

Контроль. Диагностика

Научно-технический журнал

№1 (январь) 2019

Контроль КОМПОЗИТНЫХ материалов



Акустический импедансный дефектоскоп

АД-50К

- Поиск дефектов в композитных материалах и сотовых конструкциях;
- Контроль на наличие трещин в углепластиках и других токопроводящих материалах;
- Измерение электропроводности и толщины покрытий на проводящих материалах;
- Импедансный, велосимметрический, вихретоковый и метод свободных колебаний в одном приборе;
- Диапазон рабочих температур: от -30 С до +55 С;
- Масса прибора (с аккумуляторами): 1,5 кг.

КРОПУС
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР

Гарантия 3 года

+7 (800) 500-62-98
sales@kropus.com
kropus.com



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В. В. Ключев, д-р техн. наук, проф., акад. РАН,
член Европейской академии

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Э. С. Горкунов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН
В. Г. Шевальдыкин, д-р техн. наук, проф.
П. Е. Клейзер

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Б. В. Артемьев, д-р техн. наук, проф.
В. Т. Бобров, д-р техн. наук, проф.
О. Н. Будадин, д-р техн. наук
А. А. Буклей, д-р техн. наук
В. П. Вавилов, д-р техн. наук, проф.
Д. И. Галкин, канд. техн. наук
В. А. Голенков, д-р техн. наук, проф.
А. Г. Ефимов, д-р техн. наук
Г. В. Зусман, д-р техн. наук
В. В. Коннов, д-р техн. наук, проф.
Н. Н. Коновалов, д-р техн. наук
Н. Р. Кузелев, д-р техн. наук, проф.
А. Р. Маслов, д-р техн. наук, проф.
В. И. Матвеев, канд. техн. наук
Г. А. Нуждин, канд. техн. наук
К. В. Подмастерьев, д-р техн. наук, проф.
А. В. Полупан, д-р техн. наук
С. Г. Сандомирский, д-р техн. наук
Ю. С. Степанов, д-р техн. наук, проф.
Л. Н. Степанова, д-р техн. наук, проф.
В. В. Сухоруков, д-р техн. наук, проф.
В. М. Труханов, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦИЯ:

П. Е. Клейзер, Д. А. Елисеев, С. В. Сидоренко

УЧРЕДИТЕЛИ:

Российское общество по неразрушающему
контролю и технической диагностике (РОНКТД);
ООО «Издательский дом «Спектр»

ИЗДАТЕЛЬ

ООО «Издательский дом «Спектр»
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
Тел.: (495) 514 76 50, 8 (916) 676 12 38
Http://www.idspektr.ru. E-mail: info@idspektr.ru

ПОДПИСКА

В любом почтовом отделении.
Индексы по каталогам агентств:
«Роспечать» – 47649;
«Пресса России» – 29075;
«Почта России» электронный каталог – П3652
Подписка через издательство:
тел. (495) 514 26 34; e-mail: zakaz@idspektr.ru

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
Тел.: (495) 514 76 50, 8 (916) 676 12 38
Http://www.td-j.ru;
E-mail: td@idspektr.ru, tdjpost@gmail.com

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по
надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и
охраны культурного наследия Российской Федерации.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-46328

Верстка: Евсейчев А. И., Корабельникова Г. Ю.
Корректор Евсейчев А. И. Сдано в набор 15.11.2018 г.
Подписано в печать 26.12.2018 г. Формат 60x88 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,89. Уч. изд. л. 8,12. Свободная цена.

Отпечатано в типографии «Майер». 190005, Санкт-Петербург, Троицкий проспект, д. 6, литер В

© ООО «Издательский дом «Спектр»

Контроль. Диагностика

Научно-технический журнал

1 (247) январь 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Данилов В. Н.

Модели расчета эхосигнала, регистрируемого наклонным преобразователем с прямоугольной пьезопластиной на образце СО-3

4

Посадов В. В., Посадова О. Л., Ибрагимов О. Я., Колесова Е. Н.

Диагностирование режима резонанса рабочих лопаток при проведении резонансных испытаний в составе газотурбинного двигателя

16

Бадалян В. Г.

