

МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Бирюлин Владимир Иванович
Куделина Дарья Васильевна
Ларин Олег Михайлович

Юго-Западный государственный университет

Для контроля изоляции кабельных линий и самонесущих изолированных проводов, имеющих схожую конструкцию с кабелями, промышленностью выпускаются устройства, реагирующие на токи нулевой последовательности, возникающие в электрической сети при замыкании одной фазы на землю или снижении уровня фазной изоляции относительно земли. На правильную работу данных устройств могут воздействовать несколько факторов, которые при неблагоприятных условиях приведут к ложному срабатыванию устройства контроля изоляции кабельной линии (несимметричная нагрузка, нелинейная нагрузка и др.). С целью исключения влияния описанных выше факторов авторами обоснован метод определения уровня текущего состояния изоляции кабельных линий, позволяющий повысить точность определения истинной причины возникновения токов нулевой последовательности, которые появляются в электрической сети как при повреждениях изоляции, так и при несимметричной нагрузке. Измерения токов нулевой последовательности предлагается проводить двумя измерительными комплектами, расположенными в начале и конце линии, а оценку состояния изоляции – по разности токов начала и конца защищаемой линии. При нормальном состоянии изоляции эта разность будет близкой к нулю даже при наличии несимметричной нагрузки и других подобных факторов. В случае заметного снижения уровня изоляции эта разность станет отличной от нуля, что является сигналом о начале развития дефекта в изоляции. Предлагаемое авторами измерение активных составляющих токов в начале и в конце линии позволяет исключить влияние ёмкостных токов линии на устройства контроля изоляции, что повышает точность определения места возникновения повреждения изоляции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изоляция, кабельная линия, токи, нулевая последовательность, контроль изоляции, несимметричная нагрузка, нелинейная нагрузка.

TESTING METHOD OF INSULATION CONDITION OF CABLE LINES

Biryulin Vladimir I.
Kudelina Daria V.
Larin Oleg M.

South-West State University

In order to control the insulation of cable lines and self-supporting insulated wires that have a similar design to cables, the industry produces devices that respond to zero-sequence currents that occur in the electrical network at phase-to-ground short circuit or when the level of phase isolation connected to earth decreases. The correct operation of these devices may be affected by several factors that, under unfavorable conditions, will lead to false triggering of the cable line insulation monitoring device, such as unbalanced load, non-linear load, etc. In order to exclude the influence of the factors described above, the authors justify a method for determining the level of the insulation condition of cable lines, which makes it possible to increase the accuracy of determining the true cause of zero-sequence currents that appear in the electrical network both when insulation is damaged and when an unbalanced load occurs. It is proposed to measure zero-sequence currents using two measuring sets located at the beginning and at the end of the line, and to evaluate the insulation condition using the difference between the currents at the start and at the end of the protected line. Under normal insulation conditions, this difference will be close to zero even if there is an asymmetric load and other similar factors. In the case of a noticeable decrease in the insulation level, this difference will be different from zero, which is a signal of the beginning of the development of an insulation defect. The measurement of active components of currents at the beginning and at the end of the line proposed by the authors makes it possible to exclude the influence of capacitive line currents on insulation monitoring devices, which increases the accuracy of determining the location of insulation damage.

KEYWORDS: insulation, cable line, currents, zero sequence, insulation control, unbalanced load, nonlinear load.

Введение

Характер сельскохозяйственного производства в последние годы кардинально изменился. Электроэнергия применяется для теплоснабжения объектов производственного назначения, общая мощность электроустановок достигает 400 кВт в одном пункте. На современных животноводческих и птицеводческих предприятиях, особенно на крупных фермах и комплексах, появились новые потребители электроэнергии, например установки для обеспечения микроклимата в помещениях.

