

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 620.179.18

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19

КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.², Храмин В.Р.³

¹Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
bivas2006@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в необходимости обеспечения высокой надежности и безаварийности работы электрических кабелей для линий передачи электроэнергии и информационных высокочастотных сигналов путем неразрушающего контроля их параметров. ЦЕЛЬ. Предложить новый способ комплексной диагностики электрических кабелей, позволяющий повысить эффективность неразрушающего контроля параметров электрических кабелей за счет повышения точности проверки и увеличению количества одновременно контролируемых параметров. МЕТОДЫ. При теоретическом обосновании нового способа применялись базовые методы теоретической электротехники, а при разработке схемотехнических решений использовались системы цифровой обработки комплексных параметров информационных сигналов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработан и теоретически обоснован кондуктометрический способ неразрушающего контроля параметров основных элементов кабеля. Разработана структурная блок-схема реализации данного способа. Показано, что предложенное техническое решение позволяет регистрировать электрический сигнал, содержащий информацию о текущих электрических параметрах контролируемого участка электрического кабеля, по которым можно оценить техническое состояние его токопроводящих элементов и изоляции. На базе этого способа разработан способ оперативного допускового контроля параметров электрических кабелей с использованием в качестве базового критерия параметры эталонного отрезка конечной длины контролируемого кабеля без дефектов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование в качестве электродов разъемных металлических цилиндров позволяет использовать данные способы контроля как при изготовлении кабеля, так и на действующих кабельных линиях без нарушения их целостности в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: кабель; металлические токоведущие жилы; изоляция; разъемный цилиндрический электрод; электрическая емкость; кондуктометрическая ячейка; дрессель; квадратурная демодуляция.

Для цитирования: Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмин В.Р. Кондуктометрический метод неразрушающего контроля параметров электрических кабелей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 3-19. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.

CONDUCTOMETRIC METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELECTRIC CABLE PARAMETERS

Bryakin I.V.¹, Bochkarev I.V.², Khramshin V.R.³

¹Institute of Mechanical Engineering, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

²Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

³Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

bivas2006@yandex.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the study lies in the need to ensure high reliability and trouble-free operation of electric cables for power transmission lines and high-frequency information signals by non-destructive testing of their parameters. **OBJECTIVE.** To propose a new method for comprehensive diagnostics of electric cables, which allows increasing the efficiency of non-destructive testing of electric cable parameters by increasing the accuracy of testing and increasing the number of simultaneously monitored parameters. **METHODS.** Basic methods of theoretical electrical engineering were used for the theoretical justification of the new method, and digital systems for processing complex parameters of information signals were used in the development of circuit solutions. **RESULTS.** A conductometric method for non-destructive testing of parameters of the main cable elements has been developed and theoretically substantiated. For testing, two detachable cylindrical electrodes are applied to the examined section of a round metal core with dielectric insulation, which together with the examined part of the wire form a conductometric cell. It is shown that the electrical capacitance of this cell characterizes the electrical parameters of the wire, which are obtained from the measured information signal using the quadrature demodulation method. A structural block diagram for implementing this method has been developed. It is shown that the proposed technical solution allows recording an electric signal containing information on the current electric parameters of the controlled section of the electric cable, by which it is possible to assess the technical condition of its conductive elements and insulation. Based on this method, a method for operational tolerance control of the parameters of electric cables has been developed using the parameters of the reference section of the final length of the controlled cable without defects as a basic criterion. **CONCLUSION.** The use of detachable metal cylinders as electrodes allows using these control methods both in cable manufacturing and on existing cable lines without violating their integrity in real time.

Keywords: cable; metal current-carrying conductors; insulation; detachable cylindrical electrode; electrical capacitance; conductometric cell; choke; quadrature demodulation.

For citation: Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Conductometric method of non-destructive testing of electric cable parameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 3-19. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.

Введение (Introduction)

В настоящее время бесперебойная работа систем электроснабжения и электрооборудования всех отраслей хозяйства, от промышленных предприятий и транспорта до сельского и коммунального хозяйств, напрямую зависит от надежной работы силовых электрических кабелей [1, 2]. Наряду с транспортировкой электроэнергии, кабели применяются и для передач информационных высокочастотных сигналов [3, 4]. Таким образом, качество кабельной продукции однозначно определяет не только надежность электроснабжения, но и систем сбора данных, удаленного контроля и распределенного управления. Поэтому кабельная промышленность в настоящее время находится в стадии интенсивного роста [5].

Собственные параметры кабелей могут меняться на всех его жизненных этапах – как в процессе изготовления на заводе, так и во время хранения, транспортировки, монтажа и эксплуатации, при различных диагностических процедурах, ремонте и т.д. Так, в процессе эксплуатации на кабель действуют не только электрические нагрузки, но и внешние климатические факторы, а также различные техногенные воздействия, например, строительные работы в зоне прохождения кабельной линии (КЛ). Кроме того, имеет место естественное старение кабеля, а также случайные ошибочные воздействия на него [6-8]. Поэтому, для уменьшения риска аварийного выхода из строя кабеля необходимо применять

системы контроля его состояния. Конечно, это требует определенных материальных затрат, однако аварийные отключения линий электропередач приводят к принципиально большим расходам, а в ряде случаев и к катастрофическим последствиям (например, на военных объектах, в больницах и т.п.).

Основное функциональное назначение электрического кабеля выполняют его металлические токоведущие жилы, по которым непосредственно протекает электрический ток и информационные сигналы, поэтому они должны гарантированно обладать заданными параметрами. Для того, чтобы токопроводящие жилы успешно выполняли свои функции, их необходимо защищать от растекания тока и информационных сигналов в окружающую среду, а также изолировать друг от друга. Кроме того, необходимо гарантировать безопасность эксплуатации кабеля путем защиты как от соприкосновения с его токоведущими элементами, так и от воздействия на них окружающей среды. Все эти функции выполняет изоляционная диэлектрическая оболочка каждой токоведущей жилы и кабеля в целом. Таким образом, токоведущие жилы обеспечивают целевое назначение и качественные характеристики кабеля, а его изоляция обеспечивает надежность и безопасность его работы. Поэтому очевидно, что при диагностике кабеля необходим контроль обоих указанных параметров кабеля.

Цель исследования заключается в повышении эффективности неразрушающего контроля параметров электрических кабелей за счет повышении точности проверки и увеличении количества одновременно контролируемых параметров.

Научная значимость исследования состоит в разработке и теоретическом обосновании нового способа комплексной диагностики электрических кабелей, позволяющий одновременно осуществлять диагностику как их электропроводящих элементов, так и изоляции, а также в создании на его базе способа оперативного допускового контроля параметров электрических кабелей с использованием в качестве критерия параметров эталонного отрезка контролируемого кабеля без дефектов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанных способов и устройств их аппаратной реализации для контроля в реальном масштабе времени параметров кабеля как при его изготовлении, так и в условиях эксплуатации на действующих кабельных линиях без нарушения их целостности, и возможность создания простых систем отбраковки кабеля, имеющего параметры, выходящие за допустимые пределы.