Возможности ультразвуковой дефектотрии и риск-ориентированный подход в диагностике

22

Коновалов А. М., Кугушев В. И., Яковлев А. Ю.

Импедансный датчик для неразрушающего контроля жестких металлических конструкций

32

Эминов Р. А., Мурсалов Н. З., Абдуллаева С. Н.

Двухволновый модельный метод определения толщины нефтяной эмульсии на поверхности моря в инфракрасном диапазоне

38

Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Васильев С. А., Медведков О. И., Козельская С. О.

Исследование встроенной волоконно-оптической системы диагностики углепластика после воздействия технологических режимов формования

42

Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Осмонова Р. Ч., Койбагаров Т. Ж.

Идентификация координаты несанкционированного отбора электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ

50

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2018 году

56

Журнал «Контроль. Диагностика» входит в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней.
При использовании материалов ссылка на журнал «Контроль. Диагностика» обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КООРДИНАТЫ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ОТБОРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ В СОСТАВЕ АСКУЭ



Т. Т. Оморов,
д-р техн. наук, член-кор.,
Национальная академия
наук Кыргызской Республики,
г. Бишкек, Киргизстан.
E-mail: omorovtt@mail.ru



Б. К. Такырбашев,
Национальная академия
наук Кыргызской Республики,
г. Бишкек, Киргизстан.
E-mail: b.takyrbashev@
gmail.com



Р. Ч. Осмонова,
Национальная академия
наук Кыргызской Республики,
г. Бишкек, Киргизстан.
E-mail: r.osmonova@mail.ru



Т. Ж. Койбагаров,
Национальная академия
наук Кыргызской Республики,
г. Бишкек, Киргизстан.
E-mail: koibagarov@bk.ru

Рассматривается распределительная электрическая сеть (РЭС) напряжением 0,4 кВ, функционирующая при наличии несанкционированного отбора электроэнергии (НОЭ). Действие последнего приводит РЭС к возмущенному состоянию, что связано с отклонением ее режима от номинального (желаемого) и значительными техническими и коммерческими потерями электроэнергии. Предлагается метод диагностики НОЭ с идентификацией его координаты по измерительным данным автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), полученным с абонентских электронных счетчиков. Его основу составляет идея математического моделирования и идентификации возмущенного и невозмущенного (желаемого) состояний фаз распределительной сети, в которых действует НОЭ. Метод реализуется с помощью простых вычислительных процедур, его можно использовать для создания специального программного обеспечения подсистемы диагностики распределительной сети в составе АСКУЭ.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, несанкционированный отбор электроэнергии, метод диагностики.

Omorov Turatbek, Takyrbashev Beishenaly, Osmonova Rima,
Koibagarov Taalaibek
(National Academy of Science of the Kyrgyz Republic, Bishkek city,
Kyrgyz Republic)

IDENTIFICATION OF THE COORDINATES OF UNAUTHORIZED WITHDRAWAL OF ELECTRICITY IN DISTRIBUTION NETWORK INCLUDED IN ASMME

Distribution network (Regional electrical network (REN)) with a voltage of 0.4 kV, operating with availability of unauthorized electricity withdrawal (UEW), is considered as the object of the study. The effect of the latter leads the REG to the excited state, which is due to the deviation of its mode from the nominal (desired) and significant technical and commercial losses of electricity. A method for diagnosing UEW with identification of its coordinates according to the metering data of the automated system for monitoring and metering of electricity received from customers electronic meters is proposed. Its basis is the idea of simulation and identification of excited and unexcited (desired) states of the phases of the distribution network in which the UEW exists. The implementation of the method is carried out using simple computational procedures, which is its distinguishing feature in comparison with the known approaches to the solution of the problem under consideration. The proposed method can be used to create special software of subsystem for diagnostics of a distribution network as part of the AMR.

Keywords: distribution electrical network, unauthorized withdrawal of electricity, diagnostics method.



