

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.179.18

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63)

Бочкарев И.В.¹, Брякин И.В.²

¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

²Институт автоматики и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Предложен новый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля, согласно которому посредством соответствующих спиновых модуляторов создают направленные переменные электрические поля, которыми одновременно воздействуют на контролируемый кабель и на эталонный дополнительный конечной длины отрезок этого кабеля без дефектов. Тем самым в электропроводящих элементах контролируемого и эталонного кабелей возбуждают волновые процессы поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации и регистрируют посредством соответствующих индукционных датчиков контрольный и эталонный сигналы в виде ЭДС индукции за счет указанных волновых процессов. Формируют в реальном масштабе времени вещественные и мнимые составляющие этих сигналов и по их разностным величинам между вещественными составляющими и между мнимыми составляющими эталонного и контрольного сигналов, по значениям нормированных разностных величин осуществляют допусковый контроль физико-технического состояния электропроводящих элементов контролируемого кабеля. Предложено устройство, реализующее разработанный способ дефектоскопии и позволяющее проводить оперативный контроль качества кабеля. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили его высокую эффективность и достоверность контроля.

Ключевые слова: электрический кабель, электропроводящие элементы, бесконтактный неразрушающий контроль, спиновой модулятор, индукционный датчик, поляризация спиновых магнитных моментов свободных электронов, резонансная частота, диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, синхронные детекторы квадратурной и синфазной составляющих сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Линии электропередач предназначены для транспортировки электрической энергии. Одновременно по ним осуществляется передача различных высокочастотных сигналов – телеметрических данных для измерений и сбора информации для удалённого контроля за состоянием объектов, сигналов релейной защиты и противоаварийной автоматики, диспетчерского управления различными отраслями и т.п. Очевидно, что перебои в работе указанных систем могут привести к весьма серьезным негативным последствиям.

Основу любой линии электропередачи, однозначно определяющую ее работоспособность, составляют электрические кабели и провода. Одной из причин преждевременного выхода из строя этих систем являются дефекты, не обнаруженные в процессе изготовления их электропроводящих элементов. Следовательно, необходимо проводить контроль этих элементов, как с точки зрения отсутствия обрывов и обеспечения требуемых геометрических параметров, так и качества материала, из которого они изготовлены - его структуру, химический состав и т.п. Решающая роль при этом принадлежит методам бесконтактного неразрушающего контроля (БНК) [1, 2]. Это объясняется тем, что неразрушающая диагностика обеспечивает не только контроль, но и управление качеством технических объектов, поскольку она позволяет решать две основные задачи:

- обеспечивает соблюдение предэксплуатационного качества за счет контроля требуемого уровня технических параметров и свойств материалов и комплек-

тующих элементов, используемых при изготовлении и монтаже линий электропередач;

- позволяет оптимизировать процессы отбраковки кабельной продукции путем точной локализации дефектов и, соответственно, возможности осуществления точечного, целенаправленного ремонта или замены конкретного дефектного места.

Очевидно, что контроль параметров кабеля необходимо проводить как во время его изготовления, так и непосредственно перед монтажом и укладкой кабельной линии. Последнее обусловлено тем, что условия хранения и транспортировки кабелей, а также процедуры их подготовки к укладке не идеальны и их электропроводящие элементы могут быть повреждены на любом из указанных этапов.

В настоящее время на рынке существует большое количество систем БНК, использующих различные методы, способы и средства контроля. При этом анализ показывает, что современные требования к системам БНК не могут быть в полной мере реализованы лишь путем их усовершенствования в рамках общеизвестных решений, реализуемых на практике уже многие годы. Поэтому необходим поиск новых путей и способов решения проблемы дефектоскопии электропроводящих элементов кабелей, направленных на повышение точности, оперативности и достоверности решения задач бесконтактного контроля.

РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ДЕФЕКТОСКОПИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Проведенный анализ показал, что известные системы диагностики кабельно-проводниковой продукции в основном направлены на контроль ее изоляции [3, 4]. Однако именно электропроводящие элементы

обеспечивают выполнение ее основных функциональных свойств. Поэтому работы, посвященные созданию новых систем диагностирования технического состояния именно этих основных элементов электрических кабелей и проводов, являются весьма востребованы и имеют высокую практическую ценность. В этом направлении известен ряд работ, базирующихся в основном на использовании вихревого способа БНК [5, 6]. Например, в [7] описан способ бесконтактного диагностического контроля электропроводящих объектов, заключающийся в том, что на продольно перемещающийся контролируемый длинномерный электропроводящий объект воздействуют направленным постоянным магнитным полем, которым в электропроводящих элементах возбуждают вихревой ток. Индукционным датчиком формируют и измеряют контрольный сигнал в виде ЭДС индукции, наведенной электромагнитным полем, образованным вихревым током. По параметрам полученного сигнала осуществляют дефектоскопию электропроводящих объектов. Однако данный способ БНК имеет низкую точность и чувствительность контроля, а также узкую область применения. Невысокие точность и чувствительность объясняются тем, что на величину наводимого вихревого тока существенно влияют величина и равномерность скорости перемещения объекта контроля, а также его поперечные колебания, вибрации и отклонения ориентации от плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Кроме того, результаты контроля зависят от пространственного положения контролируемого объекта относительно датчика. При этом указанные параметры в процессе контроля невозможно обеспечить полностью стабильными.

Относительно ограниченная область применения известного способа объясняется тем, что он не позволяет осуществлять контроль технического состояния медных электропроводящих элементов большого диаметра, парамагнитных металлических проводников, а также электрических кабелей с многожильными элементами.