По сравнению с известными, разработанные способы контроля обеспечивают не только расширение эксплуатационных возможностей за счет комплексного контроля как электропроводящих, так и электроизоляционных свойств кабельной продукции, но и расширение области их применения. Последнее объясняется тем, что эти способы можно использован не только для диагностики электрических кабелей и проводов, но и для других металлических изделий с малым поперечным сечением круглой формы, имеющих внешнее покрытие или оболочку из изоляционных материалов, например, металлополимерных тросов, проволоки, стержней и т.п.

Литературный обзор (Literature Review)

Общие вопросы контроля качества кабельных изделий

Очевидно, что контроль качества кабельных изделий наиболее целесообразно проводить неразрушающими методами в реальном масштабе времени. Такой контроль необходим как на стадии изготовления кабельной продукции, так и в процессе ее эксплуатации.

В настоящее время существует множество методов и средств неразрушающего контроля кабелей, каждый из которых направлен на проверку параметров одного определенного элемента кабеля. Они достаточно подробно описаны в соответствующей технической литературе, например, в [9-17]. Так, в [9] описаны методы как разрушающего, так и неразрушающего контроля электрических свойств кабелей и физико-химических характеристик их изоляции. Рассмотрены физические методы испытаний и диагностики конструктивных элементов кабелей и технологических процессов их изготовления, а также описаны методы обработки результатов испытаний. Методы контроля дефектов токопроводящих жил кабеля, выполненных как из сталесодержащих магнитных материалов, так и из немагнитных материалов, представлены в [10]. Описаны физические принципы работы устройств контроля, а также возможная аппаратная реализация этих устройств. Часть из перечисленных работ посвящена диагностике неисправности кабеля непосредственно во время его работы в полевых условиях. Практически в этих условиях доступны различные методы контроля: тепловой контроль, испытания на частичный разряд, диэлектрические потери, испытания на удлинение при разрыве. Например, в [14]

рассмотрена диагностика изоляции силовых кабелей и кабельных муфт под рабочим напряжением путем непрерывного контроля ее температуры. Предложена методика выявления наличия коротких замыканий, в том числе кратковременных, на конкретных участках кабельной линии. В [15, 16] рассмотрена диагностика кабельных линий на основе поиска и локализации места возникновения дефектов в изоляции на основании измерения и анализа частичных разрядов. В [17] рассматривается использование рефлектометрии во временной и частотной областях для диагностики и мониторинга кабелей в реальных условиях. Показано, что такой тип рефлектометрии является более точный, чем обычная рефлектометрия за счет использования локализованных во временной и частотной областях сигналов, устойчивых к шуму.

Инновационные способы и устройства диагностики электропроводящих элементов кабеля описаны в [18, 19]. В этих работах предложены способы дефектоскопии, основанные на воздействии переменным электрическим полем на указанные элементы и возбуждении в них тем самым волнового процесса в виде поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации. Этот процесс регистрируют индукционным датчиком, формирующим выходной информационный сигнал в виде ЭДС, амплитуда и фаза которой позволяют получить информацию о месте и виде дефекта электропроводящих жил, а также о физико-химических свойствах их материалов.

При этом следует отметить, что наиболее уязвимой частью кабеля, которая наиболее часто приводит к возникновению аварийных ситуаций, является изоляция кабелей и проводов. Поэтому именно контролю качества изоляции посвящено большая часть работ по диагностике состояния кабеля [20-22]. В данных статьях показана необходимость диагностики кабеля в различных областях применения, представлен обзор последних достижений в области неразрушающего контроля изоляции кабелей, описаны основные способы и современное оборудование, необходимые для этого, показаны перспективы развития диагностических методов.

Анализ показал, что на практике в основном используют два электрических метода технологического контроля качества изоляции кабельных изделий: электроискровой и электроемкостный.

Электроискровой метод контроля осуществляется путем приложения высокого испытательного напряжения к поверхности изоляции при заземленной токопроводящей жиле. Для реализации этого метода применяется искровые дефектоскопы, которые при наличии дефекта фиксируют электрический пробой изоляции в этом месте [23]. Однако такой процесс контроля изоляция сопровождается увеличением уже существующего дефекта и снижением тем самым качества кабеля, что является существенным недостатком данного метода контроля.

При электроемкостном методе осуществляют контроль емкости кабельного изделия, которая является одной из основных нормируемых величин, определяющих их качество. Это объясняется тем, что емкость провода зависит как от его геометрических размеров, так и от электрических свойств изоляции [24], поэтому контролируя изменение емкости можно определить отклонения как электрических, так и геометрических параметров кабеля от нормируемых величин [25-27]. В [25] описана конструкция электроемкостного измерительного преобразователя для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства. Показана процедура выбора оптимальных конструктивных параметров основных элементов преобразователя. В [26] показано, что поскольку диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля будет соответствующим образом изменяться при возникновении дефекта в изоляции кабеля, то применение электрической емкостной томографии позволит отображать пространственное распределение диэлектрической проницаемости изоляции. Описан датчик с восьмиэлектродной матрицей, при этом емкость кабеля определяется с помощью импедансметра. В [27] описан процесс обнаружения наличия дефектов внутри кабельных аксессуаров путем выявления изменений емкости кабеля. Для этого сравнивались емкости кабеля без дефектов и кабеля, содержащего дефект. Показано также, что напряженность электрического поля внутри дефекта может запустить процесс частичного разряда.

Таким образом, для всестороннего контроля необходимо использовать сразу нескольких устройств, что делает общую систему контроля громоздкой, дорогой и неудобной в эксплуатации. Поэтому, несмотря на большое количество работ, проводимых во всем мире по созданию устройств диагностики и контроля параметров электрических кабелей, актуальными является исследования по разработке универсальных неразрушающих способов и устройств мониторинга состояния кабеля, позволяющих комплексно контролировать указанные параметры.

Разработка нового способа комплексной диагностики электрических кабелей

Известно, что электрическая емкость одинарного двухэлектродного цилиндрического конденсатора (ЦК) с заполненным воздухом межэлектродным пространством, электроды которого представлены в виде двух коаксиальных металлических цилиндров с осевой длиной l (м), радиусами внутреннего и внешнего электрода соответственно r_i и r_{i+1} (м) определяется в соответствии с выражением вида [28, 29]:

$$C = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \frac{2\pi \times l}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} \quad (1)$$

В случае заполнения этого межэлектродного пространства бинарной средой, состоящей уже из воздуха и диэлектрического материала, двухэлектродный цилиндрический конденсатор будет представлять собой два последовательно соединенных двухэлектродных ЦК C_1 и C_2 соответственно с воздухом и диэлектрическим материалом (рис. 1).

Тогда, для двухэлектродного ЦК, заполненного бинарной средой, электрическая емкость будет определяться следующей зависимостью:

$$C^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1}, \quad (2)$$

где $C_1 = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \frac{2\pi \times l}{\ln(r_1 / r_0)}$; $C_2 = \varepsilon_0 \times \varepsilon_2 \times \frac{2\pi \times l}{\ln(r_2 / r_1)}$; r_0 и r_1 – радиусы внутреннего и

внешнего электродов конденсатора C_1 заполненного воздухом; r_2 – радиус внешнего электрода конденсатора C_2 , заполненного диэлектрическим материалом; ε_1 – диэлектрическая постоянная воздуха; ε_2 – диэлектрическая постоянная диэлектрического материала (ДМ).