Статья поступила в редакцию 30.05.2018

Received 30.05.2018

В настоящее время в распределительных электрических сетях (РЭС) активно внедряются новые технологии в виде *автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ)* [1]. Как известно, основным функциональным элемен-

том этих систем является *концентратор данных (КД)*, который осуществляет сбор данных со *счетчиков* электроэнергии Сч, установленных у абонентов сети, их хранение, предварительную обработку и передачу необходимой информации в верхний

уровень управления – центральный диспетчерский пункт с использованием каналов связи (PLC, GSM и др.).

Анализ функциональной структуры существующих АСКУЭ показывает, что они в основном предназначены для коммерческого учета электроэнергии, а такие важные функциональные задачи, как диагностика состояний [2 – 5] и оптимизация режимов работы РЭС [6 – 8] в их составе, практически не решаются, что не позволяет достичь требуемых технико-экономических показателей автоматизированных систем и распределительных компаний. В то же время решение указанных функциональных задач, в частности диагностики состояний распределительных сетей в режиме реального времени, требует разработки соответствующих математических моделей и методов, ориентированных для использования в составе АСКУЭ.

Основная трудность при этом заключается в том, что практически большинство РЭС имеют сложную структуру, функционируют в условиях несимметрии токов и напряжений [9 – 11], а также подвержены действию возмущающих факторов, таких как *несанкционированные отборы электроэнергии* (НОЭ) [5, 12, 13], которые вызывают дополнительные технические и коммерческие потери электроэнергии. В этих условиях применение существующих моделей и методов расчета трехфазной сети (методы симметричных составляющих, графов и др.) [14 – 16] представляет определенные сложности. В работе [12] рассматриваются проблемы, связанные с разработкой метода идентификации и локализации НОЭ в трехфазной распределительной сети в условиях несимметрии токов и напряжений. В данной работе предлагается развитие этого метода, направленное на упрощение решения задачи локализации НОЭ и оптимизацию объемов вычислительных операций.

Постановка задачи. Рассматривается четырехпроводная трехфазная сеть с напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рисунке.

Далее принимаются следующие предположения:

1) РЭС функционирует в условиях несимметрии токов и напряжений;

2) ток несанкционированного потребителя (нагрузки) отводится через нейтральный провод;

3) линейные и нейтральный провода сети имеют одинаковые сечения, а текущие значения сопротивлений z_{vk} и z_v *межабонентских участков* (МАУ) предварительно определяются и записываются в базу данных концентратора (КД) АСКУЭ [4];

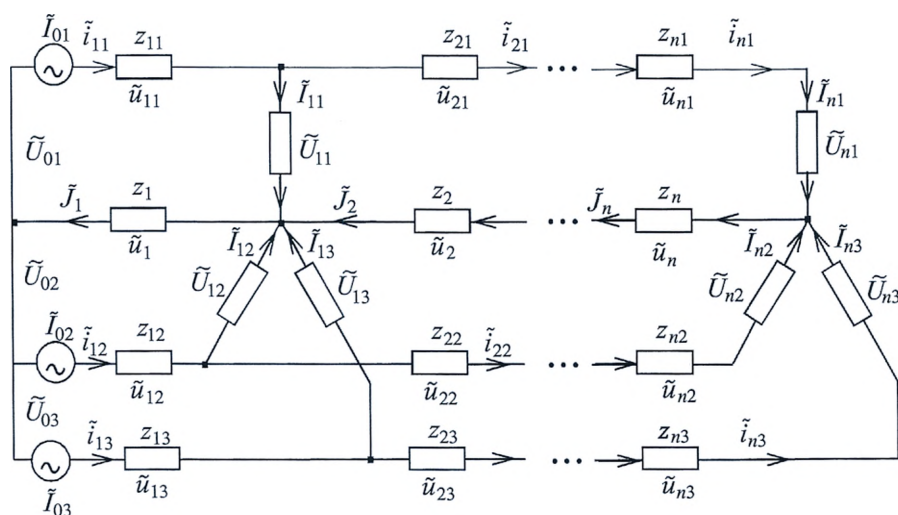
4) *концентратор данных* (КД) периодически осуществляет сбор данных со счетчиков электроэнергии $S_{ч,vk}$ в дискретные моменты времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ с шагом дискретизации $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$, где $\xi = 1, 2, \dots$. При этом в базу данных КД в каждом интервале наблюдения $[t_\xi, t_{\xi+1}]$ поступают следующие данные:

- действующие токи I_{vk} и напряжения U_{vk} на соответствующих нагрузках;
- сдвиги фаз φ_{vk} между соответствующими напряжениями \tilde{U}_{vk} и токами \tilde{I}_{vk} .