С возрастанием роли электроэнергии в аграрном производстве повышается значение бесперебойной работы систем электроснабжения различных сельскохозяйственных предприятий и производств [5], так как существует постоянный риск перебоев электропитания, что может привести к порче оборудования, нарушению условий жизнеобеспечения сельскохозяйственных животных и, как следствие, к материальному ущербу. Так, в 2005 г. при крупной аварии, возникшей на подстанции «Чагино» на юго-востоке Москвы, аварийный перерыв в электроснабжении вызвал нарушения технологического процесса на 9 птицефабриках из 26, находящихся на территории Московской области, погибло более 1 млн кур, ущерб исчислялся миллионами рублей [2].

Перерывы в электроснабжении сельскохозяйственных объектов, создававшие значительный ущерб, возникали и в других регионах России. Так, в апреле 2013 г. произошло отключение электроэнергии на нескольких объектах птицефабрики ЗАО «Курский агрохолдинг» в Горшеченском районе Курской области. Перерыв в электроснабжении птицефабрики привел к гибели 800 тыс. цыплят.

Отказы электроэнергетического оборудования в системах электроснабжения, возникающие в условиях эксплуатации, можно разделить на внезапные и постепенные [6].

При постепенных отказах происходит медленное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих работоспособность оборудования (например, сопротивление изоляции), с последующим выходом этих параметров за допустимые пределы. Развитие постепенных отказов напрямую связано с различными внутренними физико-химическими процессами, протекающими в конструкционных материалах электрооборудования.

При внезапных отказах, зачастую связанных с резкими внешними воздействиями, изменение параметров оборудования происходит с большой скоростью. Исходя из этого можно утверждать, что организация контроля развития внутренних неблагоприятных процессов в электрооборудовании, особенно в изоляции, является актуальной задачей для повышения надёжности различных систем электроснабжения.

Для систем сельского электроснабжения характерно наличие следующих существенных особенностей:

- значительная длина питающих линий;
- сложность построения электрических схем;
- недостаточность информации о режимах работы потребителей электрической энергии;
- большая протяжённость обслуживаемых электрических сетей различных классов напряжения на одно предприятие электросети [1].

В сельских электрических сетях возникает большое число разных аварийных и плановых отключений электрооборудования и перерывов в электроснабжении. Высокая степень износа электрических сетей приводит к увеличению продолжительности перерывов в подаче электроэнергии сельским объектам до 75 часов в год [9]. Для систем электроснабжения потребителей сельской местности характерно преобладание воздушных линий электропередачи, в отличие от систем электроснабжения городов и промышленных предприятий, в которых используются преимущественно кабельные линии электропередачи.

В настоящее время при строительстве и реконструкции электрических сетей напряжением 0,4 кВ применяются самонесущие изолированные провода (СИП). В этих

проводах токоведущие фазные жилы имеют изоляцию, обеспечивающую необходимое электрическое сопротивление между токоведущими жилами, и заключаются в изолированную оболочку. Нулевая жила может быть как изолированной, так и не имеющей изоляции. Такое построение СИП делает их схожими с силовыми кабелями по конструкции и позволяет использовать схожие методы для оценки их состояния.

Материалы и методы

Краткий анализ методов оценки состояния изоляции кабельных линий, используемых предприятиями электрических сетей, показывает, что наиболее распространённым методом является проведение испытаний изоляции повышенным постоянным (выпрямленным) напряжением. В ходе этих испытаний к кабельным линиям прикладывается повышенное относительно рабочего значения выпрямленное напряжение. Испытательное напряжение подаётся поочередно на каждую токоведущую жилу проверяемого кабеля. Такой порядок проведения испытаний гарантирует адекватную проверку состояния изоляции как между токоведущими жилами и внешними оболочками, так и между токоведущими жилами испытываемого кабеля.

Во время испытаний кабельных линий повышенным выпрямленным напряжением необходимо отключить напряжение на проверяемой кабельной линии, что создаёт перерыв в электроснабжении для потребителей, подключенных к этой линии. Также применение данного метода требует наличия специального выпрямительного высоковольтного устройства. Кроме этого, проведение таких испытаний может создать условия для ускоренного снижения качества кабельной изоляции и изоляции соединительных муфт, потому что испытательное выпрямленное напряжение должно значительно (от 4 до 6 раз) превышать напряжение испытываемой линии, под которым она находится при работе [8].