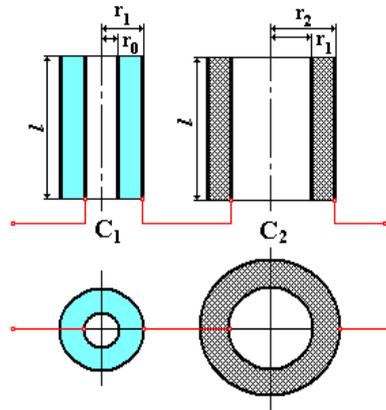


Рис. 1. Схема замещения цилиндрического конденсатора с бинарным заполнением *Fig. 1. Equivalent circuit of a cylindrical capacitor with binary filling*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Определим величину, обратную величине суммарной электрической емкости:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{2\pi \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\varepsilon_2} \right] = \frac{1}{2\pi \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[\ln r_1 - \ln r_0 + \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{\varepsilon_2} \right]. \quad (3)$$

Примем, что $d_1=(r_1-r_0)$ – толщина слоя воздуха, условно равномерно распределенного по поверхности электрода; $d_2 = (r_2 - r_1)$ – толщина слоя ДМ, условно равномерно распределенного по поверхности электрода; $D = (d_1 + d_2)$ – средняя величина зазора между внешним и внутренним электродами ЦК.

С учетом того, что $0 < r_{i+1} / r_i \leq 2$ выражение (3) можно привести к виду:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{2\pi \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times d_2 \right]. \quad (4)$$

В соответствии с (4) определим величину суммарной электрической емкости:

$$C = \frac{2\pi \times \varepsilon_0 \times l}{D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times d_2} \quad (5)$$

Известно, что объемное электрическое сопротивление для ДМ, находящегося в межэлектродном пространстве ЦК с коаксиально расположенными электродами, определяется выражением:

$$G_{DM} = G_2 = g_v \times \frac{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{2\pi l} = g_2 \times \frac{d}{2\pi l} \quad (6)$$

где d – толщина слоя ДМ, находящегося в межэлектродном пространстве ЦК; l – осевая длина ЦК; $g_v = g_2$ – удельное объемное электрическое сопротивление ДМ.

С учетом (6) выражение (5) можем переписать в следующем виде:

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2}} \quad (7)$$

Для ЦК определим величину импеданса:

$$\dot{Z}_C = -j \times \frac{1}{\omega \times C} = -j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \epsilon_0 \times l} \times \left(D - \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2} \right) \quad (8)$$

С целью утилитарного применения (8) предлагается в качестве внутреннего электрода рассматриваемого ЦК использовать часть поверхности длиномерного электрического провода (ДЭП) в виде металлической жилы круглого сечения с диэлектрической изоляцией, расположенного коаксиально внутри внешнего электрода этого ЦК. При этом диэлектрическая изоляция ДЭП является, как и воздух, одним из элементов бинарной среды, заполняющей ЦК.

Исследуем функциональные возможности варианта схемотехнического решения, при котором внутрь двух соосно расположенных и разнесенных на определенное расстояние идентичных металлических разрезных цилиндрических электродов 2 и 3 коаксиально помещен ДЭП в виде металлической жилы круглого сечения 1 с диэлектрической изоляцией 1' (рис. 2), а L , 4 и 5 – соответственно индуктивность, магнитопровод и электрическая обмотка дросселя; $\dot{U}_Г$ – питающее синусоидальное электрическое напряжения; $\dot{U}_{изм}$ – информационный сигнал, снимаемый с обмотки 5 дросселя.

Конструктивно электроды 2 и 3 совместно с частью ДЭП образуют кондуктометрическую ячейку (КЯ), электрические параметры которой фактически характеризуют электрические параметры ДЭП. При этом на электрод 2 подается переменное синусоидальное напряжение, а электрод 3 имеет точку соединения «а» с электрической обмоткой 5 дросселя. В этом случае точка соединения «а» является выходом КЯ, с которой снимается информационный сигнал $\dot{U}_{изм}$.

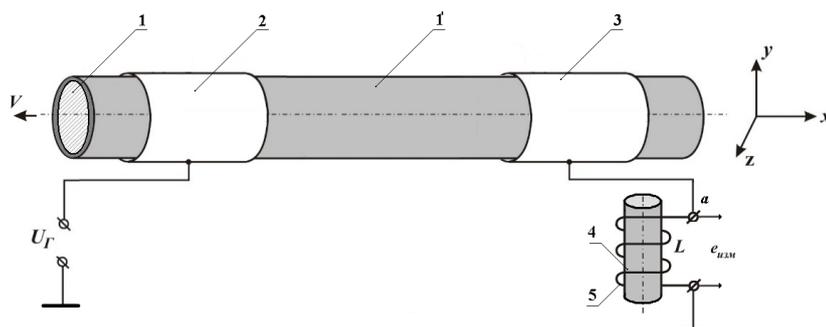


Рис. 2. Обобщенная схема способа неразрушающего контроля Fig. 2. Generalized scheme of the method of non-destructive testing

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Электрическая схема замещения варианта схемотехнического решения представлена на рисунке 3, где части поверхностей металлической жилы круглого сечения 1, расположенные непосредственно под электродами 2 и 3, образуют с ними соответственно два ЦК C и C' , являясь при этом их внутренними электродами.

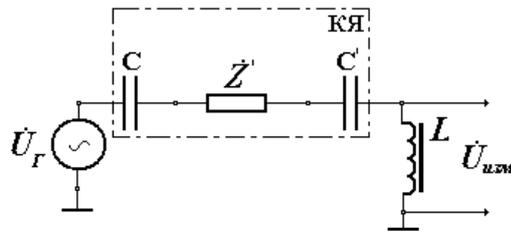


Рис. 3. Электрическая схема замещения варианта схемотехнического решения Fig. 3. Electrical equivalent circuit diagram of the circuit design variant

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На внешний электрод 2 (рис. 2) ЦК C подается переменное синусоидальное напряжение \dot{U}_G , а внешний электрод 3 ЦК C' , соединяясь с дросселем с индуктивностью L , обеспечивает при этом соответствующее последовательное электрическое соединение ЦК с этим дросселем, которое в свою очередь по своей сути является резонансным индуктивно-емкостной полумостом. Использование дросселя с индуктивностью L , позволяет реализовать квазирезонансный режим функционирования индуктивно-емкостного полумоста, при котором его выходной сигнал $\dot{U}_{изм}$ достигает своего максимально возможного значения.

Основным функциональным элементом электрической схемы замещения является электрический контур, состоящий из последовательно соединенных КЯ и дросселя. Фактически КЯ образован ЦК C и C' соединенными между собой металлическим проводом с комплексным сопротивлением:

$$\dot{Z} = R + j \times X, \quad (9)$$

где R и X – соответственно активное и реактивное сопротивления контролируемого участка ДЭП.

Учитывая, что контролируемый участок ДЭП обладает относительно корпуса малозначимым реактивным сопротивлением, будем считать, что

$$\dot{Z} = R = \rho \times \lambda / s, \quad (10)$$

где ρ , λ и s – соответственно удельное сопротивление, длина и площадь поперечного сечения контролируемого участка металлической жилы круглого сечения 1 ДЭП.