Для ликвидации указанных недостатков авторами был предложен новый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля, который базируется на принципиально новом физическом эффекте, ранее не использовавшемся в системах БНК [8, 9]. Он заключается в том, что на контролируемый участок кабеля воздействуют перпендикулярно его продольной оси направленным переменным электрическим полем. Этим полем в электропроводящих элементах кабеля возбуждают волновой физический процесс поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации. Формируют и измеряют посредством индукционного датчика контрольный сигнал в виде ЭДС индукции, создаваемой в электропроводящих элементах кабеля за счет указанного волнового физического процесса. Полученный контрольный сигнал подвергают обработке и осуществляют ранжирование дефекта посредством сравнения полученного результата измерения с соответствующим эталонным сигналом, хранящимся в статистической базе данных, составленной по результатам измерения в образцах кабеля с искусственными дефектами в их электропроводящих элементах.

Однако для создания статистической базы эталон-

ных сигналов необходимо провести большое количество измерений, предварительно создав большое количество образцов кабеля с искусственными дефектами в их электропроводящих элементах. Кроме того, при переходе на дефектоскопию очередного типа кабеля с другими эксплуатационными характеристиками необходимо вновь проделать указанные измерения и загрузить их в статистическую базу данных, что существенно затрудняет и удлинняет процесс переналадки системы контроля. Это приводит к повышению сложности и трудоемкости реализации предложенного способа дефектоскопии. Повышенная трудоемкость объясняется также необходимостью постоянного учета влияния температуры или других внешних факторов на текущие параметры контролируемого кабеля и обеспечения тем самым помехоустойчивости системы контроля путем соответствующей дополнительной калибровки ее измерительных блоков в режиме реального времени.

С целью ликвидации указанных недостатков предлагается новый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля. Принципиальная схема реализации предложенного способа показана на рис. 1.

Здесь обозначено: 1 – контролируемый кабель; 2 – эталонный отрезок контролируемого кабеля конечной длины без дефектов; 3 и 4 – первый и второй спиновые модуляторы; 5 и 6 – рабочий и дополнительный индукционные датчики; 7 – источник переменного высокочастотного напряжения.

Спиновые модуляторы 3 и 4 выполнены в виде проходных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов с сосредоточенной емкостью с идентичными конструктивными параметрами, а индукционные датчики 5 и 6 выполнены в виде проходных катушек индуктивности, идентичных по своим конструктивным параметрам.

На контролируемый кабель 1 в зоне контроля воздействуют перпендикулярно его продольной оси направленным переменным электрическим полем \vec{E} . Это поле создают посредством первого спинового модулятора 3 (проходного электрического конденсатора с сосредоточенной емкостью), электроды которого запитывают переменным высокочастотным напряжением вида $U_{\Gamma}(t) = U_m \cos \omega t$.

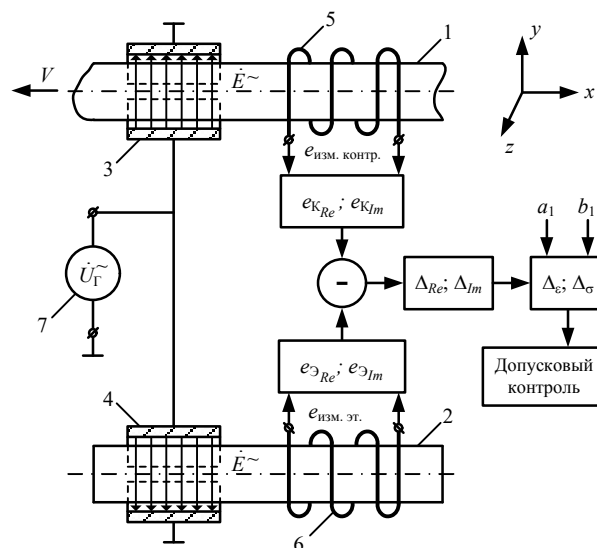


Рис. 1. Принципиальная схема реализации предложенного способа дефектоскопии кабеля

Одновременно это же напряжение подается на электроды второго спинового модулятора 4, который также создает направленное переменное электрическое поле, которым воздействуют на дополнительный эталонный отрезок контролируемого кабеля конечной длины без дефектов перпендикулярно его продольной оси.

Указанные направленные переменные электрические поля возбуждают в электропроводящих элементах контролируемого кабеля 1 и эталонного отрезка кабеля 2 физические процессы поляризации спинов магнитных моментов свободных электронов. Следует отметить, что эти процессы возникают независимо от того, передвигаются кабели относительно спиновых модуляторов или находятся в состоянии покоя. Для создания необходимых условий для возникновения устойчивого процесса поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов переменное электрическое поле создают на резонансной частоте ω_0 поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов электропроводящих элементов кабелей.

Известно, что при распространении в реальных средах различные электродинамические процессы испытывают затухание, то есть происходит потеря энергии, переносимой этими процессами. При этом основные потери в электропроводящей среде связаны с проводимостью, которая для данных сред существенно отличается от нуля.

Для описания изменения фазы и затухания волны при распространении в среде с потерями используется комплексное волновое число \dot{k} . В электропроводящей среде между волновым числом \dot{k} , частотой ω , диэлектрической проницаемостью ε и удельной проводимостью σ существует следующее дисперсионное соотношение [10]:

$$\dot{k} = \sqrt{\varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega}. \quad (1)$$

Для наглядности выражение (1) представим в следующем виде:

$$\dot{k}^2 = \varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega = \alpha + i\beta. \quad (2)$$

Из представленных выражений (1) и (2) следует, что действительная часть α пропорциональна диэлектрической проницаемости среды ε , а мнимая часть β пропорциональна удельной проводимости среды σ .