Для повышения надёжности электроснабжения потребителей и снижения числа кабелей, повреждаемых во время проведения испытаний изоляции кабелей повышенным выпрямленным напряжением, следует использовать неразрушающие методы. Подобные методы испытаний и диагностики кабельных линий, основанные на осуществлении периодических измерений наиболее важных характеристик испытываемой изоляции, обеспечивают получение адекватной информации о текущем состоянии изоляции контролируемых кабелей в данный момент времени, не создавая при этом условий для ускорения развития дефектов и повреждений. Наличие такой информации позволяет переходить от обслуживания по графикам к обслуживанию по необходимости, а также принимать обоснованные управленческие решения по замене кабельных линий с сильно развитыми дефектами изоляции [4].

В настоящее время проводится большое количество разработок в области создания и практического внедрения эффективных методов неразрушающего контроля силовых кабелей при эксплуатации электрических сетей. Из известных на сегодня уже получили широкое распространение следующие методы неразрушающего контроля изоляции кабелей [11, 12]:

- метод измерения характеристик частичных разрядов, возникающих в неоднородностях изоляции;
- метод измерения и анализа возвратного напряжения;
- метод измерения тока релаксации для кабелей, имеющих изоляцию из сшитого полиэтилена;
- метод измерения основных диэлектрических характеристик изоляции.

Все эти методы реализуются с помощью специального дорогостоящего оборудования и должны применяться для проведения испытаний и диагностики состояния изоляции кабельных линий, находящихся в отключенном от электрических сетей состоянии, что приводит к возникновению перерывов в электроснабжении потребителей. Поэтому поиск эффективных методов контроля состояния изоляции на работающих кабельных и воздушных (выполненных на СИП) линиях является актуальным.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время в электрических сетях эксплуатируются различные устройства, осуществляющие постоянный контроль уровня изоляции кабельных линий, находящихся под рабочим напряжением. Работа таких устройств базируется на выявлении токов, относящихся к нулевой последовательности и появляющихся при ослаблении изоляции между фазной жилой кабеля и землей [10]. Определение данных токов производится специальными трансформаторами тока или фильтрами токов нулевой последовательности. Они размещаются на начальных участках кабельных линий [10]. К выходным зажимам этих трансформаторов подключаются устройства контроля изоляции, например устройство сигнализации возникновения замыканий на землю типа УСЗ-3.

Надёжность регистрации на ранней стадии возникающих дефектов в изоляции кабельных линий устройствами, работающими на определение токов нулевой последовательности, может снижаться при недостаточном качестве электрической энергии. Это связано с тем, что в электрических сетях могут возникать токи и напряжения высших гармоник, в частности кратных трём. Известно, что ток третьей и ток кратных ей гармоник имеют одинаковое направление во всех фазах и поэтому эквивалентны токам нулевой последовательности.

Также в контролируемой электрической сети возможно существование токов нулевой последовательности при несимметричных режимах работы потребителей электроэнергии. Кроме этого, токи нулевой последовательности могут возникать в контролируемой кабельной линии при появлении повреждений изоляции у элементов электрической сети, подключённых к рассматриваемой линии.

Все эти факторы могут при неблагоприятных условиях привести к ложным срабатываниям устройств сигнализации или защиты, реагирующих на токи нулевой последовательности. В случае срабатывания этих устройств необходимы дополнительные действия для определения истинной причины срабатывания и отыскания места возникновения повреждения.

Схема возникновения перечисленных неблагоприятных факторов представлена на рисунке 1.