Для более полного анализа процессов, происходящих в электрическом контуре, рассмотрим электрическую схему замещения варианта схемотехнического решения с учетом заполнения ЦК C и C' бинарной средой (рис. 4).

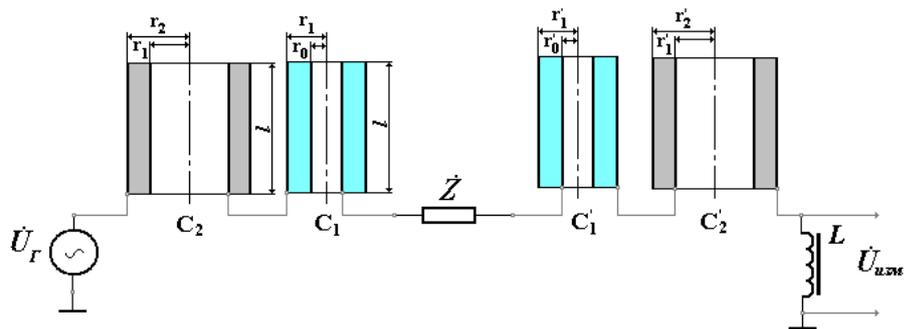


Рис. 4. Электрическая схема замещения электрического контура с бинарным заполнением ЦК Fig. 4. Electrical equivalent circuit of the electrical circuit with binary filling of a cylindrical capacitor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Аналогично выражениям (2) и (7), для ЦК C' можем соответственно записать:

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C'_1} + \frac{1}{C'_2}, \quad C' = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon'_2 - 1}{\epsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2}}. \quad (11)$$

Обобщая, можно констатировать следующее:

$$\dot{Z}_C = -j \times \frac{1}{\omega \times C} = -j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left(D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2} \right); \quad (12)$$

$$\dot{Z}_{C'} = -j \times \frac{1}{\omega \times C'} = -j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left(D - \frac{\varepsilon'_2 - 1}{\varepsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2} \right), \quad (13)$$

где ε'_2, g'_2 и G'_2 (аналогично ε_2, g_2 и G_2) – диэлектрическая проницаемость, удельное объемное электрическое сопротивление и объемное электрическое сопротивление для ДМ (диэлектрическая изоляция ДЭИ), находящегося в межэлектродном пространстве ЦК С'.

Используя (12) и (13), определим импеданс для КЯ:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_Я = \dot{Z}_C + \dot{Z}_{C'} + \dot{Z}' = R - j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \rightarrow \times \\ \rightarrow \times \left(D - \frac{\varepsilon'_2 - 1}{\varepsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2} + D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

После соответствующих преобразований выражения (14) получим соотношение вида:

$$\dot{Z}_Я = R - j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[2D - 2 \times \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \times \frac{\pi \times l \times (G'_2 + G_2)}{g} \right] = R + j \times K \times (G'_2 + G_2). \quad (15)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_2 = \varepsilon'_2$; $g = g_2 = g'_2$; $K = \frac{\varepsilon - 1}{\omega \times \varepsilon_0 \times \varepsilon \times g}$ – постоянный конструктивный коэффициент; $\frac{2D}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l}$ – сравнительно малая величина, которой можно пренебречь.

Определим импеданс рассматриваемого электрического контура:

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_Я + \dot{Z}_Д = R + R_Д + j \times [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L] \quad (16)$$

В запитываемом синусоидальным напряжением $\dot{U}_Г$ электрическом контуре, образованном КЯ и дросселем, создается соответствующий электрический ток:

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_Г / \dot{Z}_0 \quad (17)$$

Подставив в (17) все необходимые составляющие, получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 = \dot{U}_Г / \dot{Z}_0 = \frac{\dot{U}_Г}{R + R_Д + j \times [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L]} \Rightarrow \\ \Rightarrow \dot{U}_Г \times \frac{R + R_Д - j \times [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L]}{(R + R_Д)^2 + [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L]^2} \end{aligned} \quad (18)$$

После соответствующих преобразований (18) будем иметь:

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_Г \times \frac{R + R_Д}{R_Д^2 + \omega^2 \times L^2} - \dot{U}_Г \times j \times \frac{K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L}{R_Д^2 + \omega^2 \times L^2} \quad (19)$$

В связи с тем, что угловая частота питающего напряжения $\dot{U}_Г$ выбирается равной ω_0 , при которой напряжение на индуктивности $\dot{U}_{изм}$ в последовательном колебательном индуктивно-емкостном контуре достигает своего наибольшего значения $\dot{U}_{мизм}$, то для этого напряжения можем записать:

$$\dot{U}_{мизм} = \dot{I}_0 \times \omega_0 \times L = \dot{U}_Г \times \frac{(R + R_Д) \times \omega_0 \times L}{R_Д^2 + \omega_0^2 \times L^2} - \dot{U}_Г \times j \times \frac{[K \times (G'_2 + G_2) + \omega_0 \times L] \times \omega_0 \times L}{R_Д^2 + \omega_0^2 \times L^2}, \quad (20)$$

где $\omega_0 = \omega_{рез} \times \sqrt{\frac{1}{1 - R_Д^2 \times C' / (2 \times L)}} = \omega_{рез} \times \sqrt{\frac{1}{1 - 1 / (2 \times \Theta^2)}}$, $\omega_{рез} = 1 / \sqrt{L \times C'}$ – резонансная угловая частота колебательного контура, $\Theta = \sqrt{L / C'} / R_Д$ – добротность колебательного контура.

С учетом того, что $\omega \times L / R_Д = Q$ является добротностью дросселя, выражение (20) несложно привести к следующему виду:

$$\dot{U}_{мизм} = \dot{U}_Г \times \frac{(R + R_Д) \times Q}{R_Д(1 + Q^2)} - \dot{U}_Г \times j \times \left[\frac{K \times (G'_2 + G_2) \times Q}{R_Д(1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right] \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что напряжение на индуктивности $\dot{U}_{изм}$ содержит вещественную и мнимую составляющие, учитывая которые, выражение (21) можно представить в виде уравнения:

$$\dot{U}_{изм} = Re(\dot{U}_{изм}) + j \times Im(\dot{U}_{изм}) \quad (22)$$

где $Re(\dot{U}_{изм}) = F(R')$ – вещественная составляющая, являющаяся функцией активного сопротивления контролируемого участка металлической жилы круглого сечения 1 ДЭП; $Im(\dot{U}_{изм}) = F(G)$ – мнимая составляющая, являющаяся функцией объемного электрического сопротивления изоляции 1' контролируемого участка ДЭП.

Анализ выражения (22) показывает, что рассмотренное техническое решение позволяет регистрировать электрический сигнал $\dot{U}_{изм}$, содержащий информацию о текущих электрических параметрах контролируемого участка ДЭП.

Для определения $Re(\dot{U}_{изм})$ и $Im(\dot{U}_{изм})$ воспользуемся методом квадратурной демодуляции для измерения комплексных параметров информационного сигнала [30], структурная блок-схема которого представлена на рисунке 5, где: ГГС – генератор гармонического сигнала; ГКСС – генератор косинусно-синусного сигналов; СМ1 и СМ2 – соответственно смесители сигналов; ФНЧ1 и ФНЧ2 – фильтры низкой частоты.