Задача состоит в идентификации и локализации координаты несанкционированного потребителя в распределительной сети.

Метод решения задачи. Решение сформулированной задачи состоит из следующих основных этапов:

- 1) идентификация фазы, в которой имеется НОЭ;
- 2) представление переменных сети в комплексной форме;



Расчетная схема трехфазной сети:

k, v – индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз A, B, C ($k = \overline{1,3}$) и электрических контуров сети ($v = \overline{1,n}$); $\tilde{I}_{vk}, \tilde{U}_{vk}$ – синусоидальные мгновенные ток и напряжение на соответствующем электроприемнике (нагрузке) с координатой (v, k) ; \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}_{vk}, z_v – мгновенный ток и сопротивление v -го участка нейтрального провода; $\tilde{U}_{0k}, \tilde{I}_{0k}$ – мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз

3) оценка переменных сети в возмущенном S' и невозмущенном (желаемом) S^0 состояниях;

4) локализация координаты НОЭ.

Идентификация фазы, в которой имеется НОЭ. 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 выражениями:

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

Распределительная сеть характеризуется следующими состояниями:

1) нормальное (желаемое) состояние S^0 ;

2) возмущенное состояние S' .

В нормальном состоянии в РЭС отсутствуют НОЭ и для всех $t \in [t_{\xi}, t_{\xi+1}]$ выполняются следующие соотношения:

$$|I_{0k}(t) - I_k^a(t)| \leq \Delta I_{\max}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где $I_{0k}(t)$ – действующий ток на входе k -го линейного (фазного) провода, измеряемый счетчиком электроэнергии $S_{\text{ч}}$ на выходе источника питания – трансформаторной подстанции (ТП); ΔI_{\max} – максимально допустимая погрешность измерения токов.

Когда хотя бы одно из условий (2) не выполняется, сеть переходит в возмущенное состояние S' , что обуславливается наличием в ней НОЭ. При этом токи, вызванные НОЭ, определяются выражением

$$\Delta \tilde{I}_k(t) = \tilde{I}_{0k}(t) - \tilde{I}_k^a(t), \quad k = \overline{1, 3}, \quad (3)$$

где $\tilde{I}_k^a(t)$ – сумма абонентских токов, которую находят по формуле (1).

Для определенности далее предположим, что в сети действует только один несанкционированный потребитель, подключенный к фазе с номером μ , где $\mu \in M$, а M – дискретное подмножество, состоящее из трех элементов, обозначающих номера фаз сети. При этом комплексный ток $\Delta \dot{I}_{\mu}$ несанкционированной нагрузки в соответствии с выражением (3) определяется по формуле

$$\Delta \dot{I}_{\mu} = \dot{I}_{0\mu} - \dot{I}_{\mu}^a. \quad (4)$$

Очевидно, что место действия несанкционированного потребителя делит линейный (фазный) провод μ -й фазы на две части соответственно с

длинами $l_{1\mu}$ и $l_{2\mu}$, где $l_{1\mu}$ отсчитывается от источника питания (ТП). Поэтому величину $l_{1\mu}$ можно принять за координату НОЭ. При этом общая длина l_{μ} фазного провода и его общее сопротивление Z_{μ} определяются по следующим формулам:

$$l_{\mu} = l_{1\mu} + l_{2\mu}; \quad Z_{\mu} = Z_{1\mu} + Z_{2\mu},$$

где $l_{2\mu}$ – длина МАУ от места НОЭ до конечного электроприемника; $Z_{1\mu}$, $Z_{2\mu}$ – комплексные сопротивления соответствующих участков рассматриваемого фазного провода.

