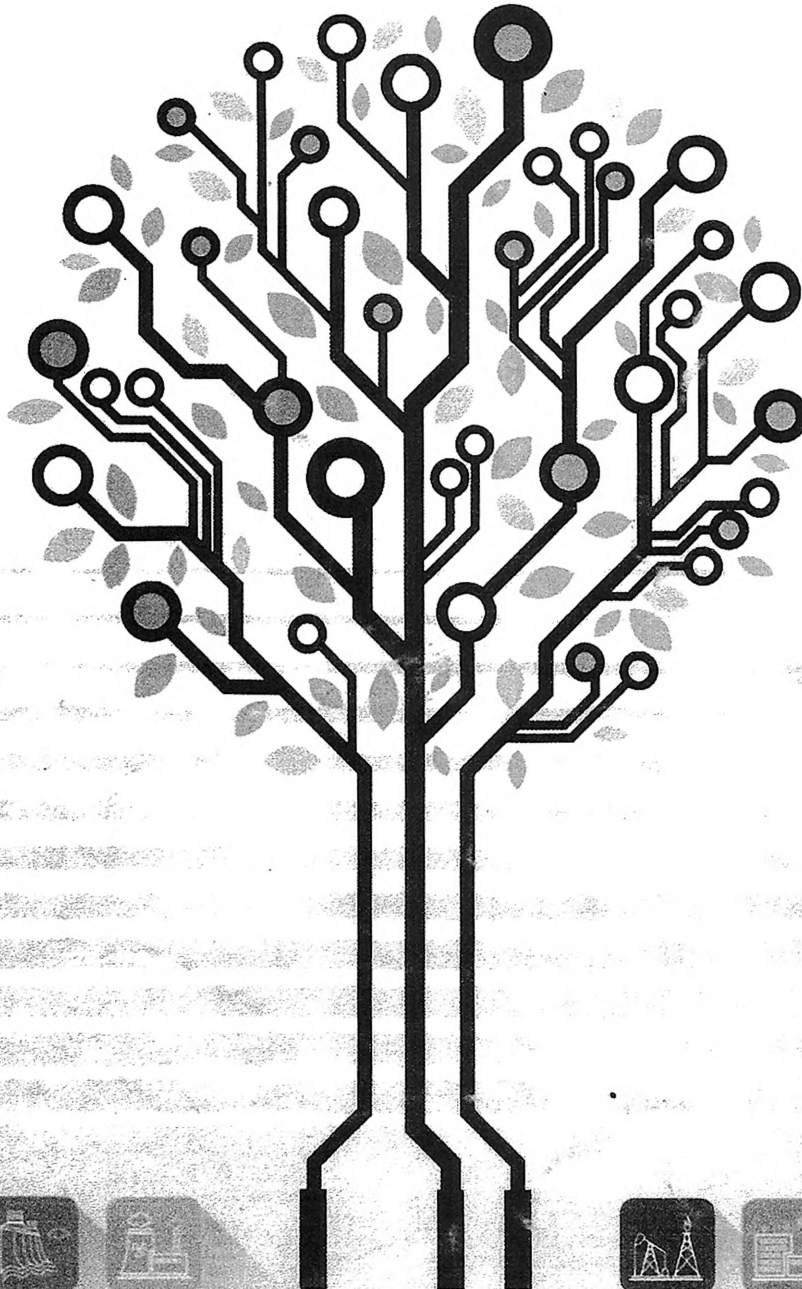




ЭНЕРГЕТИК • 6 2017

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ ЖУРНАЛ



СОХРАНЯЯ ЭНЕРГИЮ

ООО НПП «ЭКРА»
 428020, ЧР, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 3.
 Тел./факс: +7 (8352) 22-01-10, 22-01-30.
 E-mail: ekra@ekra.ru, www.ekra.ru

ЭНЕРГЕТИК

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ
ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ФСК ЕЭС,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ
АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК»,
НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,
ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОПРОФСОЮЗ,
НП «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС»

№ 6

июнь

2017 г.