Из запитывающего КЯ гармонического сигнала $u_r(t) = U_r \times \sin \omega_0 t$, поступающего от ГГС, посредством ГКСС формируются косинусно-синусные сигналы (той же частоты, что и информационный сигнал), являющиеся опорными напряжениями соответственно для СМ1 (первичный канал) и СМ2 (вторичный канал):

$$u_{oc}(t) = U_{oc} \times \cos(\omega_0 \times t); u_{os}(t) = U_{os} \times \sin(\omega_0 \times t). \quad (23)$$

В соответствии с функциональным назначением СМ1 и СМ2 и с учетом (23) для их выходных информационных сигналов можем соответственно записать:

$$u_{изм}(t) \times u_{oc}(t) = \frac{M_1 \times U_{изм} \times U_{oc}}{2} \times \sin(\omega_0 \times t + \varphi_0) \times \cos(\omega_0 \times t + \varphi^*) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{M_1 \times U_{изм} \times U_{oc}}{2} \times [\sin(\varphi_0 - \varphi^*) + \sin(2 \times \omega_0 \times t + \varphi_0 + \varphi^*)]; \quad (24)$$

$$u_{изм}(t) \times u_{os}(t) = \frac{M_2 \times U_{изм} \times U_{os}}{2} \times \sin(\omega_0 \times t + \varphi_0) \times \sin(\omega_0 \times t + \varphi^*) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{M_2 \times U_{изм} \times U_{os}}{2} \times [\cos(\varphi_0 - \varphi^*) - \cos(2 \times \omega_0 \times t + \varphi_0 + \varphi^*)] \quad (25)$$

Анализ выражений (24) и (25) говорит о том, что в выходных сигналах СМ1 и СМ2 присутствуют как постоянные составляющие, так и составляющие, частоты которых вдвое превышают частоту питающего напряжения \dot{U}_r .

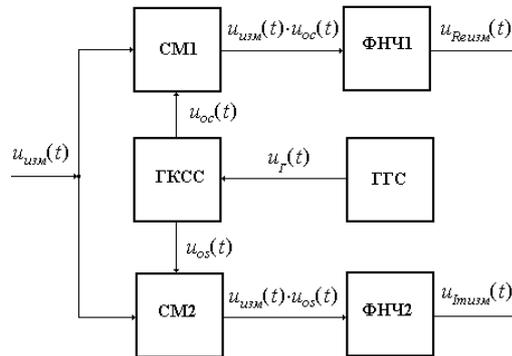


Рис. 5. Структурная блок-схема реализации метода квадратурной демодуляции *Fig. 5. Structural block diagram of implementation using the quadrature demodulation method*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Сигналы с выходов СМ1 и СМ2 поступают на входы ФНЧ1 и ФНЧ2, выделяющие постоянные и подавляющие высокочастотные составляющие. В этом случае на выходах ФНЧ1 и ФНЧ2 КД с учетом (24) и (25) получим соответственно квадратурные составляющие в виде:

$$U_{Reизм} = \frac{M_1 \times S_1 \times U_{изм} \times U_{ос}}{2} \times \cos(\varphi_0 - \varphi^*);$$

$$U_{Imизм} = \frac{M_2 \times S_2 \times U_{изм} \times U_{ос}}{2} \times \sin(\varphi_0 - \varphi^*);$$
(26)

где $M_1=M_2$ – коэффициенты преобразования смесителей сигналов; S_1 и S_2 – коэффициенты преобразования соответственно ФНЧ1 и ФНЧ2.

После соответствующего цифрового преобразования информационные сигналы (26) поступают в блок алгоритмической обработки сигналов, на выходах которого получают информацию о численных значениях параметров контролируемого участка ДЭП в соответствии со следующими алгоритмами:

$$R = \frac{U_{Reизм} \times R_d \times (1 + Q^2) - \dot{U}_Г \times Q \times R_d}{\dot{U}_Г \times Q}; G = \frac{U_{Imизм} \times R_d \times (1 + Q^2) - \dot{U}_Г \times Q^2 \times R_d}{\dot{U}_Г \times K \times Q}.$$
(27)

По вычисленным в соответствии с алгоритмами (27) значениям R и G оцениваются техническое состояние контролируемого ДЭП.

Структурная блок-схема варианта аппаратной реализации описанного способа оперативного неразрушающего контроля представлена на рисунке 6, где ОК – образец контроля; Γ – генератор возбуждающего напряжения $\dot{U}_Г$; ФОН – формирователь опорных напряжений; КЯ – кондуктометрическая ячейка; Д – дроссель; У – усилитель; СД и КД – соответственно синфазный и квадратурный детекторы; ВМ – вычислительный модуль; БИП – блок исходных данных; \dot{U} – масштабированное измеренное напряжение.

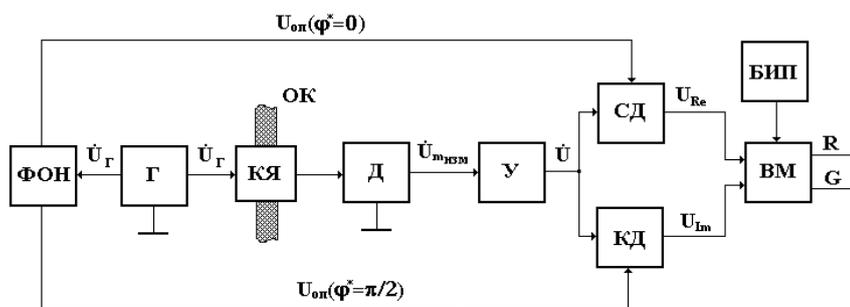


Рис. 6. Блок-схема аппаратной реализации способа оперативного неразрушающего контроля *Fig. 6. Block diagram of hardware implementation of the method of operational non-destructive testing*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Разработка способа оперативного неразрушающего допускового контроля параметров электрических кабелей

На основании сделанных выводов и проведенного анализа варианта схмотехнического решения можно предложить новый способ оперативного неразрушающего допускового контроля параметров электрических кабелей. Пример реализации данного способа представлен на рисунке 7.

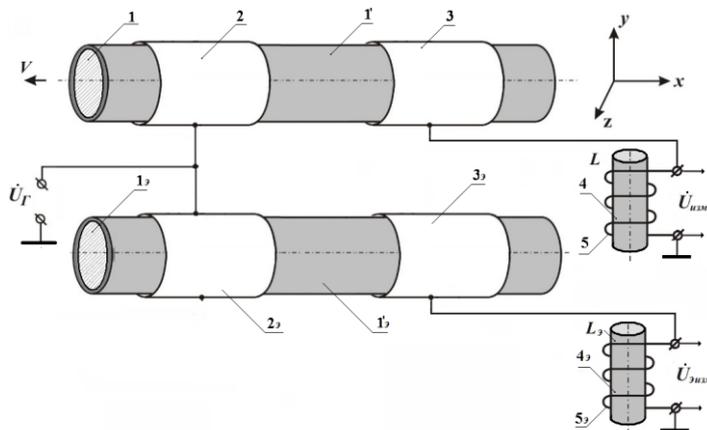


Рис. 7. Обобщенная схема способа оперативного допускового неразрушающего контроля *Fig. 7. Generalized scheme of the method of operational non-destructive testing*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Основными функциональными элементами данного способа являются два измерительных контура, запитываемых синусоидальным напряжением \dot{U}_r .