Представление переменных сети в комплексной форме. Отметим, что счетчики электроэнергии $S_{\text{ч}_{vk}}$, установленные у абонентов сети, измеряют лишь действующие токи и напряжения. При этом для оценки установившихся мгновенных значений межабонентских токов \tilde{i}_{vk} , \tilde{I}_v и напряжений \tilde{u}_{vk} нельзя использовать законы Кирхгофа. Для их корректного применения в данном случае синусоидальные токи и напряжения на электроприемниках необходимо представить в комплексной форме [14, 17]:

$$\dot{I}_{vk} = I_{vk}^{\text{в}} + jI_{vk}^{\text{м}} = I_{vk} e^{j\alpha_{vk}};$$

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

где символы «в» и «м» здесь и далее обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных; I_{vk} , U_{vk} , α_{vk} , ψ_{vk} – модули (действующие токи и напряжения) соответствующих комплексных переменных и их фазовые сдвиги соответственно; $j = \sqrt{-1}$ – мнимое число. Один из возможных методов представления переменных \dot{I}_{vk} и \dot{U}_{vk} в форме (5) предложен в работе [17].

Оценка переменных сети в нормальном (желаемом) и возмущенном состояниях. Идея (концепция) предлагаемого подхода к локализации НОЭ основана на математическом моделировании возмущенного S' и желаемого S^0 состояний трехфазной сети. При этом идентифицируются фактическое $\Delta \dot{I}_{\mu}$ и потенциально (максимально) возможное $\Delta \dot{I}_{\mu \max}$ приращения напряжений на линейном и нейтральном проводах возмущенной фазы, вызванные током $\Delta \dot{I}_{\mu}$ несанкционированного потребителя. Далее формируются математические соотношения, описывающие функциональные связи между указанными приращениями напряжений и параметрами (сопротивлениями) $Z_{1\mu}$ и Z_{μ} . Полученные соотношения далее используются для формирова-

ния алгебраического уравнения, решение которого позволяет определить искомую координату НОЭ, т.е. величину $l_{1\mu}$.

В соответствии с общей концепцией решения сформулированной задачи вначале определим оценку напряжений на линейном \dot{u}_{μ}^0 и нейтральном \dot{u}^0 проводах μ -й фазы при условии, что трехфазная сеть находится в нормальном состоянии S^0 . В этом случае отсутствует ток $\Delta \dot{I}_{\mu}$ несанкционированной нагрузки и выполняются условия (1). Тогда на основе комплексного представления (5) и первого закона Кирхгофа можно вычислить межабонентские токи i_{vk}^0 и токи в нейтральном проводе j_v^0 по следующим формулам [4, 14]:

$$i_{vk}^0 = \sum_{l=v}^n \dot{I}_{lk} = \sum_{l=v}^n (I_{lk}^B + jI_{lk}^M), \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}; \quad (6)$$

$$j_v^0 = i_{v1}^0 + i_{v2}^0 + i_{v3}^0, \quad v = \overline{1, n}.$$

По условиям задачи, комплексные сопротивления $z_{v\mu}$ и z_v МАУ μ -й фазы являются известными величинами и $z_{v\mu} = z_v$. Тогда с учетом формулы (6) соответствующие межабонентские напряжения $u_{v\mu}^0$ и u_v^0 можно вычислить по формулам:

$$u_{v\mu}^0 = i_{v\mu}^0 z_v; \quad (7)$$

$$u_v^0 = j_v^0 z_v; \quad v = \overline{1, n}.$$

При этом напряжение $\dot{u}_{\Sigma\mu}^0$ на возмущенном межабонентском участке сети в нормальном ее состоянии S^0 определяется как сумма потерь напряжений на линейном \dot{u}_{μ}^0 и нейтральном \dot{u}^0 проводах:

$$\dot{u}_{\Sigma\mu}^0 = \dot{u}_{\mu}^0 + \dot{u}^0, \quad (8)$$

где

$$\dot{u}_{\mu}^0 = \sum_{v=1}^n \dot{u}_{v\mu}^0; \quad \dot{u}^0 = \sum_{v=1}^n \dot{u}_v^0,$$

а величины напряжений $\dot{u}_{v\mu}^0$ и \dot{u}_v^0 вычисляются по формуле (7).