Москва, НТФ «Энергопрогресс»

Издаётся с июня 1928 г.



Информационный
партнёр подкомитета
В5 РНК СИГРЭ
«Релейная защита
и автоматика»

Редакционная коллегия:

Э. П. ВОЛКОВ, академик РАН,
д. т. н., проф. (главный редактор)
Е. В. АМЕТИСТОВ,
член-корр. РАН, д. т. н., проф.
Я. Л. АРЦИШЕВСКИЙ, к. т. н.
Б. А. АФАНАСЬЕВ
Б.-Э. БАЯР, к. т. н. (Монголия)
Е. И. БОРИСОВ, д. т. н., проф.
П. А. БУТЫРИН, член-корр. РАН,
д. т. н., проф.
И. С. ВАРТАЗАРОВ, к. т. н.
Ю. А. ВИНЯРСКАЯ
(зам. главного редактора)
Ю. В. ВИХРЕВ, к. т. н.
В. И. ГУЩА
В. А. ДЖАНГИРОВ, к. э. н.
Л. М. ЕРЁМИН
В. В. ЖУКОВ, д. т. н., проф.
Ю. И. ЖУКОВ, к. т. н.
Е. Н. ИВАНОВ, к. т. н.
М. КОЛЦУН, к. т. н., проф.
(Словацкая Республика)
В. П. КУЗИЧЕВ
Г. Б. ЛАЗАРЕВ, к. т. н.
Б. К. МАКСИМОВ, д. т. н., проф.
В. В. МОЛОДЦОК, д. т. н., проф.
В. Г. НИКОЛАЕВ, д. т. н.
И. А. НОВОЖИЛОВ
(зам. главного редактора)
Э. М. ПЕРМИНОВ, к. т. н.
Н. Д. РОГАЛЁВ, д. т. н., проф.
Н. А. РУСТАМОВ, к. ф.-м. н.
С. Л. СЛЯДНЕВ
В. И. ТРЕМБОВЛЯ
(зам. главного редактора)
Э. М. ФАРХАДЗАДЕ, д. т. н., проф.
(Азербайджанская Республика)
Н. М. ЧУТЧЕВ
А. Ф. ШКОНДИН
Н. Г. ШУЛЬГИНОВ, к. т. н.
В. И. ЭДЕЛЬМАН, д. э. н., проф.

Журнал включён
в Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов и изданий ВАК

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14
Тел. +7 (495) 234-74-21
energetik.energy-journals.ru
E-mail: energetik@mail.ru

Редакторы **Л. А. Кочетова**, **Е. В. Ромашко**
Корректор **Л. Н. Някопанко**
Худож.-техн. редактор **Т. Ю. Андреева**

Перепечатка, копирование материалов, опублико-
ванных в журнале «Энергетик», допускается только
с письменного разрешения редакции.

Сдано в набор 24.05.2017. Подписано в печать
13.06.2017. Формат 60×84 $\frac{1}{8}$. Печать офсетная.

Печ. п. 7,0. Заказ ЕН/06-2017. Оригинал-макет
выполнен издательством «Фолиум».
Отпечатано типографией издательства «Фолиум»
127411, Москва, Дмитровское ш., 157