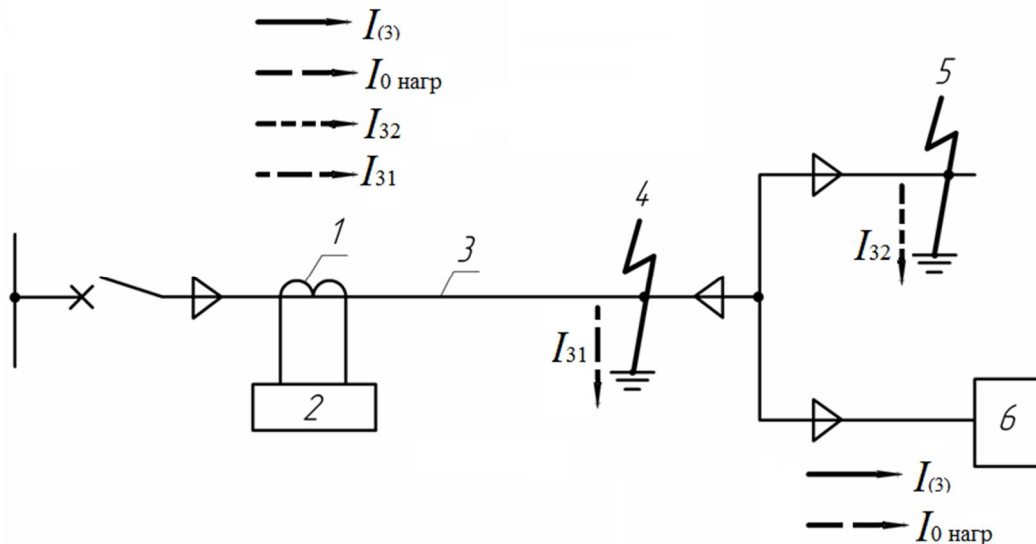


Рис. 1. Факторы, влияющие на работу устройств контроля состояния изоляции:
 1 – трансформатор тока нулевой последовательности; 2 – устройство, реагирующее на токи нулевой последовательности; 3 – кабельная линия; 4, 5 – замыкания на землю; 6 – несимметричная и нелинейная нагрузка

Как следует из вышеизложенного, во всех случаях измерение токов нулевой последовательности только в начале контролируемой линии является недостаточным, потому что повышенные значения этих токов не обеспечивают получение адекватной ин-

формации о текущем состоянии изоляции именно рассматриваемой линии. Чтобы исключить ложное срабатывание устройств контроля состояния изоляции в этих режимах, следует применять два комплекта для измерения токов нулевой последовательности и располагать их как в начале, так и в конце контролируемой кабельной линии (рис. 2) [7].

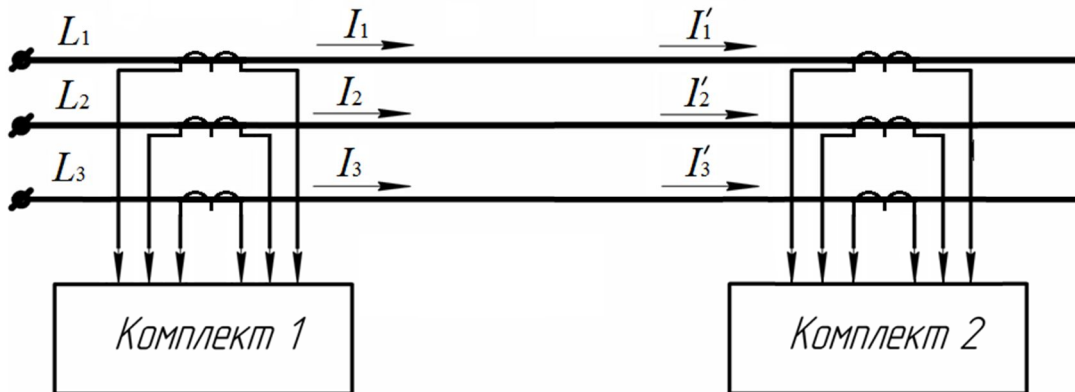


Рис. 2. Структурная схема усовершенствованной системы контроля изоляции кабельной линии с двумя измерительными комплектами