Первый измерительный контур (рабочий) состоит из следующих конструктивных элементов: 1 и 1' – соответственно, контролируемый участок металлической жилы круглого сечения исследуемого ДЭП и диэлектрическая изоляция этого участка; 2 и 3 – металлические цилиндрические внешние электроды соответственно ЦК С и ЦК С'; L, 4 и 5 – соответственно индуктивность, магнитопровод и электрическая обмотка дросселя первого контура; $U_{изм}$ – информационный сигнал, снимаемый с обмотки 5 дросселя первого контура.

Второй измерительный контур (эталонный) содержит следующие конструктивные элементы: 1э и 1э – соответственно участок металлической жилы круглого сечения эталонного электрического провода конечной длины (ЭПКД) и диэлектрическая изоляция этого участка; 2э и 3э – металлические цилиндрические внешние электроды соответственно ЦК Сэ и ЦК С'э; Lэ, 4э и 5э – соответственно индуктивность, магнитопровод и электрическая обмотка дросселя второго контура; $\dot{U}_{эизм}$ – информационный сигнал, снимаемый с обмотки 5э дросселя второго контура. Следует отметить, что все ЦК измерительных контуров обладают идентичными конструктивными параметрами, а в качестве ЭПКД берется отрезок электрического провода с известными электрическими параметрами однотипный контролируемому электрическому проводу.

Электрическая схема замещения варианта схемотехнического решения дуплексного неразрушающего контроля ДЭП представлена на рисунке 8.

Основная часть первого измерительного контура представляет собой рабочую кондуктометрическую ячейку $KЯ_p$, состоящую из ЦК С и ЦК С', которые в свою очередь соединены между собой исследуемым участком металлической жилы круглого сечения исследуемого ДЭП с соответствующей диэлектрической изоляцией и электрическим сопротивлением \dot{Z} .

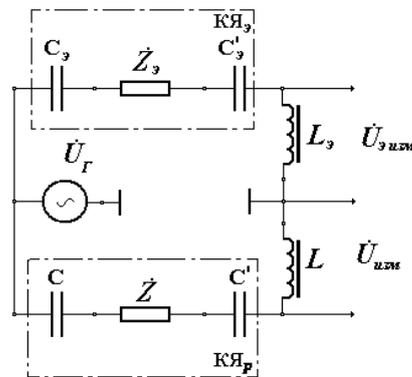


Рис. 8. Электрическая схема замещения *Fig. 8. Electrical equivalent circuit diagram of the* схемотехнического решения дуплексного *circuit solution for non-destructive testing* неразрушающего контроля

*Источники: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

С учетом заполнения ЦК С и ЦК С' бинарной средой (воздух и диэлектрическая изоляция) для их электрических емкостей можем записать следующее:

$$C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2}};$$

$$C' = \frac{C'_1 \times C'_2}{C'_1 + C'_2} = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon'_2 - 1}{\epsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2}}. \quad (28)$$

Аналогично первому измерительному контуру основная часть второго измерительного контура представляет собой эталонную кондуктометрическую ячейку $KЯ_э$, состоящую из ЦК Сэ и ЦК С'э, которые в свою очередь соединены между собой эталонным участком металлической жилы круглого сечения исследуемого ЭПКД с соответствующей диэлектрической изоляцией и электрическим сопротивлением $\dot{Z}_э$. Причем, все

электрические параметры эталонной кондуктометрической ячейки $KЯ_Э$ заранее известны и имеют определенные нормированные значения, соответствующие ДЭП требуемого состояния качества. С учетом заполнения ЦК $C_Э$ и ЦК $C'_Э$ бинарной средой (воздух и диэлектрическая изоляция) выражения для электрических емкостей этих ЦК можем представить в виде:

$$C_Э = \frac{C_{1Э} \times C_{2Э}}{C_{1Э} + C_{2Э}} = \frac{2\pi \times \varepsilon_0 \times l}{D - \frac{\varepsilon_{2Э} - 1}{\varepsilon_{2Э}} \times \frac{2\pi \times l \times G_{2Э}}{g_{2Э}}};$$

$$C'_Э = \frac{C'_{1Э} \times C'_{2Э}}{C'_{1Э} + C'_{2Э}} = \frac{2\pi \times \varepsilon_0 \times l}{D - \frac{\varepsilon'_{2Э} - 1}{\varepsilon'_{2Э}} \times \frac{2\pi \times l \times G'_{2Э}}{g'_{2Э}}}. \quad (29)$$

Аналогично выражению (21) для первого и второго измерительных контуров можем соответственно записать:

$$\dot{U}_{изм} = \dot{U}_Г \times \frac{(R + R_Д) \times Q}{R_Д(1 + Q^2)} - \dot{U}_Г \times j \times \left[\frac{K \times (G'_2 + G_2) \times Q}{R_Д(1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right];$$

$$\dot{U}_{Эизм} = \dot{U}_Г \times \frac{(R_Э + R_Д) \times Q}{R_Д \times (1 + Q^2)} - \dot{U}_Г \times j \times \left[\frac{K \times (G'_{2Э} + G_{2Э}) \times Q}{R_Д \times (1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right]. \quad (30)$$

Определим разностную величину между $\dot{U}_{изм}$ и $\dot{U}_{Эизм}$ в соответствии с выражением вида:

$$\Delta \dot{U}_{изм} = \dot{U}_{Эизм} - \dot{U}_{изм} = \dot{U}_Г \times \frac{Q}{R_Д(1 + Q^2)} \times \Delta R - \dot{U}_Г \times j \times \frac{K \times Q}{R_Д(1 + Q^2)} \times \Delta G \quad (31)$$

Перепишем (31) в более обобщенном виде:

$$\Delta \dot{U}_{изм} = Re(\Delta \dot{U}_{изм}) + j \times Im(\Delta \dot{U}_{изм}) \quad (32)$$

Для определения $Re(\Delta \dot{U}_{изм})$ и $Im(\Delta \dot{U}_{изм})$ воспользуемся также методом квадратурной демодуляции для измерения комплексных параметров информационного сигнала (рис. 4). Тогда в результате несложных преобразований получим:

$$\Delta U_{Reизм} = \frac{M_1 \times S_1 \times U_{изм} \times U_{OC}}{2} \times \cos(\varphi_0 - \varphi^*);$$

$$\Delta U_{Imизм} = \frac{M_2 \times S_2 \times U_{изм} \times U_{OS}}{2} \times \sin(\varphi_0 - \varphi^*), \quad (33)$$

В соответствии с (31) и (33) можем записать:

$$\Delta R = \frac{\Delta \dot{U}_{Reизм} \times R_Д \times (1 + Q^2)}{\dot{U}_Г \times Q}; \quad \Delta G = \frac{\Delta \dot{U}_{Imизм} \times R_Д(1 + Q^2)}{\dot{U}_Г \times K \times Q}. \quad (34)$$

По результатам сопоставления вычисленных значений разностных величин ΔR и ΔG с соответствующими заданными эталонными (допусковыми) величинами $\Delta R_Э$ и $\Delta G_Э$ принимается решение о соответствии контролируемого ДЭП заданным требованиям качества.