Для диа- и парамагнетиков, к которым относятся соответственно медь и алюминий, из которых изготавливают электропроводящие элементы кабелей, магнитная проницаемость μ мало отличается от единицы. Следовательно, в (2) будем иметь $\mu_k \approx 1$. Для ферромагнитных материалов величина μ значительно отличается от единицы. Но при этом намагнитченность ферромагнетиков достаточно инерционна. За счет этого в переменном высокочастотном электрическом поле она не успевает изменяться синхронно с полем. Поэтому в отличие от стационарных полей в переменном поле намагнитченность ферромагнетика в среднем оказывается незначительной и значения μ , соответствующие этой намагнитченности, отличаются от единицы незначительно, и можно считать, что для ферромагнетиков в случае поляризации спинов магнитных моментов сво-

бодных электронов направленным переменным электрическим полем $\mu_k \approx 1$ [11].

Следовательно, предлагаемый способ дефектоскопии может быть распространен и на ферромагнитные электропроводящие материалы, которые являются хорошими проводниками.

С учетом выражений (1) и (2) рассмотрим физические процессы, происходящие в электропроводящих структурах кабелей.

Процесс в контролируемом кабеле 1 регистрируют рабочим индукционным датчиком 5, которым формируют контрольный сигнал (КС) в виде ЭДС индукции $U_k(t)$:

$$U_k(t) = e_{\text{кИЗМ}} = -w_k \cdot \frac{d\Phi_{\text{КС}}}{dt} = -w_k \omega_0 S_k B_{\text{ксм}} \cdot \sin(\omega_0 t - \dot{k}_k x), \quad (3)$$

где w_k – количество витков первого индукционного датчика для контролируемого объекта (КО); $\Phi_{\text{КС}}$ – поток спиновой индукции через КО; S_k – средняя площадь сечения КО; $B_{\text{ксм}}$ – амплитудное значение вектора спиновой индукции КО; \dot{k}_k – комплексный коэффициент распространения спиновой волны для КО: $\dot{k}_k^2 = \varepsilon_k \mu_k \omega_0^2 + i\sigma_k \mu_k \omega_0 = \alpha_k + i\beta_k$; ω_0 – резонансная частота спиновой поляризации; ε_k – диэлектрическая проницаемость КО; σ_k – удельная проводимость КО, фактически определяющая электродинамические свойства неферромагнитных металлов; $\mu_k \approx 1$ – магнитная проницаемость КО; α_k – коэффициент фазы спиновой волны при распространении по длине КО; β_k – коэффициент затухания спиновой волны при распространении по длине КО; x – координатная ось, совпадающая с продольной осью КО.

Для комплексного значения КС в соответствии с (1) ÷ (3) можем записать:

$$\dot{U}_k = U_{\text{кRe}} + iU_{\text{кIm}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{кRe}}$ и $U_{\text{кIm}}$ – соответственно вещественная (синфазная) и мнимая (квадратурная) составляющие комплексного значения ЭДС индукции (контрольного сигнала) датчика 5, регистрируемые соответственно синфазным и квадратурным синхронными детекторами измерительного канала КС.

Известно, что в общем случае статическую функцию преобразования (СФП) практически любой измерительной системы можно представить в виде [12]:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1}, \quad (5)$$

где y – выходная величина; a_1, \dots, a_n – параметры СФП; x – измеряемая величина.

Тогда статические функции синхронного и квадратурного преобразования КС в соответствии с (1)–(5) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} U_{\text{кRe}} = a_1 + a_2 \varepsilon_k; \\ U_{\text{кIm}} = b_1 + b_2 \sigma_k, \end{cases} \quad (6)$$

где a_1 и a_2 – параметры статической функции синхрон-

ного преобразования КС; b_1 и b_2 – параметры статической функции квадратурного преобразования КС.

Параметры СФП a_1 и b_1 представляют собой медленно меняющиеся случайные величины, содержащие аддитивную помеху и представляющие собой нулевой дрейфовый сигнал.

Процесс в эталонном отрезке кабеля 2 регистрируют дополнительным индукционным датчиком 6, которым формируется эталонный сигнал (ЭС) в виде ЭДС индукции $U_3(t)$. По аналогии с (3) имеем

$$U_3(t) = e_{\text{эизм}} = -w_3 \frac{d\Phi_{\text{эс}}}{dt} = -w_3 \omega_0 S_3 B_{\text{эсм}} \cdot \sin(\omega_0 t - \dot{k}_3 x), \quad (7)$$

где $w_3 = w_k$ – количество витков второго индукционного датчика для эталонного объекта; $\Phi_{\text{эс}}$ – поток спиновой индукции через ЭО; $S_3 = S_k$ – средняя площадь сечения ЭО; $B_{\text{эсм}} = B_{k\text{см}}$ – амплитудное значение вектора спиновой индукции ЭО; \dot{k}_3 – комплексный коэффициент распространения спиновой волны для ЭО: $\dot{k}_3^2 = \varepsilon_3 \mu_3 \omega_0^2 + i\sigma_3 \mu_3 \omega_0 = \alpha_3 + i\beta_3$; ε_3 – диэлектрическая проницаемость ЭО; σ_3 – удельная проводимость ЭО; ω_0 – резонансная частота спиновой поляризации; $\mu_3 \approx 1$ – магнитная проницаемость ЭО; α_3 – коэффициент, характеризующий распределение амплитуды спиновой волны по длине ЭО; β_3 – коэффициент фазы спиновой волны при распространении по длине ЭО.

Для комплексного значения ЭС в соответствии с (4) можем записать:

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{\text{эRe}} + i\dot{U}_{\text{эIm}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{эRe}}$ и $U_{\text{эIm}}$ – соответственно вещественная (синфазная) и мнимая (квадратурная) составляющие комплексного значения ЭДС индукции (контрольного сигнала) датчика 6, регистрируемые соответственно синфазным и квадратурным синхронными детекторами измерительного канала ЭС.