Содержание

- ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. Роголёв Н. Д., Перминов Э. М.**
О развитии возобновляемой энергетики России 3
- Семчёв В. А.** Энергетика Камчатского края: вчера, сегодня, завтра 9
- К 60-летию** трудовой деятельности Владимира Андреевича Джанги-
рова 18
- ОПЫТ ЗАРУБЕЖНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. Саламов А. А.** Обработка воды
для контроля коррозии, наличия накипи и микробиологических
отложений 20
- ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ. Красных А. А., Криво-
шеин И. Л., Козлов А. Л.** Исследование зоны растекания тока при одно-
фазном замыкании на землю 23
- ВЕСТИ ИЗ ПЕНСИОННОГО ФОНДА. НПФ электроэнергетики на-
граждён дипломом «Эксперт РА» в номинации «Инновации для корпо-
ративных клиентов» 26**
- ЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ. Гуревич В. И.** Доступные методы сни-
жения уязвимости электронного оборудования энергосистем к им-
пульсным электромагнитным воздействиям большой мощности 27
- ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ. Арешкин А. А., Горо-
бец Н. В., Кролин В. А., Николаевский Д. Н.** Многоуровневый гидравли-
ческий расчёт тепловых сетей 30
- Поздравляем юбиляра. **Заслуженному энергетик РФ и СНГ**
Б. С. Затопляеву — 80 лет 36
- ✓ **К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ. Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Осмо-
нова Р. Ч.** Определение параметров распределительных сетей 0,4 кВ
по данным АСКУЭ 37
- Дудников В. В.** Оценка потенциала использования солнечно-ветро-
вых ресурсов в топливно-энергетическом комплексе для повышения
экологической безопасности на примере Волгоградской области 40

ХРОНИКА, ИНФОРМАЦИЯ

- Золотинкина Л. И.** Санкт-Петербургский государственный электро-
технический университет «ЛЭТИ» перешагнул 130-летний рубеж 46
- Будрейко Е. Н.** Советская энергетика в годы Великой Отечествен-
ной войны. Летопись событий. 1944 — 1945 гг. 50
- Поздравляем юбиляра. **Сляднев С. Л. (к 70-летию со дня**
рождения) 54
- Поздравляем юбиляра. **Чутчев Н. М. (к 70-летию со дня**
рождения) 55
- Abstracts 56

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт

© НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2017 г.

энергетики, включая и самую значимую — «За заслуги перед российской энергетикой».

В 2001 г. Затопляев Б. С. был назначен советником председателя правления ОАО РАО «ЕЭС России» и оставался им до завершения реорганизации РАО. Борис Семёнович избирался председателем (с 2001 по 2004 г.), заместителем председателя (с 2004 по 2005 г.), членом совета директоров ОАО «Янтарьэнерго» (с 2004 по 2008 г.).

С марта 2008 г. Затопляев Б. С. — советник генерального директора ОАО «УК ГидроОГК». В январе 2011 г. Борис Семёнович назначен советником генерального директора НИИЭС ОАО «РусГидро», а с марта 2013 по конец 2014 г. — советником генерального директора ОАО «Янтарьэнерго». С 2015 г. Борис Семёнович находится на заслуженном отдыхе.

Б. С. Затопляев — почётный член Российской ассоциации ветроиндустрии; член комитета по проблемам использования возобновляемых источников энергии Российского союза научных и инженерных общественных организаций.

Б. С. Затопляев является основателем (1997 г.) и был бессменным президентом ассоциации энергосбережения Калининградской области. Борис Семёнович — первый руководитель Балтийского отделения Российской академии электротехнических наук (до 2015 г.).

Доктор электротехники, член-корреспондент Российской академии электротехнических наук Б. С. Затопляев много внимания уделял подготовке квалифицированных кадров, он был одним из организаторов подготовки тепло- и электроэнергетиков в Калининградском государственном техническом университете, особо заботился о создании основ материально-технической базы. Долгое время Борис Семёнович возглавлял государственную аттестационную комиссию по специальности «Электрические станции», вел специальный курс по специальности «Энергоэффективность и энергосбережение», руководил подготовкой и защитой дипломных проектов.

Высокие организаторские способности, воля, умение видеть перспективу и аналитически мыслить, глубокие знания, настойчивость в достижении поставленной цели, высочайшая работоспособность, умение организовать коллективы на выполнение сложных задач, опора на коллективы и знание их социальных нужд принесли Б. С. Затопляеву заслуженный авторитет и искреннее уважение многих энергетиков в России.

Цели, которым всецело отдаёт себя Б. С. Затопляев, благородны и устремлены в будущее. Коллеги по работе и все близкие Борису Семёновичу по духу его устремлений, редколлегия журнала «Энергетик» от чистого сердца поздравляют Б. С. Затопляева с 80-летием и искренне желают Борису Семёновичу многих лет плодотворной деятельности на благо отечественной электроэнергетики.