Как видно на рисунке 2, в отличие от применяемых в настоящее время систем контроля изоляции, предлагаемая система измеряет значения токов нулевой последовательности, протекающих по фазам линии в начале (I_1, I_2, I_3) и в конце линии (I'_1, I'_2, I'_3). В случае высокой электрической прочности изоляции линии токи в её начале будут практически равны токам в конце линии, поэтому для рассматриваемого случая можно составить следующие соотношения для каждой фазы:

$$\begin{aligned} \Delta I_1 &= I_1 - I'_1 \approx 0; \\ \Delta I_2 &= I_2 - I'_2 \approx 0; \\ \Delta I_3 &= I_3 - I'_3 \approx 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Приведённые соотношения будут выполняться как при снижении уровня изоляции элементов электрической схемы, питаемых от контролируемой кабельной линии, так и при несимметричной и нелинейной нагрузке.

При снижении величины сопротивления изоляции на контролируемой кабельной линии значения токов в начале и в конце рассматриваемой линии становятся не равными друг другу, поэтому соотношения (1) уже не будут выполняться. Появление неравенства токов начала и конца линии служит сигналом о развитии неблагоприятных процессов в изоляции кабельных линий.

Применение данного метода определения дефектов в изоляции целесообразно для относительно коротких линий, имеющих небольшое значение ёмкостной проводимости. Линии, имеющие большую длину, обладают значительной ёмкостью, что приводит к появлению достаточно большого ёмкостного тока (рис. 3).

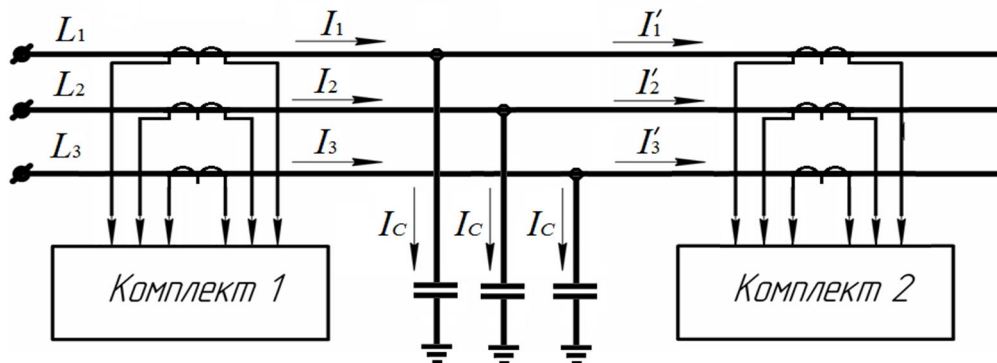


Рис. 3. Распределение токов в кабельной линии с большой ёмкостной проводимостью

С учётом распределения токов в кабельной линии с большой ёмкостной проводимостью (рис. 3) представим соотношения (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta I_1 &= I_1 - I'_1 - I_C \approx 0; \\ \Delta I_2 &= I_2 - I'_2 - I_C \approx 0; \\ \Delta I_3 &= I_3 - I'_3 - I_C \approx 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Как следует из соотношений (2), для определения возникающих дефектов в изоляции необходимо учитывать наличие ёмкостного тока в контролируемой линии.

Для компенсации небаланса токов, возникающего из-за наличия ёмкостной проводимости контролируемой линии и связанного с ней тока, следует осуществлять коррекцию результатов измерений токов начала и конца линии. Предположим, что в рассматриваемой схеме изоляция линии находится в нормальном состоянии, следовательно, полностью выполняются условия соотношения (2). Нагрузка, питающаяся от рассматриваемой линии, имеет активно-индуктивный характер. При таких условиях ток I_2 , напряжение U_2 и угол между ними φ_2 в конце линии можно представить следующей векторной диаграммой (рис. 4).