Структурная блок-схема варианта аппаратной реализации способа допускового неразрушающего контроля представлена на рисунке 9, где ОК_Э – эталонный образец контроля; ОК_Р – рабочий образец контроля; Г – генератор возбуждающего напряжения; ФОН – формирователь опорных напряжений; КЯ_Э – эталонная кондуктометрическая ячейка; КЯ_Р – рабочая кондуктометрическая ячейка; Д_Э и Д_Р – соответственно дроссель эталонной и рабочей ячеек; ИУ – инструментальный усилитель; СД и КД – соответственно синфазный и квадратурный детекторы; ВМ – вычислительный модуль; БИП – блок исходных данных; БПР – блок принятия решений.

Особенностью функционирования аппаратной реализации способа допускового неразрушающего контроля является использование инструментального усилителя (ИУ), имеющего дифференциальный вход и работающего в режиме масштабирующего вычитателя. В процессе выполнения ИУ процедурной операции определяется не только разностная величина между входными измерительными сигналами, но и осуществляется соответствующее подавление синфазной помехи, что существенно повышает точность измерительных преобразований в целом. Посредством БПР производится сопоставление вычисленных значений информативных параметров ΔR и ΔG с соответствующими заданными эталонными (допусковыми) величинами $\Delta R_Э$ и $\Delta G_Э$. В случае, если $\Delta R \geq \Delta R_Э$ или

(например, в процессе изготовления) кабелей, причем точность и достоверность контроля не зависит от величины и равномерности скорости перемещения кабеля;

– использование электродов в виде разъемных полуцилиндров, что позволяет использовать данные способы контроля в реальном масштабе времени как при изготовлении кабеля, так и на действующих кабельных линиях без нарушения их целостности;

– возможность создания простых систем отбраковки кабеля, имеющего параметры, выходящие за допустимые пределы без предварительного введения в систему предельно допустимых параметров, т.к. все электрические параметры эталонной кондуктометрической ячейки заранее известны и имеют определенные нормированные значения, соответствующие кабелю с требуемым состоянием качества.

– простота в использовании при контроле параметров как в процессе изготовления кабеля в заводских условиях или его отбраковки в процессе укладки, так и в условиях эксплуатации.

Следует также отметить, что разработанный способ может быть использован не только для диагностики электрических кабелей и проводов, но и для других металлических изделий с большой длиной и малым поперечным сечением круглой формы, имеющих внешнее покрытие или оболочку из изоляционных материалов, обеспечивающих защиту от агрессивного воздействия внешней среды, например, металлополимерных тросов, проволоки, стержней и т.п.

Таким образом, по сравнению с известными разработанные способы контроля обеспечивают не только расширение эксплуатационных возможностей за счет комплексного контроля как электропроводящих, так и электроизоляционных свойств кабельной продукции, но и расширение области их применения.

Литература

1. Бадалян Н. П., Колесник Г. П., Андрианов Д. П., Чебрякова Ю. С. Кабельные и воздушные линии электропередачи. Владимир: ВлГУ, 2019. 259 с.
2. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. Санкт-Петербург: "Политех-Пресс", 2021. 688 с.
3. Antony Ndolo, İsmail Hakki Çavdar. Current state of communication systems based on electrical power transmission lines. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2021, 9. doi.org/10.1186/s43067-021-00028-9.
4. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Корякин С.В. Адаптер-трансвер для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика, 2020, Т. 20, № 3. С. 97-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power200310>.
5. Гранкина С.В., Гиниатуллин А.Р., Крючкова Н.А. Развитие мирового рынка кабельно-проводниковой продукции // Экономика и предпринимательство, 2022, № 9 (146). С. 178-182.
6. Бадалян Н. П., Колесник Г. П., Андрианов Д. П., Чебрякова Ю. С. Кабельные и воздушные линии электропередачи. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. 260 с.
7. Перцев Ю.А., Писаревский Ю.В. Техника высоких напряжений. Воронеж: ВГТУ, 2013. 107 с.
8. Буланенков В. А. Факторы, влияющие на старение изоляции в электротехнических устройствах // 2023. №29 (127).
9. 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.
10. Брякин И. В., Бочкарев И. В. Неразрушающий контроль металлических длинномерных объектов. Lambert Academic Publishing, 2021. 177 с.
11. Пантелеев А.С., Словесный С.А. Неразрушающие способы оценки состояния изоляции высоковольтных силовых кабелей // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения), Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. Том I. 2019, С. 54-56.
12. Виноградов А.А., Стрекозова М.В. Диагностика и контроль силовых кабелей // КИП и автоматика: Обслуживание и ремонт, 2020, № 3. С. 26-30.
13. Сайфутдинов З.Г., Башмаков Д.А., Ильин В.И. Система мониторинга и диагностики электрических кабелей // Приборы. 2023. № 9 (279). С. 46-50.
14. Кузьмин Д.Г., Кравченко Г.А., Львова Э.Л., и др. Метод контроля состояния кабельной линии и её основных элементов в рабочем режиме // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 127-132.

15. Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т.26. No 4. С. 89-99. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.
16. Banerjee S., Drapeau J. -F. Diagnostic Accuracy and Technical Considerations for MV Cable Field Partial Discharge Measurements, 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 24-33, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991454.
17. Lee H. M., Lee G. S., Kwon G. -Y., et al. Industrial Applications of Cable Diagnostics and Monitoring Cables via Time-Frequency Domain Reflectometry, in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 2, pp. 1082-1091, 15 Jan.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.2997696.
18. 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. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10.
19. Бочкарев И.В., Брякин И.В. Оперативный контроль качества электропроводящих элементов кабеля // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 55-63. doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63.
20. Атрашенко О.С., Скорикова Е.М. Современные методы контроля изоляции кабелей // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2017. № 2 (19). С. 36-40.
21. Пантелеев А.С., Словесный С.А. Неразрушающие способы оценки состояния изоляции высоковольтных силовых кабелей // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения). Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. 2019. С. 54-56.
22. Auzanneau F. Wire troubleshooting and diagnosis: Review and perspectives. 2013 Progress In Electromagnetics Research, 2013, В 49:253-279. DOI:10.2528/PIERB13020115.
23. Редько, В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий: монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 928 с.
24. Vavilova G., Yurchenko V., Keyan L. Influence of the Insulation Defects Size on the Value of the Wire Capacitance. In: Minin, I.V., Uchaikin, S., Rogachev, A., Starý, O. (eds) Progress in Material Science and Engineering. Studies in Systems, Decision and Control, 2021, vol 351. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_11.
25. Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В., Белянков В.Ю. Электроемкостный измерительный преобразователь для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 35-43.
26. Li C. et al. Experimental study of XLPE power cable insulation detection based on the electrical capacitance tomography sensor, 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510556.
27. Batalović M., Zildžo H., Matoruga H., et al. Detection of Defect Presence inside the Insulation of Cable Accessories through Changes in Cable Capacitance, 2019 XXVII International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAT47117.2019.8938874.
28. Bryakin I.V., Bochkarov I.V., Khrumshin V.R., Gasiyarov V.R., Liubimov I.V. Power transformer condition monitoring based on evaluating oil proper-ties // Machines. Basel: 2022. Т. 10. № 8. С. 630. (Scopus).
29. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Гунина М.Г., Иззатов А.Ж. Разработка и исследование системы оперативного контроля качества трансформаторного масла // Проблемы автоматики и управления, 2023. № 1 (46). С. 46-58.
30. Глушков А. Н., Литвиненко В. П., Литвиненко Ю. В. Цифровые алгоритмы обнаружения и демодуляции радиосигналов. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. 153 с.