К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ

Определение параметров распределительных сетей 0,4 кВ по данным АСКУЭ

ОМОРОВ Т. Т., доктор техн. наук, член-корр. НАН КР

Кыргызская Республика, г. Бишкек, просп. Чуй, д. 265а; omorovtt@mail.ru

ТАКЫРБАШЕВ Б. К., ОАО «Северэлектро», ОСМОНОВА Р. Ч., НАН КР



Т. Т. Оморов



Б. К. Такырбаев



Р. Ч. Осмонова

Рассматривается проблема определения значений электрических параметров режима, а также собственных сопротивлений участков распределительных сетей 0,4 кВ по данным автоматизированной системы контроля и учёта электроэнергии (АСКУЭ). Считается, что сеть функционирует в условиях несимметрии токов и напряжений и наличия в ней несанкционированных отборов электроэнергии, приводящих к отклонению от номинального режима работы сети. Предлагается метод оценки недоступных для измерения и контроля переменных трёхфазной сети на основе идентификации априори неизвестных её параметров — сопротивлений межабонентских участков магистральной линии. Для этой цели получены модели физических процессов в электрических контурах сети в виде системы линейных уравнений. Найдены их аналитические решения, что значительно упрощает процедуру идентификации состояний трёхфазной сети. Предложенный метод можно использовать для оперативного мониторинга состояний распределительной сети и идентификации потерь электроэнергии в ней в составе АСКУЭ.

Ключевые слова: распределительная сеть, параметры сети, модель, метод идентификации.

Создание и внедрение АСКУЭ — одно из перспективных направлений комплексной автоматизации и информатизации процессов в распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 0,4 кВ. Известно, что структура таких систем состоит в основном из двух уровней — нижнего и верхнего. Нижний уровень включает в себя группу счётчиков электроэнергии (СЭ), устанавливаемых у абонентов сети, и концентратор данных (КД) — микропроцессорный блок, располагаемый в трансформаторной подстанции (ТП).

Концентратор выполняет функции оперативного сбора данных со счётчиков в автоматическом режиме, их хранения и предварительной обработки. При этом необходимые данные циклически или по запросу передаются в вычислительный комплекс верхнего уровня, который располагается в центральном диспетчерском пункте. Обмен

данными между структурными элементами АСКУЭ осуществляется по каналам связи, с использованием в основном технологий PLC и GSM.

Несмотря на то, что главная задача АСКУЭ — коммерческий учёт электроэнергии, современные требования, направленные на повышение технико-экономических показателей РЭС и АСКУЭ, обуславливают необходимость решения в составе автоматизированной системы и ряда других важных функциональных задач. К ним относятся оперативный мониторинг, а также диагностика состояний и оптимизация режимов работы РЭС в условиях наличия в сети различных возмущающих факторов.

Известно [1–6], что решение указанных задач представляет определённую трудность. Это связано с недостатками в разработке соответствующих математических моделей и методов расчёта трёхфазных сетей в режиме

реального времени и условиях с несанкционированным отбором электроэнергии, а также с несимметрией токов и напряжений.

В связи с этим в [7 – 10] рассмотрены некоторые подходы для решения указанных задач. В частности, решения задач идентификации [7 – 9] и управления потоками электроэнергии [10] в РЭС осуществляются при неизвестных значениях сопротивлений межабонентских участков магистральной линии. В то же время знание этих параметров позволяет в ряде случаев упростить решение задач мониторинга и диагностики состояний РЭС. Предлагается для использования в составе АСКУЭ метод оценки электрического состояния распределительной сети на основе идентификации её параметров в условиях несимметрии токов и напряжений, а также наличия в сети несанкционированного отбора электроэнергии.