Теперь определим оценку напряжения $\dot{u}'_{\Sigma\mu}$ в μ -й фазе в возмущенном состоянии S' сети. Для этой цели рассмотрим балансовые соотношения для напряжений в контурах рассматриваемой фазы (см. рисунок):

$$\dot{U}'_{v\mu} = \Delta \dot{u}'_{(v+1)\mu} + \dot{U}'_{(v+1)\mu}, \quad v = \overline{0, n-1},$$

где $\Delta \dot{u}'_{(v+1)\mu} = \dot{U}'_{(v+1)\mu} + u'_{v+1}$ – напряжения на участках линейного и нейтрального проводов μ -й фазы за счет действия несанкционированного потребителя. Величины этих напряжений определяются следующими выражениями:

$$\Delta \dot{u}'_{(v+1)\mu} = \dot{U}'_{v\mu} - \dot{U}'_{(v+1)\mu}, \quad v = \overline{0, n-1}, \quad (9)$$

так как напряжения $\dot{U}'_{v\mu}$ и $\dot{U}'_{(v+1)\mu}$ являются известными комплексными величинами, представленными в форме (5). В результате идентификацию величины напряжения $\dot{u}'_{\Sigma\mu}$ в μ -й фазе в возмущенном состоянии S' сети можно осуществить по формуле

$$\dot{u}'_{\Sigma\mu} = \sum_{v=1}^n \Delta \dot{u}'_{v\mu}, \quad (10)$$

где напряжения $\Delta \dot{u}'_{\Sigma\mu}$ вычисляются по формуле (9).

Локализация координат НОЭ. Для оценки потенциально (максимально) возможного приращения напряжения $\dot{u}_{\max\mu}$ на линейном и нейтральном проводах μ -й фазы, вызванного НОЭ, предполагается, что несанкционированный потребитель действует в конце μ -й фазы. В этом случае с учетом того, что $z_{v\mu} = z_v$, искомую величину $\dot{u}_{\max\mu}$ можно вычислить по формуле

$$\dot{u}_{\max\mu} = 2\Delta \dot{I}_{\mu} \sum_{v=1}^n z_v = 2\Delta \dot{I}_{\mu} Z_{\mu} = u_{\max\mu}^B + ju_{\max\mu}^M, \quad (11)$$

где $\Delta \dot{I}_{\mu}$ – комплексный ток несанкционированного потребителя, определяемый по формуле (4); $u_{\max\mu}^B$, $u_{\max\mu}^M$ – вещественная и мнимая части комплексного напряжения $\dot{u}_{\max\mu}$. Отметим, что все величины, входящие в выражение (11), по условиям задачи являются известными.

Тогда приращение напряжения $\Delta \dot{u}_{\mu}$ на начальном участке возмущенной μ -й фазы длиной $l_{1\mu}$, на который распространяется действие несанкционированного потребителя, определяется следующей разностью:

$$\Delta \dot{u}_{\mu} = \dot{u}'_{\Sigma\mu} - \dot{u}_{\Sigma\mu}^0 = \Delta u_{\mu}^B + j\Delta u_{\mu}^M, \quad (12)$$

где суммарные напряжения $\dot{u}'_{\Sigma\mu}$ и $\dot{u}_{\Sigma\mu}^0$ вычисляются соответственно по формулам (8) и (10).

Так как приращение напряжения $\Delta \dot{u}_\mu$, определяемое формулой (12), вызывается током $\Delta \dot{I}_\mu$ несанкционированной нагрузки, то можно считать, что

$$\Delta \dot{u}_\mu = 2\Delta \dot{I}_\mu Z_{1\mu}. \quad (13)$$

В результате на основе выражений (11) и (13) можно записать алгебраическое соотношение

$$\frac{\Delta \dot{u}_\mu}{\dot{u}_{\max\mu}} = \frac{Z_{1\mu}}{Z_\mu}, \quad (14)$$