С учетом того, что индукционные датчики 5 и 6, а также функциональные узлы вторичной обработки КС и ЭС в виде соответствующих наборов синхронных и квадратурных детекторов обладают достаточно высокой степенью идентичности своих параметров, то для статических функций синхронного и квадратурного преобразования ЭС согласно (8) можем аналогично (6) записать:

$$\begin{cases} U_{\text{эRe}} = a_1 + a_2 \varepsilon_3; \\ U_{\text{эIm}} = b_1 + b_2 \sigma_3, \end{cases} \quad (9)$$

где a_2 и b_2 – параметры СФП, определяемые на этапе предварительной калибровки для каждого вида ЭО и обладающие достаточной временной стабильностью.

Решая совместно системы уравнений (6) и (9), определим нормированную разностную величину Δ_ε между вещественными составляющими ЭС и КС и нормированную разностную величину Δ_σ между мнимыми составляющими ЭС и КС:

$$\begin{cases} \Delta_\varepsilon = \frac{U_{\text{эRe}} - U_{\text{кRe}}}{a_2} = \frac{\Delta_{\text{Re}}}{a_2}; \\ \Delta_\sigma = \frac{U_{\text{эIm}} - U_{\text{кIm}}}{b_2} = \frac{\Delta_{\text{Im}}}{b_2}. \end{cases} \quad (10)$$

Посредством нормированных разностных величин Δ_ε и Δ_σ осуществляется допусковый контроль физико-технического состояния КО по диэлектрической проницаемости ε и удельной проводимости σ , результаты которого не зависят от состояния дрейфовых параметров СФП.

В соответствии с изложенным, предлагаемый способ дефектоскопии можно представить в следующей интерпретации:

1. Одновременно воздействуют посредством соответствующих спиновых модуляторов направленным переменным электрическим полем на КО и ЭО.

2. Регистрируют посредством соответствующих индукционных датчиков волновые процессы спиновой поляризации свободных электронов в КО и ЭО.

3. Регистрируют посредством набора синхронных и квадратурных детекторов, синхронизируемых частотой переменного электрического поля, вещественные и мнимые составляющие КС ($e_{\text{кRe}}$ и $e_{\text{кIm}}$) и ЭС ($e_{\text{эRe}}$ и $e_{\text{эIm}}$).

4. Определяют нормированную разностную величину Δ_ε и между вещественными составляющими ЭС и КС и нормированную разностную величину Δ_σ между мнимыми составляющими ЭС и КС, посредством которых осуществляется допусковый контроль физико-технического состояния КО.

Следует отметить, что рассматриваемые процессы спиноволновой динамики существенно отличаются от электродинамических процессов, которые, как правило, сопровождаются возникновением токов проводимости и вихревых токов в электропроводящих структурах с соответствующим разогревом электропроводящего материала и выделением тепловой энергии. В рассматриваемом случае происходит преобразование энергии переменного электрического поля в энергию бегущей волны спиновой поляризации свободных электронов без дополнительных побочных эффектов в виде электромагнитных или тепловых излучений.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Предлагаемый способ дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля можно реализовать посредством различных аппаратных решений, например, при помощи устройства, схема которого приведена на **рис. 2**. На **рис. 2** обозначено: 1 – многожильный кабель (объект контроля); 2 – отрезок многожильного кабеля без дефектов (эталон); 3 и 4 – первый и второй спиновые модуляторы, представляющие собой профильные конденсаторы с двумя полуцилиндрическими электродами; 5 и 6 – первый и второй индукционные датчики в виде регистрирующих проходных катушек индуктивности; 7 – генератор высокочастотного переменного напряжения; 8 – формирователь опорных сигналов; 9 – сумматор; 10 – синхронный детектор квадратурной составляющей сигнала с сумматора 9; 11 – первый масштабный усилитель квадратурного измерительного канала; 12 – первый АЦП квадратурного измерительного

ного канала; 13 – синхронный детектор синфазной составляющей сигнала с сумматора 9; 14 – второй масштабный усилитель синфазного измерительного канала; 15 – второй АЦП синфазного измерительного канала; 16 – электронно-вычислительное устройство; 17 – блок индикации; U_{Γ} – высокочастотное напряжение питания спинового модулятора; U_{κ} – контрольный сигнал, пропорциональный фактическому текущему значению параметров проверяемого кабеля; U_{Σ} – эталонный сигнал, пропорциональный эталонному значению параметров кабеля.

Устройство работает следующим образом. От генератора высокочастотного переменного напряжения 7 к электродам первого 3 и второго 4 спиновых модуляторов подводится напряжение вида $U_{\Gamma} = U = U_m \cos \omega t$. За счет этого в зонах контроля создаются направленные переменные электрические поля \vec{E} , которые действуют соответственно на контролируемый кабель 1 и на дополнительный эталонный отрезок 2 контролируемого кабеля конечной длины без дефектов и возбуждают в электропроводящих элементах этих кабелей 1 и 2 физический процесс поляризации спинов магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации. Процесс в контролируемом кабеле 1 регистрируют первым индукционным датчиком 5, которым формируется контрольный сигнал в виде ЭДС индукции U_{κ} .

Процесс в эталонном отрезке кабеля 2 регистрируют вторым индукционным датчиком 6, которым формируется эталонный сигнал в виде ЭДС индукции U_{Σ} . При этом число витков w_1 в регистрирующей катушке первого индукционного датчика 5 равно числу витков w_2 в регистрирующей катушке второго индукционного датчика 6.

Контрольный U_{κ} и эталонный U_{Σ} сигналы сравнивают противофазным сложением в сумматоре 9, на выходе которого формируется напряжение:

$$\Delta U = U_{\kappa} - U_{\Sigma}. \quad (11)$$

Сигнал ΔU с сумматора 9 поступает к информационным входам синхронных детекторов 10 и 13, к опорным входам которых подключены выходы соответственно квадратурного или синфазного опорных напряжений формирователя 8. Таким образом, на опорные входы первого и второго синхронных детекторов 10 и 13 подаются соответственно «квадратурные» (сдвинутые на 90°) и «синфазные» относительно выходного напряжения возбуждающего генератора 7 стробирующие опорные сигналы.