Рассмотрим четырёхпроводную трёхфазную распределительную сеть напряжением 0,4 кВ, расчётная схема которой показана на рисунке, где для удобства дальнейших математических операций через индексную переменную k ($k = \overline{1,3}$) указаны соответственно фазы А, В и С, а через v — номера электрических контуров сети.

Остальные обозначения следующие: Z_{vk} — сопротивление электроприёмника (нагрузки) сети с координатой (v, k) , подключённого к фазе с номером k ; \tilde{i}_{vk} , U_{vk} — мгновенные ток и напряжение на нагрузке Z_{vk} ; \tilde{i}_{vk} , z_{vk} — мгновенный ток и сопротивление v -го межабонентского участка (МАУ) k -й фазы; \tilde{u}_{vk} , \tilde{u}_v — напряжения соответственно на v -м МАУ k -й фазы и нейтрального провода; \tilde{J}_v , z_v — мгновенный ток и сопротивление v -го участка нейтрального провода; \tilde{U}_{0k} , $\tilde{i}_{0k} = \tilde{i}_k$ — мгновенные напряжения и токи на входах соответствующих фаз.

Далее предполагается выполнение ряда условий.

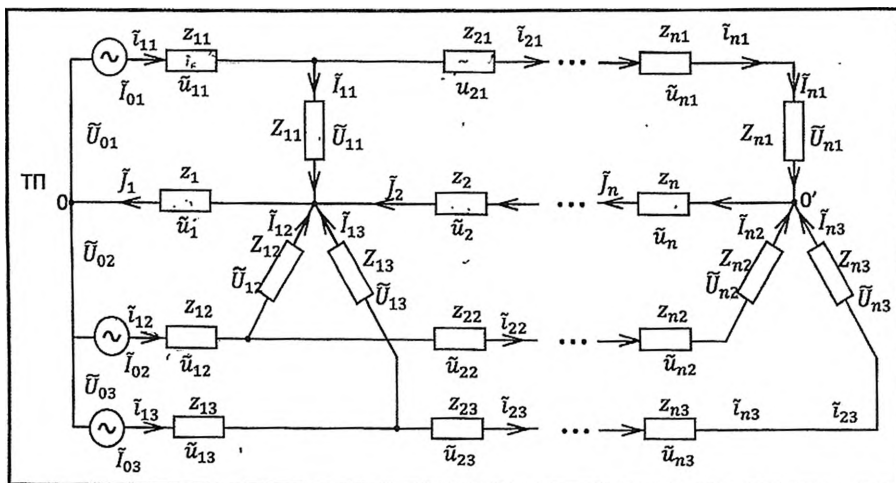
1. Наличие несимметрии токов и напряжений.

2. Присутствие в сети возмущающих факторов — несанкционированных отборов электроэнергии.

3. Неизвестны сопротивления межабонентских участков z_{vk} и z_v , а линейные и нейтральный провода сети имеют различные сечения.

4. В базу данных КД в каждом интервале наблюдения $[t_{\xi}, t_{\xi+1}]$ (где $\xi = 1, 2, 3, \dots$) поступают следующие данные:

- действующие токи \tilde{i}_{vk} и напряжения U_{vk} на нагрузках Z_{vk} , $v = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, 3}$;
- коэффициенты мощности $\cos \varphi_{vk}$, $v = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, 3}$.



Расчётная схема трёхфазной электрической сети

Введём матрицу Z и вектор Z_0 , составленные из оценок сопротивлений z_{vk} и z_v в текущем интервале наблюдения $[t_{\xi}, t_{\xi+1}]$:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & \dots & z_{n1} \\ z_{12} & z_{22} & \dots & z_{n2} \\ z_{13} & z_{23} & \dots & z_{n3} \end{bmatrix},$$

$$Z_0 = [z_1, z_2, \dots, z_n].$$

Задача заключается в идентификации состояний трёхфазной распределительной сети на основе оценки элементов матрицы Z и вектора Z_0 в режиме реального времени на основе исходных данных, указанных в п. 4.