где

$$Z_{1\mu} = Z_{1\mu}^B + jZ_{1\mu}^M; \quad Z_\mu = Z_\mu^B + jZ_\mu^M.$$

Введем в рассмотрение модули комплексных величин, входящих в соотношение (14):

$$\Delta \bar{u}_\mu = \sqrt{(\Delta u_{\mu}^B)^2 + (\Delta u_{\mu}^M)^2};$$

$$\bar{u}_{\max\mu} = \sqrt{(\Delta u_{\max\mu}^B)^2 + (\Delta u_{\max\mu}^M)^2};$$

$$\bar{Z}_{1\mu} = \sqrt{(Z_{1\mu}^B)^2 + (Z_{1\mu}^M)^2}; \quad \bar{Z}_\mu = \sqrt{(Z_\mu^B)^2 + (Z_\mu^M)^2}.$$

Теперь соотношение (14) можно представить в модульной форме:

$$\frac{\Delta \bar{u}_\mu}{\bar{u}_{\max\mu}} = \frac{\bar{Z}_{1\mu}}{\bar{Z}_\mu}. \quad (15)$$

Как известно, модули сопротивлений можно вычислить по следующим формулам [18]:

$$\bar{Z}_{1\mu} = \rho l_{1\mu}; \quad \bar{Z}_\mu = \rho l_\mu, \quad (16)$$

где ρ – удельное сопротивление линейных и нейтрального проводов сети.

С учетом выражений (16) на основе соотношения (15) получаем следующее уравнение относительно $l_{1\mu}$:

$$\frac{\Delta \bar{u}_\mu}{\bar{u}_{\max\mu}} = \frac{l_{1\mu}}{l_\mu}. \quad (17)$$

Отсюда оценка искомой координаты несанкционированного потребителя определяется в явной форме:

$$l_{1\mu} = \frac{\Delta \bar{u}_\mu l_\mu}{\bar{u}_{\max\mu}}. \quad (18)$$

Полученные результаты легко распространяются на случай, когда в каждой фазе распределительной сети одновременно действуют по одному несанкционированному потребителю.

Выводы

Предложен новый метод локализации координаты несанкционированного отбора электроэнергии в несимметричных распределительных сетях напряжением 0,4 кВ. Идея идентификации основана на математическом моделировании процесса функционирования РЭС и на оценке приращений напряжений в сети, вызванных действием несанкционированного потребителя. Получены функциональные соотношения между указанными величинами и параметрами (сопротивлениями) сети, использование которых дало возможность идентифицировать координату несанкционированного отбора электроэнергии. Реализация вычислительной процедуры разработанного подхода базируется на простых вычислительных операциях, что существенно отличает его от известных в настоящее время методов.

Предложенный метод можно использовать для создания алгоритмического и специального программного обеспечения подсистемы диагностики распределительной сети в составе АСКУЭ.

Библиографический список

1. Ожегов А. Н. Системы АСКУЭ. Киров: ВятГУ. 2006. 102 с.
2. Киншт Н. В., Петрунько Н. Н. Диагностика электрических цепей и систем. Владивосток: Дальнаука. 2013. 242 с.
3. Ершов А. М., Филатов О. В., Млоток А. В. и др. Система защиты электрической сети напряжением 380 В от обрывов проводов воздушной линии // Электрические станции. 2016. № 5. С. 28 – 33.
4. Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К. Диагностика состояний электрических линий распределительных сетей в составе АСКУЭ // Контроль. Диагностика. 2017. № 5. С. 44 – 48.
5. Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 10. С. 651 – 656.
6. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат. 1988. 288 с.
7. Войтов О. Н., Мантров В. А., Семенова Л. В. Анализ несимметричных режимов электроэнергетических систем и управление ими // Электричество. 1999. № 10. С. 2 – 18.
8. Omorov T. T., Takyrbashev B. K., Osmonova R. Ch. Synthesis of the managing director of the subsystem for optimization of the operating mode of the distributive electric network // Engineering Studies. 2016. N 3. P. 606 – 615.
9. Пономаренко О. И., Холиддинов И. Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения // Энергетик. 2015. № 12. С. 6 – 8.

10. Арутюнян А. Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях // *Электричество*. 2015. № 10. С. 55 – 58.

11. 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.

12. Оморов Т. Т. К проблеме локализации несанкционированного отбора электроэнергии в распределительных сетях в составе АСКУЭ // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2017. № 7. С. 27 – 32.