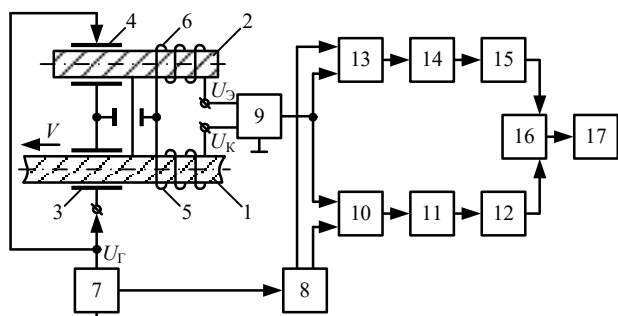


Рис. 2. Схема устройства для реализации предложенного способа дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля

Таким образом, в основе построения системы контроля лежит двухканальная измерительная структура:

а) измерительный канал синфазной составляющей выходного сигнала датчика, образованный совокупностью функциональных блоков 10, 11, 12;

б) измерительный канал квадратурной составляющей выходного сигнала датчика, образованный совокупностью функциональных блоков 13, 14, 15.

Полученная информация с этих измерительных каналов вводится в блок 16, которым осуществляется ее алгоритмическая обработка и результат поступает на блок индикации 17, где выдаются соответствующие результаты идентификации обнаруженных дефектов в контролируемом кабеле. При этом если получают нулевой сигнал на выходе первого измерительного канала «10-11-12», то блок 16 фиксирует, что имеет место уменьшение живого сечения или обрыв электропроводящих элементов кабеля, а если получают ненулевой сигнал на выходе второго измерительного канала «13-14-15», то блок 16 фиксирует, что имеет место изменение химического состава материала этих элементов.

Допустимое процентное отклонение величин выходных сигналов обоих измерительных каналов устанавливается заранее в процессе наладки измерительной системы. Кроме того, перед началом работы систему калибруют. Для этого вместо контролируемого кабеля 1 устанавливают отрезок этого кабеля с гарантированным отсутствием дефектов и подают напряжение U_{Γ} на спиновые модуляторы 3 и 4. При этом посредством электронной регулировки напряжения смещения амплитудных детекторов 10 и 13 добиваются, чтобы сигналы на выходе первого измерительного канала «10-11-12» и на выходе второго измерительного канала «13-14-15» были равны нулю.

Дополнительной калибровки блока 16 для исключения влияния температуры или других внешних факторов, влияющих на величины измерительных сигналов, не требуется, так как обе измерительные катушки основного 5 и дополнительного 6 индукционных датчиков работают в одинаковых условиях, что упрощает процесс контроля.

Процедура контроля электропроводящих элементов кабеля во многом зависит от поставленных целей этого контроля. Если требуется провести просто процесс отбраковки неисправного кабеля, например непосредственно в полевых условиях при укладке кабеля, то необходимо зафиксировать только сам факт наличия дефекта в его электропроводящих элементах без определения конкретных параметров этого дефекта. В этом случае система просто контролирует отличие величин контрольного и эталонного сигналов по обоим каналам и при превышении заданного численного порога отличия формирует сигнал на отбраковку.

В случае необходимости выявления конкретных параметров дефекта требуется проведение ряда предварительных действий. Например, если необходимо решить задачу оценки численного отличия реального живого сечения электропроводящих элементов кабеля от заданного номинального значения, то необходимо провести следующие технологические процедуры:

1. На участке контролируемого кабеля устанавливаются отрезок кабеля с известным значением потери площади поперечного сечения по металлу, например 10% номинальной площади поперечного сечения по металлу, и с помощью соответствующей настройки блока 16 добиваются, чтобы на дисплее блока индикации 17 появилось численное значение 10% потери номинальной площади поперечного сечения по металлу.

2. В электронно-вычислительное устройство 16 вносится алгоритм оценки процентного отклонения фактически измеренных показателей контролируемого кабеля от показателей эталонного кабеля.

3. По результатам измерений информационного сигнала алгоритмически вычисляют численные значения указанных процентных отклонений [13], которые фактически и обеспечивают необходимый уровень достоверности контроля и отбраковки кабеля по текущим значениям живого сечения его электропроводящих элементов.

Аналогичные технологические процедуры следует провести и при необходимости оценки отклонения удельной проводимости σ электропроводящих элементов кабеля от ее заданного номинального значения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО СПОСОБА ОПЕРТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Экспериментальная проверка эффективности предложенного способа дефектоскопии и основных принципов построения варианта устройства для его реализации осуществлялась с использованием специально разработанной для этой цели информационно-измерительной системы (ИИС).

Для удобства рассмотрения воспользуемся компонентной структурой ИИС (рис. 3) [14], где под компонентом ИИС понимается входящее в ее состав техническое устройство, ориентированное на выполнение одной из предусматриваемых процессом измерений функций или реализующее преобразование измерительной информации в другие виды информации.

В соответствии с указанными функциями рассматриваемую ИИС можно структурировать в виде следующих компонент: измерительных, связующих, вычислительных и информационных. Следует отметить, что для рассматриваемого варианта ИИС измерительный компонент представлен совокупностью чувствительного элемента (датчика) и преобразовательного элемента, осуществляющего первичную и вторичную обработку информационного сигнала.