Решение сформулированной задачи включает основные этапы:

- преобразование исходных данных в комплексную форму;
- оценка межабонентских токов \tilde{i}_{vk} и \tilde{J}_v при нормальном режиме работы РЭС;
- идентификация параметров сети, т. е. оценка элементов матрицы Z и вектора Z_0 ;
- идентификация состояния трёхфазной сети по результатам параметрической идентификации.

Преобразование исходных данных в комплексную форму

В каждый момент времени $t \in [t_{\xi}, t_{\xi+1}]$ суммарные токи на входах фаз $\tilde{i}_k(t)$ ($k = \overline{1, 3}$), потребляемые абонентами сети в соответствующих фазах, определяются по выражениям

$$\tilde{i}_k(t) = \sum_{v=1}^n \tilde{i}_{vk}(t); \quad k = \overline{1, 3}.$$

Предполагается, что в нормальном режиме работы РЭС отсутствуют внешние возмущающие факторы — несанкционированные отборы электроэнергии, которые вызывают дополнительные её потери. В этом случае для

всех $t \in [t_{\xi}, t_{\xi+1}]$ выполняются следующие условия:

$$|\tilde{i}_k(t) - \tilde{i}_{0k}(t)| \leq \Delta I_{\max}; \quad k = \overline{1, 3}, \quad (1)$$

где $\tilde{i}_{0k}(t)$ — действующий ток на входе k -го линейного фазного провода, измеряемый СЭ на выходе ТП; ΔI_{\max} — максимально допустимая погрешность измерения токов.

Если хотя бы одно из условий (1) не выполняется, в РЭС имеются несанкционированные отборы электроэнергии, т. е. сеть переходит в возмущённое состояние. Следует отметить, что для оценки межабонентских токов \tilde{i}_{vk} , \tilde{J}_v и напряжений \tilde{u}_{vk} , \tilde{u}_v непосредственное использование данных (полученных с СЭ) невозможно. В этом случае для корректного применения законов Кирхгофа синусоидальные токи и напряжения на нагрузках Z_{vk} необходимо представить в комплексной форме [7, 9, 11]

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{vk} &= I_{vk}^e + jI_{vk}^m = I_{vk} e^{j\alpha_{vk}}; \\ \tilde{U}_{vk} &= U_{vk}^e + jU_{vk}^m = U_{vk} e^{j\psi_{vk}}; \\ v &= \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где символы «e» и «m» обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных; I_{vk} , U_{vk} , α_{vk} , ψ_{vk} — модули (действующие токи и напряжения) комплексных переменных и их фазовые сдвиги соответственно; $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Оценка межабонентских токов

Предположим, что в интервале наблюдения $[t_{\xi}, t_{\xi+1}]$ выполняются условия (1), т. е. РЭС функционирует в нормальном режиме. Тогда на основе комплексного представления (2) и первого закона Кирхгофа можно вычислить межабонентские токи по формулам [11]

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{vk} &= \sum_{l=v}^n \tilde{i}_{lk} = \sum_{l=v}^n (U_{lk}^e + jI_{lk}^m); \\ v &= \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (3)$$

$$j_v = i_{v1} + i_{v2} + i_{v3}; v = \overline{1, n} \quad (4)$$

Идентификация параметров сети

Как известно, комплексные напряжения \dot{u}_{vk} и \dot{u}_v в v -х контурах рассматриваемой сети удовлетворяют второму закону Кирхгофа [11]:

$$\dot{u}_{vk} + \dot{u}_v + \dot{U}_{vk} - \dot{U}_{v-1k} = 0; v = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}. \quad (5)$$

Соотношения (5) запишем в виде:

$$\dot{u}_{vk} + \dot{u}_v = \dot{b}_{vk}; v = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

где $\dot{b}_{vk} = \dot{U}_{v-1k} - \dot{U}_{vk}$.