Авторы публикации

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией «Информационно-измерительные системы», Институт машиноведения, автоматики и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>. E-mail: bivas2006@yandex.ru

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>. E-mail: elmech@mail.ru

Храмшин Вадим Рифхатович – д-р техн. наук, профессор, директор института энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет

им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>. E-mail: hvrnmg@gmail.com

References

1. Badalyan N. P., Kolesnik G. P., Andrianov D. P., Chebryakova Yu. S. Cable and overhead power transmission lines. - Vladimir: VISU, 2019. 259 p. (In Russ).
2. Dmitriev M. V. High-voltage cable lines. St. Petersburg: "Polytech-Press", 2021. 688 p. (In Russ).
3. Antony Ndolo, İsmail Hakki Çavdar. Current state of communication systems based on electrical power transmission lines. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2021, 9. (In Russ). doi.org/10.1186/s43067-021-00028-9.
4. Bryakin I. V., Bochkarev I. V., Koryakin S. V. Adapter-transceiver for HF equipment of PLC technologies // Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering", 2020, Vol. 20, No. 3. P. 97-107. (In Russ). doi: <http://dx.doi.org/10.14529/power200310>.
5. Grankina S.V., Giniatullin A.R., Kryuchkova N.A. Development of the world market of cable and wire products // Economy and Entrepreneurship, 2022, No. 9 (146). P. 178-182. (In Russ).
6. Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Andrianov D.P., Chebryakova Yu.S. Cable and overhead power transmission lines. – Vladimir: Publishing house of VISU, 2019. 260 p. (In Russ).
7. Pertsev Yu.A., Pisarevsky Yu.V. High Voltage Engineering. - Voronezh: VSTU, 2013. 107 p. (In Russ).
8. Bulanenkov V.A. Factors Affecting the Aging of Insulation in Electrical Devices // 2023. No. 29 (127). (In Russ).
9. Kholodny S.D., Serebryannikov S.V., Boev M.A. Testing and Diagnostic Methods in Electrical Insulation and Cable Engineering. Moscow: MPEI Publishing House, 2016. 232 p. (In Russ).
10. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Non-destructive Testing of Long Metal Objects. Lambert Academic Publishing, 2021. 177 p.
11. Pantelev A.S., Slovesny S.A. Non-destructive methods for assessing the insulation condition of high-voltage power cables // State and prospects for the development of electrical and thermal technology (Benardos readings), Proceedings of the International (XX All-Russian) scientific and technical conference. Vol. I. 2019, pp. 54-56. (In Russ).
12. Vinogradov A.A., Strekozova M.V. Diagnostics and control of power cables // Instrumentation and automation: Maintenance and repair, 2020, No. 3. pp. 26-30. (In Russ).
13. Saifutdinov Z.G., Bashmakov D.A., Ilyin V.I. System for monitoring and diagnostics of electrical cables // Devices. 2023. No. 9 (279). P. 46-50. (In Russ).
14. Kuzmin D.G., Kravchenko G.A., Lvova E.L., Makarov A.M., Stolyarov S.V. Method for monitoring the condition of a cable line and its main elements in operating mode // Bulletin of the Chuvash University. 2019. No. 3. P. 127-132. (In Russ).
15. Balobanov R.N., Bulatova V.M., Kryuchkov N.S., Shafikov I.I. Optimization of power cable line monitoring systems // News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2024. Vol.26. No. 4. Pp. 89-99. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.
16. Banerjee S., Drapeau J. -F. Diagnostic Accuracy and Technical Considerations for MV Cable Field Partial Discharge Measurements, 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 24-33, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991454.
17. Lee H. M., Lee G. S., Kwon G. -Y., et al. Industrial Applications of Cable Diagnostics and Monitoring Cables via Time–Frequency Domain Reflectometry, in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 2, pp. 1082-1091, 15 Jan.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.2997696.
18. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Development of a New Method for Flaw Detection of Electric Cables // Electrical Systems and Complexes. 2018. No. 4(41). P. 4-10. (In Russ). doi: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10.
19. Bochkarev I.V., Bryakin I.V. Operational quality control of conductive cable elements // Electrical systems and complexes. 2020. No. 2 (47). P. 55-63. (In Russ). doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63.
20. Atrashchenko O.S., Skorikova E.M. Modern methods of cable insulation control // Energy and resource saving: industry and transport. 2017. No. 2 (19). P. 36-40. (In Russ).
21. Pantelev A.S., Slovesny S.A. Non-destructive methods for assessing the insulation condition of high-voltage power cables // In the collection: Status and prospects for the development of electrical and thermal technology (Benardos readings). Proceedings of the International (XX All-Russian) Scientific and Technical Conference. 2019. P. 54-56. (In Russ).
22. Auzanneau F. Wire troubleshooting and diagnosis: Review and perspectives. 2013Progress In Electromagnetics Research, 2013, B 49:253-279. DOI:10.2528/PIERB13020115.
23. Redko, V.V. Electrospark testing of cable insulation quality: monograph. Tomsk: TPU Publishing House, 2013. 928 p. (In Russ).

24. Vavilova G., Yurchenko V., Keyan L. Influence of the Insulation Defects Size on the Value of the Wire Capacitance. In: Minin, I.V., Uchaikin, S., Rogachev, A., Starý, O. (eds) Progress in Material Science and Engineering. Studies in Systems, Decision and Control, 2021, vol 351. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_11.

25. Goldstein A.E., Vavilova G.V., Belyankov V.Yu. Electrocapacitive measuring transducer for technological control of linear capacitance of electric cable during production // Defectoscopy. 2015. No. 2. pp. 35-43. (In Russ).

26. Li C. et al. Experimental study of XLPE power cable insulation detection based on the electrical capacitance tomography sensor, 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510556.

27. Batalović M., Zildžo H., Matoruga H., et al. Detection of Defect Presence inside the Insulation of Cable Accessories through Changes in Cable Capacitance, 2019 XXVII International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAT47117.2019.8938874.

28. Glushkov A. N., Litvinenko V. P., Litvinenko Yu. V. Digital algorithms for detection and demodulation of radio signals. Voronezh: Publishing house of VSTU, 2020. 153 p. (In Russ).

29. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Liubimov I.V. Power transformer condition monitoring based on evaluating oil proper-ties // Machines. Basel: 2022. Vol. 10. No. 8. P. 630. (Scopus).

30. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Gunina M.G., Izzatov A.Zh. Development and study of the system for operational quality control of transformer oil // Problems of automation and control, 2023. No. 1 (46). P. 46-58 (In Russ).

Authors of the publication

Ivan V. Bryakin – Institute of Mechanical Engineering, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>. *E-mail:* bivas2006@yandex.ru

Igor V. Bochkarev – Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>. *E-mail:* elmech@mail.ru

Vadim R. Khramshin – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>. *E-mail:* hvrnmg@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **20.01.2025 г.**

Отредактировано **29.01.2025 г.**

Принято **04.02.2025 г.**