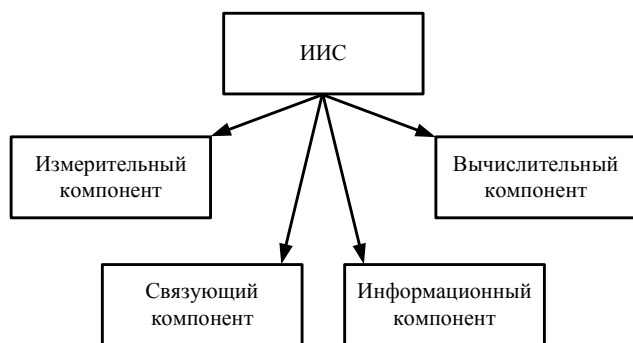


Рис. 3. Компонентная структура ИИС

Используемая ИИС была построена на основе следующих базовых принципов [13]:

- чувствительный элемент измерительного компонента ИИС представлен в виде набора измерительных индукционных датчиков;
- преобразовательный элемент измерительного компонента ИИС и связующий компонент ИИС организованы микропроцессорными модулями на базе PIC-микроконтроллеров и представляют собой фактически аппаратную часть ИИС, функционально ориентированную на USB-порт персонального компьютера (ПК);
- информационно-вычислительный компонент ИИС представлен в формате ПК и прикладной пользовательской программы (ППП), разработанной на языке программирования C++ и ориентированной на создание библиотеки стандартных пользовательских программ первичной и вторичной обработки сигналов путем соответствующей их компиляции из среды MatLab;
- взаимодействие программных и аппаратных компонент осуществляется через стандартный драйвер USB HID.

Следует отметить, что при разработке информационно-вычислительного компонента ИИС использовался метод экспорта алгоритмов из вычислительных программных комплексов (ВПК) MATLAB с последующей компоновкой этих алгоритмов в динамически подключаемые библиотеки (dll). Данный подход позволил создать динамически расширяемое с помощью библиотек DLL программное обеспечение ПК, не требующее процесса лицензирования.

Более детально рассмотрим особенности структурной блок-схемы аппаратной части ИИС, представленной на рис. 4 [15].

Согласно представленной структуре ИИС содержит два независимых модуля:

МИИП – модуль интерфейса с измерительными преобразователями;

МИПК – модуль интерфейса с ПК.

В свою очередь, данные модули взаимодействуют между собой посредством цифрового радиоканала ближней связи (до 100 м).

МИИП предназначен для взаимодействия с измерительными датчиками и содержит следующие функциональные узлы: АЦП – AD7329; контроллер МИИП и цифровой процессор обработки сигнала (ЦПОС) – dsPIC33FJ64GP206; модем МИИП – NRF24L01.

МИПК предназначен для согласования аппаратной части с ПК посредством протокола передачи данных USB и содержит следующие функциональные узлы: модем МИПК – NRF24L01; контроллер МИПК и интерфейс с ПК – PIC18F2550.

Применяемый в качестве модемов МИИП и МИПК радиотрансивер NRF24L01 имеет частотный диапазон 2,4 ГГц и максимальную пропускную способность 2 Мбит/с.

Кроме того, в трансивере NRF24L01 применен аппаратный протокол – Enhanced ShockBurst, который позволяет организовать цифровой интерфейс с управляющим микроконтроллером по последовательной шине SPI.

Радио-модуль NRF24L01 имеет 4-проводной полнодуплексный интерфейс, совместимый с интерфейсом SPI, и располагает для соответствующего взаимодействия дополнительными выводами IRQ и CE, которые не входят в интерфейс SPI.

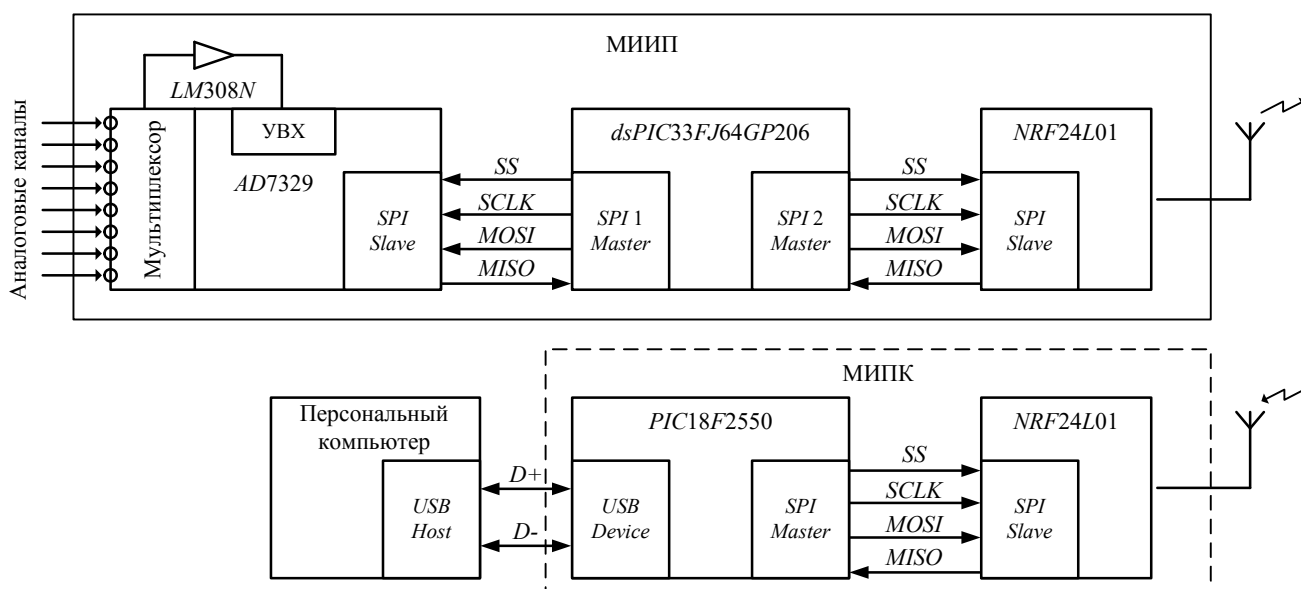


Рис. 4. Структурная блок-схема аппаратной части ИИС

В качестве вычислительного компонента рассматриваемой ИИС использовалась интегрированная среда MatLab, обладающая следующими возможностями:

- получение информационных сигналов и их визуализация в реальном времени;
- сохранение полученной информации в рабочем пространстве MatLab или в MAT-файлах на диске для последующей обработки;
- обработка измерительной информации в темпе измерений.