Напряжения на участках нейтрального провода определяются следующим образом:

$$\dot{u}_v = j_v z_v; v = \overline{1, n}. \quad (7)$$

С учётом формулы (4) получим

$$\dot{u}_v = (i_{v1} + i_{v2} + i_{v3})z_v = \left(\frac{\dot{u}_{v1}}{z_{v1}} + \frac{\dot{u}_{v2}}{z_{v2}} + \frac{\dot{u}_{v3}}{z_{v3}} \right) z_v; v = \overline{1, n}.$$

В случае, когда сечения линейных проводов одинаковы, а нейтрального провода отличается от них, имеем соответствующие сопротивления $z_{v1} = z_{v2} = z_{v3}$ и $z_{vk} \neq z_v$. Тогда напряжения рассчитываем по формуле

$$\dot{u}_v = \frac{z_v}{z_{v1}} (\dot{u}_{v1} + \dot{u}_{v2} + \dot{u}_{v3}); v = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Теперь, приравняв правые части выражений (7) и (8), получаем следующие равенства:

$$\dot{u}_{v1} + \dot{u}_{v2} + \dot{u}_{v3} = j_v z_v; v = \overline{1, n}. \quad (9)$$

С учётом (6) и (7) равенства (9) можно записать в виде

$$j_v z_{v1} + 3j_v z_v = \dot{b}_{v1} + \dot{b}_{v2} + \dot{b}_{v3}; v = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Путём объединения соотношений (6) и (10) представим следующие линейные алгебраические уравнения относительно неизвестных параметров z_{v1} , z_v , \dot{u}_{v2} , \dot{u}_{v3} :

$$\begin{aligned} i_{v1} z_{v1} + j_v z_v &= \dot{b}_{v1}; \\ \dot{u}_{v2} + j_v z_v &= \dot{b}_{v2}; \\ \dot{u}_{v3} + j_v z_v &= \dot{b}_{v3}; \\ j_v z_{v1} + 3j_v z_v &= \dot{b}_{v4}; v = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\dot{u}_{v1} = i_{v1} z_{v1}$; $\dot{b}_{v4} = \dot{b}_{v1} + \dot{b}_{v2} + \dot{b}_{v3}$.

Введём в рассмотрение векторы x_v , b_v и матрицу A_v

$$x_v = \begin{bmatrix} z_{v1} \\ z_v \\ \dot{u}_{v2} \\ \dot{u}_{v3} \end{bmatrix}, \quad b_v = \begin{bmatrix} \dot{b}_{v1} \\ \dot{b}_{v2} \\ \dot{b}_{v3} \\ \dot{b}_{v4} \end{bmatrix},$$

$$A_v = \begin{bmatrix} i_{v1} & j_v & 0 & 0 \\ 0 & j_v & 1 & 0 \\ 0 & j_v & 0 & 1 \\ j_v & 3j_v & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда систему уравнений (11) можно записать в векторно-матричной форме

$$A_v x_v = b_v; v = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Нетрудно показать, что матрицы A_v имеют следующие определители:

$$\begin{aligned} \det A_v &= \det \begin{bmatrix} i_{v1} & j_v & 0 & 0 \\ 0 & j_v & 1 & 0 \\ 0 & j_v & 0 & 1 \\ j_v & 3j_v & 0 & 0 \end{bmatrix} = \\ &= 3j_v (i_{v1} - j_v); v = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Последние свидетельствуют, что если $j_v \neq 0$ (т. е. РЭС функционирует в несимметричном режиме), определитель $\det A_v \neq 0$ и система уравнений (12) имеет единственное решение для каждого v -го контура сети. В этом случае решения задачи можно найти в явной форме [12]:

$$x_v = A_v^{-1} b_v; v = \overline{1, n},$$

где A_v^{-1} — обратная матрица.