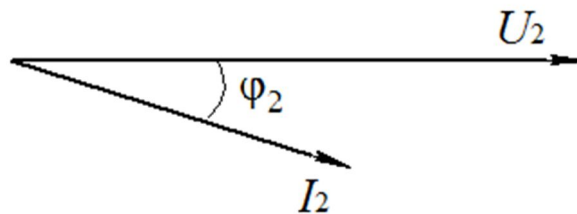


Рис. 4. Векторная диаграмма конца линии

Согласно соотношениям (2) в начале линии ток I_1 будет иметь две составляющие: ток I_2 и ток I_C . Изменением напряжения на линии по величине и фазе можно пренебречь, так как кабельные линии относительно короткие и заметного изменения напряжения на них не возникает. Соответствующая векторная диаграмма начала линии приведена на рисунке 5. Как видно из диаграммы, изменяется величина реактивной составляющей тока I_1 .

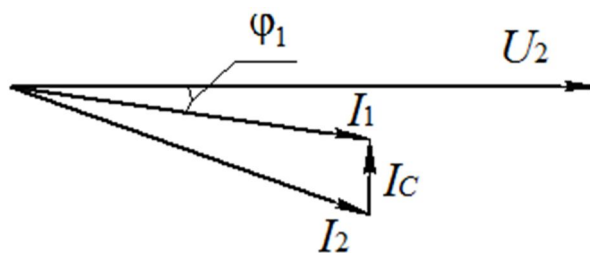


Рис. 5. Векторная диаграмма начала линии при наличии ёмкостного тока

Предположим, что на контролируемой кабельной линии произошло значительное ослабление изоляции, послужившее причиной появления тока утечки. Этот ток протекает в активной проводимости изоляции (поперечная проводимость линии содержит активную и ёмкостную составляющую [3]). Ток начала линии в этом режиме будет равен

$$I_1 = I'_1 - I_C + I_{ут}, \quad (3)$$

где $I_{ут}$ – ток утечки, обусловленный снижением уровня изоляции контролируемой линии.

Для такого режима работы параметры начала линии показаны на соответствующей векторной диаграмме, приведённой на рисунке 6. Теперь активная составляющая увеличилась по сравнению с режимом, представленным на рисунке 5.

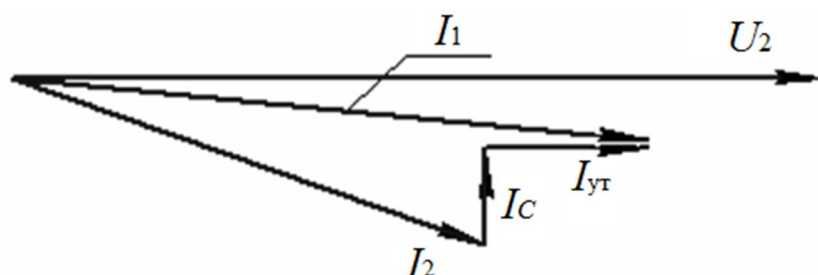


Рис. 6. Векторная диаграмма начала линии при наличии ёмкостного тока и тока утечки изоляции

Для своевременного выявления ослабления изоляции следует определять по данным измерений в начале и конце линии активные составляющие этих токов. При отсутствии заметного ослабления изоляции эти составляющие будут примерно одинаковы, а их разность близкой к нулю.

В процессе снижения уровня изоляции разность активных составляющих токов начала и конца линии будет увеличиваться. При достижении определённого, заранее заданного уровня должен формироваться сигнал о значительном снижении уровня изоляции линии, на основании которого обслуживающий персонал должен принимать решение о проведении тех или иных мероприятий, направленных на поддержание линии в рабочем состоянии.

Выводы

Предложенный метод определения уровня текущего состояния изоляции позволяет чётко определять истинную причину возникновения токов нулевой последовательности. Эти токи появляются в электрической сети как при повреждениях изоляции, так и при несимметричной нагрузке. Сравнение данных токов в начале и в конце линии обеспечивает возможность правильного действия устройств контроля изоляции кабельной линии, так как только при несимметричной нагрузке потребителей или повреждении изоляции вне линии разность токов в начале и в конце линии будет близка к нулю.