Информационные сигналы, полученные с соответствующих измерительных индукционных датчиков, обрабатывались в реальном времени преобразовательным элементом измерительного компонента ИИС и посредством связующей компоненты ИИС вводились в ПК, где осуществлялась процедура допускового контроля, результаты которого выводились на экран монитора ПК.

В таблице приводятся некоторые результаты отдельных экспериментальных исследований предлагаемого метода контроля на примере одножильных кабелей с медной и алюминиевой проволоками с различными номинальными сечениями, реализуемых посредством ИИС.

При эксперименте в контролируемом одножильном кабеле искусственно создавались дефекты в виде обрыва проволоки, локального уплотнения или локальной вытяжки материала проволоки.

Предельный параметр допускового контроля Δ_{σ}^D , представленный в таблице, условно определял $\pm 5\%$ диапазон возможных вариаций живого сечения контрольного одножильного кабеля по отношению к номинальному сечению эталонного одножильного кабеля.

Предельный параметр допускового контроля $\Delta_{\epsilon}^D - \pm 5\%$ диапазон возможных аномальных вариаций физических свойств электропроводящего материала контрольного одножильного кабеля по отношению к физическим свойствам электропроводящего материала эталонного одножильного кабеля.

Анализ результатов, представленных в таблице, четко указал по знаку Δ_{ϵ} на диамагнитные свойства Cu и парамагнитные свойства Al, а по величине этого параметра выявил возможность определения уровня соответствия физических свойств материала проволоки одножильного кабеля соответствующим нормативным требованиям.

Результаты экспериментальных исследований

Материал проволоки в жиле	Номинальное сечение S, мм ²	Параметры измеряемых сигналов		Предельные параметры допускового контроля				Напряжение питания спинового модулятора В
		Δ_{σ}	Δ_{ϵ}	Δ_{σ}^D		Δ_{ϵ}^D		
				В				
		min	max	min	max			
Cu	обрыв	0,002	- 0,001	-	-	-	-	10
	4,0	1,022	- 0,182	0,950	1,050	- 0,120	- 0,200	
	8,0	1,831	- 0,216	1,900	2,100	- 0,140	- 0,220	
	16,0	4,352	- 0,241	3,800	4,200	- 0,160	- 0,240	
Al	обрыв	0,002	0,001	-	-	-	-	
	4,0	0,506	0,118	0,470	0,530	0,100	0,200	
	8,0	1,082	0,125	0,950	1,050	0,140	0,240	
	16,0	2,089	0,169	1,900	2,100	0,160	0,260	

Следует отметить, что из данных **таблицы** по параметру измеряемого сигнала Δ_σ также следует вывод о том, что предлагаемый метод оперативного контроля обладает достаточно высокой степенью селективности, как по материалу проволоки одножильного кабеля, так и по ее геометрическим параметрам в виде величины живого сечения.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования возможного варианта реализации разработанного способа показали высокую эффективность и точность контроля качества электропроводящих элементов электрических проводов и кабелей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества предложенного способа и разработанного на его основе устройства дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля заключаются в следующем:

- позволяет оперативно выполнять отбраковку неисправного кабеля в полевых условиях непосредственно в процессе монтажа кабеля при его размотке с бобины;

- обеспечивает быструю перенастройку для контроля различных кабелей путем соответствующей замены эталонного отрезка конечной длины этого кабеля без дефектов;

- обнаружение дефектов реализуется как в случае неподвижного, так и перемещающегося контролируемого кабеля;

- возможность выявления дефектов в электропроводящих элементах из пара- и диамагнитных материалов, а также в стальных и сталеалюминевых проводах;

- обеспечивает высокую точность измерения и повышение помехоустойчивости за счет существенного снижения влияния внешних дестабилизирующих факторов, например влияния температуры на текущие параметры контролируемого кабеля;

- обеспечивает упрощение конструкции измерительной системы.

Разработанный способ БНК достаточно универсален и может быть использован для диагностики не только длинномерных, но и электропроводящих изделий ограниченной длины и различной формы, например стержней, шпилек, пластин и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В. В. Клюева. В 8 т. М.: Машиностроение, 2006.
2. Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation / Edited by N. Ida, N. Meyendorf. - Springer Nature Switzerland AG, 2018. 1550 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30050-4_13-1.
3. Холодный С.Д., Серебрянников С.В., Боев М.А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 232 с.
4. Таджикибаев А.И., Канискин В.А., Пугачев А.А. Оценка технического состояния кабелей и кабельных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2007. 173 с.
5. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихревого контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 88 с.
6. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 288 с.
7. Патент RU № 2542624. Способ вихретокового контроля медной катанки и устройство для его реализации. Опубликовано 20.02.2015, бюл. № 5.
8. Брякин И. В., Бочкарев И. В., Храмшин В.Р. Разработка нового метода дефектоскопии электрических кабелей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4(41). С. 4-10.
9. Брякин И. В., Бочкарев И. В. Способ определения места дефекта электропроводящих элементов кабеля / Патент РФ 2701754. Опубликовано 01.10.2019. Бюл. № 28.
10. Якубовский Ю. Я., Ренард И. В. Электроразведка. М.: Недра, 1991. 358 с.
11. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / под общ. ред. В.П. Вейко. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2008. 141 с.
12. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. М.: Энергия, 1978. 176 с.
13. Верзунов С.Н., Бочкарев И.В. Разработка программного компонента трассоискателя на базе устройства сбора данных Л КАРД E502 // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 42-48.
14. Брякин И.В. Магнитометрические средства измерения, контроля и технической диагностики: монография. Бишкек: Илим, 2012. 212 с.
15. Брякин И.В., Добровольский Н. Концепция создания информационно-вычислительного компонента сложных систем // Проблемы автоматизации и управления. №2. 2011. С. 74-84.