13. Сапронов А. А., Кузечков С. Л., Тынянский В. Г. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ // *Изв. вузов. Сер. Электромеханика*. 2004. № 1. С. 55 – 58.

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

15. Кочергин С. В., Кобелев А. В., Хребтов Н. А. и др. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ // *Fractalsimulation*. 2013. № 1. С. 5 – 13.

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

17. Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Осмонова Р. Ч. К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика*. 2017. № 1. С. 21 – 28.

18. Аржанников Е. А., Лукоянов В. Ю., Мисриханов М. Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.

References

1. Ozhegov A. N. (2006). *ASKUE systems*. Kirov: VyatGU. [in Russian language]

2. Kinsht N. V., Petrun'ko N. N. (2013). *Diagnostics of electrical circuits and systems*. Vladivostok: Dal'nauka. [in Russian language]

3. Ershov A. M., Filatov O. V., Mlotok A. V. et al. (2016). System of protection of an electric network with a voltage of 380 V from breaks of wires of the overhead line. *Elektricheskie stantsii*, (5), pp. 28-33. [in Russian language]

4. Omorov T. T., Takyrbashev B. K. (2017). Diagnostics of the state of electric lines of distribution networks as part of ASKUE. *Kontrol'. Diagnostika*, (5), pp. 44-48. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2017.05.pp.044-048

5. Omorov T. T., Takyrbashev B. K. (2016). Identification of the state of the distribution network in automation

systems for energy metering and control. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, (10), pp. 651-656. [in Russian language]

6. Idel'chik V. I. (1988). *Calculations and optimization of electrical networks and systems*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian language]

7. Voytov O. N., Mantrov V. A., Semenova L. V. (1999). Analysis of asymmetric modes of electric power systems and their management. *Elektrichestvo*, (10), pp. 2-18. [in Russian language]

8. Omorov T. T., Takyrbashev B. K., Osmonova R. Ch. (2016). Synthesis of the managing director of the subsystem for optimization of the operating mode of the distributive electric network. *Engineering Studies*, (3), pp. 606-615.

9. Ponomarenko O. I., Holiddinov I. H. (2015). Influence of asymmetrical modes on power losses in electrical networks of distributed power supply systems. *Energetik*, (12), pp. 6-8. [in Russian language]

10. Arutyunyan A. G. (2015). On the calculation of additional power losses in three-phase four-wire networks. *Elektrichestvo*, (10), pp. 55-58. [in Russian language]

11. Kosouhov F. D., Vasil'ev N. V., Filippov A. O. (2014). Reduction of losses due to asymmetry of currents and improvement of the quality of electrical energy in 0.38 kV networks with utility loads. *Elektrotekhnik*, (6), pp. 8-12. [in Russian language]

12. Omorov T. T. (2017). To the problem of the localization of unauthorized power take-off in distribution networks as part of ASKUE. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, (7), pp. 27-32. [in Russian language]

13. Sapronov A. A., Kuzhekov S. L., Tynyanskiy V. G. (2004). Rapid detection of uncontrolled electricity consumption in electrical networks with voltage up to 1 kV. *Izvestiya vuzov. Seriya Elektromekhanika*, (1), pp. 55-58. [in Russian language]

14. Demirchyan K. S., Neyman L. R., Korovkin A. V. (2009). *Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 1*. Saint Petersburg: Piter. [in Russian language]

15. Kochergin S. V., Kobleev A. V., Hrebtov N. A. et al. (2013). Modeling 10 / 0.4 kV rural distribution electric networks. *Fractalsimulation*, (1), pp. 5-13. [in Russian language]

16. Zhelezko Yu. S. (2009). *Electricity loss. Reactive power. Power quality*. Moscow: ENAS. [in Russian language]

17. Omorov T. T., Takyrbashev B. K., Osmonova R. Ch. (2017). To the problem of modeling asymmetrical distribution electrical networks as part of ASKUE. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika*, (1), pp. 21-28. [in Russian language]

18. Arzhannikov E. A., Lukoyanov V. Yu., Misrihanov M. Sh. (2003). *Determination of the location of a short circuit on high-voltage power lines*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian language]