При наличии достаточно большой ёмкостной проводимости изоляции кабельной линии в ней существуют токи, протекающие через ёмкости фаз линии относительно земли. Это может привести к созданию довольно большой разности токов в начале и в конце линии и, в конечном итоге, к ложному определению повреждения изоляции контролируемой линии.

Предлагаемое авторами измерение активных составляющих токов в начале и в конце линии позволяет исключить влияние ёмкостных токов линии на устройства контроля изоляции, что повышает точность определения места возникновения повреждения изоляции.

Публикация подготовлена в ходе выполнения государственного задания Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, проект № 0851-2020-0032 «Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем».

Библиографический список

1. Будзко И.А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населённых пунктов : учебник для вузов / И.А. Будзко, М.С. Левин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 320 с.
2. Дьяченко Ю.А. Многокритериальная модель повышения надёжности электроснабжения птицефабрики / Ю.А. Дьяченко // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2012. – № 2 (53). – С. 18–21.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети : учебник для вузов / В.И. Идельчик. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 594 с.
4. Канискин В.А. Кабели 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики / В.А. Канискин, С.А. Коцур, И.Н. Привалов // Новости электротехники. – 2005. – № 5 (35). – С. 25–34.
5. Карачинцев А.В. Диагностирование кабельных линий с целью увеличения надёжности эксплуатации / А.В. Карачинцев // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : труды 8-й Международной науч.-техн. конф. (Россия, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ, 16–17 мая 2012 г.). В 5 ч. Ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. – Москва : ГНУ ВИЭСХ, 2012. – С. 319–323.
6. Конюхова Е.А. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий / Е.А. Конюхова, Э.А. Киреева. – Москва : НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 92 с.
7. Куделина Д.В. Разработка метода для контроля изоляции кабельных линий / Д.В. Куделина, В.В. Руднев // Современные методы и формы научного познания : сб. науч. статей по материалам Международной науч.-практ. конф. (Россия, г. Саратов, 28 августа 2018 г.). – Саратов : ООО ЦПМ «Академия Бизнеса», 2018. – С. 29–34.
8. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : 4-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 2003. – 177 с.
9. Черкасова Н.И. Анализ состояния сельских электрических сетей 10 кВ в свете мониторинга отказов / Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – 2012. – № 4. – С. 49–54.
10. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / М.А. Шабад. – Москва : НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2007. – 64 с.
11. Юртин И.И. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий / И.И. Юртин // Электрик: Международный электротехнический журнал. – 2009. – № 10; № 11–12 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electrician.com.ua/posts/721> (дата обращения: 03.02.2020).
12. Diagnostics of High Voltage PVC Cables / J. Lelak, V. Durman, J. Paska, P. Stasik // Труды Третьей Международной конференции «Электрическая изоляция – 2002» (Proceedings III International Conference on Electrical Insulation-2002). – Санкт-Петербург : СПбГПУ, 2002. – С. 233–237.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Владимир Иванович Бирюлин – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, г. Курск, e-mail: bir1956@mail.ru.
Дарья Васильевна Куделина – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, г. Курск, e-mail: mary_joy@mail.ru.
Олег Михайлович Ларин – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, г. Курск, e-mail: larin77@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 20.07.2020

Дата принятия к печати 10.09.2020

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vladimir I. Biryulin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Power Supply, South-West State University, Russia, Kursk, e-mail: bir1956@mail.ru.
Daria V. Kudelina, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Power Supply, South-West State University, Russia, Kursk, e-mail: mary_joy@mail.ru.
Oleg M. Larin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Power Supply, South-West State University, Russia, Kursk, e-mail: larin77@mail.ru.

Received July 20, 2020

Accepted after revision September 10, 2020