Поступила в редакцию 30 марта 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OPERATIONAL QUALITY CONTROL OF ELECTRIC CONDUCTING CABLE ELEMENTS

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering, Power Engineering Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Senior Researcher, Chief of the Laboratory of information and measuring systems, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

A new method for defectoscopy of electrically conductive cable elements is proposed, according to which, using the appropriate spin modulators, directional alternating electric fields

are created, which simultaneously affect the controlled cable and the reference additional finite length of the cable segment without defects. Thus, wave processes of polarization of the spin

magnetic moments of free electrons at the resonance frequency of this polarization are excited in the electrically conductive elements of the controlled and reference cables and the control and reference signals are recorded in the form of induction emf due to the indicated wave processes by means of corresponding induction sensors. The real and imaginary components of these signals are formed in real time and by the difference values between the material components and between the imaginary components of the reference and control signals, tolerance monitoring of the physical and technical state of the electrically conductive elements of the controlled cable is carried out according to the values of the normalized difference values. A device is proposed that implements the developed flaw detection method and allows for operational control of cable quality. The conducted experimental studies confirmed its high efficiency and reliability of control.

Keywords: electric cable, electrically conductive elements, non-destructive testing, spin modulator; induction sensor, polarization of the spin-magnetic moments of free electrons, resonant frequency, dielectric constant, specific conductivity, synchronous detectors of quadrature and in-phase components of the signal.

REFERENCES

1. *Nerazrushaiuschiy kontrol: spravochnik* [Non-destructive testing: Reference book] / Under the editorship of V.V. Klyuyev, in 8 volumes. Moscow: Mechanical Engineering, 2006. (In Russian)
2. Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation / Edited by N. Ida, N. Meyendorf. – Springer Nature Switzerland AG, 2018. 1550 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30050-4_13-1.
3. Kholodny S. D., Serebryannikov S. V., Boyev M. A. *Metody ispytaniy i diagnostiki v elektroizolatsionnoy i kabelnoy tekhnike* [Test methods and diagnostics in electrical insulation and cable technology]. Moscow: Publishing House MPEI, 2016. 232 p. (In Russian)
4. Tadzhibaev A.I., Kaniskin V.A., Pugachev A.A. *Otsenka tekhnicheskogo sostoianiya kabeley i kabelnykh setei* [Assessment of the technical state of cables and cable networks]. St. Petersburg: PEIPK, 2007. 173 p. (In Russian)
5. Yakovlev S.G. *Metody i apparatura magnitnogo i vikhrevogo kontrolya* [Methods and apparatus of magnetic and vortex control]. St. Petersburg: Publishing house of SPbGETU "LETI", 2003. 88 p. (In Russian)
6. Shubochkin A.E. *Razvitie i sovremennoe sostoyanie vikhretkovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya* [Development and current state of the eddy current method of non-destructive testing]. Moscow: Publishing House "Spectrum", 2014. 288 p. (In Russian)
7. *Sposob vikhretkovogo kontrolya mednoy katanki i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method of eddy current control of a copper wire rod and device for its implementation]. Patent RU No. 2542624. Published 02/20/2015, bull. Number 5.
8. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Development of a new method for flaw detection of electric cables. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No. 4(41). P. 4-10. (In Russian)
9. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Sposob opredeleniya mesta defekta elektroprovodyashchikh elementov kabelya* [A method for determining the location of a defect in electrically conductive cable elements] / Patent RF 2701754. Published 01.10.2019. Bull. Number 28.
10. Yakubovskiy Yu.Ya., Renard I.V. *Elektrorazvedka* [Geoelectric Prospecting]. Moscow: Nedra, 1991. 358 p. (In Russian)
11. Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina. *Vzaimodeystvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom. Chast I. Pogloshchenie lazernogo izlucheniya v veshchestve* [Interaction of laser radiation with matter. Part I. Absorption of laser radiation in matter]. Under the general editorship of V.P. Veiko. St. Petersburg: SPb GU ITMO, 2008. 141 p. (In Russian)
12. Bromberg E.M., Kulikovskiy K.L. *Testovyye metody povysheniya tochnosti izmereniy* [Test methods to improve measurement accuracy]. Moscow: Energy, 1978. 176 p. (In Russian)
13. Verzunov S.N., Bochkarev I.V. Development of the software component of the locator based on the L KARD E502 data acquisition device. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No 2(39). P. 42-48. (In Russian)
14. Bryakin, I.V. *Magnitometricheskie sredstva izmereniya, kontrolya i tekhnicheskoi diagnostiki* [Magnetometric measuring instruments, control and technical diagnostics]. Bishkek: Ilim, 2012. 212 p. (In Russian)
15. Bryakin I.V., Dobrovolsky N. The concept of creating an information and computing component of complex systems. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Problems of automation and control], No. 2. Bishkek: Ilim, 2011. pp. 74-84. (In Russian)

Бочкарев И.В., Брякин И.В. Оперативный контроль качества электропроводящих элементов кабеля // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 55-63. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63)

Bochkarev I.V., Bryakin I.V. Operational Quality Control of Electric Conducting Cable Elements. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 55-63. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63)