В координатной форме эти параметры определяются по формулам

$$\begin{aligned} z_v &= \frac{\dot{b}_{v4} i_{v1} - j_v \dot{b}_{v1}}{j_v (3i_{v1} - j_v)}; z_{v1} = \dot{b}_{v1} - j_v z_v; \\ \dot{u}_{v2} &= \dot{b}_{v2} - j_v z_v; \\ \dot{u}_{v3} &= \dot{b}_{v3} - j_v z_v. \end{aligned} \quad (13)$$

Следует отметить, что оценки элементов матрицы Z и вектора параметров Z_0 получены в режиме нормального функционирования РЭС, которые записываются и хранятся в базе данных КД. В дальнейшем их можно использовать для решения ряда функциональных задач в составе АСКУЭ, в частности для идентификации электрического состояния РЭС и оценки уровня износа электрических линий.

Идентификация состояния трёхфазной сети

Предположим, что в следующем интервале наблюдения $[t_{k+1}, t_{k+2}]$ не выполняются условия (1), т. е. РЭС переходит в возмущённое состояние, что обусловлено наличием в ней внешних возмущающих факторов. Задача состоит в оценке электрического состояния сети в таких условиях. С этой целью используем балансовые уравнения (6) для напряжений, которые с учётом формул (4) представим в виде:

$$z_{vk} i_{vk} + (i_{v1} + i_{v2} + i_{v3}) z_v = \dot{b}_{vk};$$

$$v = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}, \quad (14)$$

где оценки значений сопротивлений z_{vk} и z_v межабонентских участков сети предполагаются уже известными и хранятся в базе данных КД.

Приведя подобные члены, соотношения (14) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} (z_{v1} + z_v) i_{v1} + z_v i_{v2} + z_v i_{v3} &= \dot{b}_{v1}; \\ z_v i_{v1} + (z_{v2} + z_v) i_{v2} + z_v i_{v3} &= \dot{b}_{v2}; \\ z_v i_{v1} + z_v i_{v2} + (z_{v3} + z_v) i_{v3} &= \dot{b}_{v3}; \\ v &= \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (15)$$

Решение систем уравнений (15) методом Крамера можно представить в явной форме [12]:

$$i_{v1} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; i_{v2} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; i_{v3} = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= z_{v1} z_{v2} z_{v3} + z_v (z_{v1} z_{v2} + z_{v1} z_{v3} + z_{v2} z_{v3}); \\ \Delta_1 &= \dot{b}_{v1} (z_{v2} z_{v3} + z_{v2} z_v + z_{v3} z_v) - \\ &\quad - \dot{b}_{v2} z_v z_{v3} - \dot{b}_{v3} z_v z_{v2}; \\ \Delta_2 &= \dot{b}_{v2} (z_{v1} z_{v3} + z_{v1} z_v + z_{v3} z_v) - \\ &\quad - (\dot{b}_{v3} z_{v1} + \dot{b}_{v1} z_{v3}) z_v; \\ \Delta_3 &= \dot{b}_{v3} (z_{v1} z_{v2} + z_{v1} z_v + z_{v2} z_v) - \\ &\quad - (\dot{b}_{v2} z_{v2} + \dot{b}_{v2} z_{v1}) z_v; v = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

На основе найденных межабонентских токов, определяемых выражениями (16), искомые комплексные токи j_v и напряжения \dot{u}_{vk} , \dot{u}_v рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} j_v &= i_{v1} + i_{v2} + i_{v3}; \dot{u}_{vk} = i_{vk} z_{vk}; \\ \dot{u}_v &= j_v z_v; v = \overline{1, n}; k = \overline{1, 3}. \end{aligned}$$

Полученные результаты можно использовать для решения задач мониторинга состояния РЭС и идентификации потерь электроэнергии в режиме реального времени.

Выводы

1. Предложен метод оценки недоступных для измерения и контроля переменных состояния трёхфазной распределительной электрической сети напряжением 0,4 кВ, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений и наличия в ней несанкционированных отборов электроэнергии. Реализация метода осуществляется на основе предварительной идентификации параметров сети, таких как сопротивления ее межабонентских участков магистральной линии с использованием измерительных данных, полученных с группы счётчиков электроэнергии, которые установлены у абонентов сети.

2. Для идентификации параметров и переменных состояния сети построены модели физических процессов, протекающих в её цепях, в виде системы