58.
3. Солдатов А.А., Евдокимов Ю.К. Построение многофункциональной автоматизированной системы и алгоритмов контроля и диагностики режимов работы систем учета электроэнергии электросетевых подстанций. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. №1. -с. 1-10.

4. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. Идентификация и мониторинг потерь электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ // Электричество. -2016, №11. –с.4–11.

5. Солдатов А.А. Система контроля и диагностики оборудования подстанционных информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 6. -с.1-7.

6. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. Диагностика состояний электрических линий распределительных сетей в составе АСКУЭ // Контроль. Диагностика. 2017. №5.

7. Ершов А.М., Филатов О.В., Млоток А.В. и др. Система защиты электрической сети напряжением 380В от обрывов воздушной линии // Электротехнической станции. 2016, №5. –с. 28-33.

8. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 288 с.

9. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. 2016. №6. –с.11-15

10. Ф.Д.Косоухов, Н.В.Васильев, 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.

11. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. –СПб.: Питер, 2009. -512 с.

12. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. –М.: ЭНАС, 2009. -456с.

13. Арутюнян А.Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях // Электричество. 2015. №10. -с.55-58.

14. 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.

15. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К расчету трехфазных распределительных сетей в системах автоматизации контроля и учета электроэнергии // Энергетик. 2017. №4. –с.28-31.