

УДК 620.179.18

И.В. Брякин<sup>1</sup>, И.В. Бочкарев<sup>1,2</sup>, М.Г. Гунина<sup>2</sup>, С.Д. Лотц<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР

<sup>2</sup>Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

### СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Качество обмоточных проводов однозначно определяет работоспособность и надежность электротехнического оборудования. Ухудшение свойств проводов приводит к выходу из строя оборудования и вызывает тем самым значительный материальный ущерб, связанный как с ремонтом самого этого оборудования, так и с простым техникских систем, в которых оно используется. Поэтому необходим постоянный контроль качества обмоточных проводов на всех его жизненных этапах: при их изготовлении, монтаже, эксплуатации, ремонте. Для этого предложены новые способы оперативного неразрушающего контроля дефективности обмоточных проводов и устройства для их реализации, которые основаны на электроемкостном способе контроля параметров изолированных проводов и позволяют провести диагностику обоих конструктивных элементов проводов – как их токоведущих жил, так и изоляции, а также производить оперативную отбраковку дефектных проводов без необходимости вычисления параметров их дефектов. При работе устройств диагностики обеспечивается квазирезонансный режим функционирования, при котором выходной сигнал достигает своего максимально возможного значения. Это повышает эффективность проведения контроля качества обмоточных проводов. Предложенные системы обеспечивают возможность диагностики не только электрических проводов, но и других типов кабельной продукции, а также металлических изделий с большой длиной и малым поперечным сечением круглой формы, в том числе имеющих внешнее покрытие из изоляционных материалов, например, металлополимерных тросов, проволоки, стержней и т.п.

**Ключевые слова:** обмоточные провода, металлическая электропроводящая жила, изоляционное покрытие, неразрушающий контроль, электроемкостный способ контроля, квазирезонансный режим, квадратурная демодуляция, двухканальное квадратурное синхронное детектирование

#### Введение

Электротехническое оборудование (ЭО) используется практически во всех сферах человеческой деятельности – от промышленности и транспорта до бытовой сферы. Наиболее распространенным видом ЭО являются электрические машины: электродвигатели, электрогенераторы и трансформаторы. Например, согласно исследованию компании Research Nester, объем рынка электродвигателей в 2025 году составил более 174,37 млрд долларов США, причем он будет демонстрировать устойчивый рост, и к 2035 году ожидается его рост до 346, 23 млрд долларов США. Причины такого роста спроса на электродвигатели во всем мире обуславливаются развитием технологического прогресса в таких отраслях, в первую очередь робототехники, новых электрифицированных транспортных средств, обрабатывающей промышленности и т.д. Согласно отчетам компании MarketsandMarkets, мировой рынок трансформаторов среднего напряжения также будет демонстрировать устойчивый рост в связи с модернизацией электросетей, расширением интеграции возобновляемых источников энергии и требованиями дальнейшей стабилизации передачи электроэнергии как в развитых, так и развивающихся экономиках. По мере продолжения инвестиций в инфраструктуру и развитие трансформаторных технологий трансформаторы среднего напряжения будут все шире внедряться, играя тем самым решающую роль в повышении надежности и эффективности энергосистем.

Очевидно, что эффективность, надежность и долговечность являются чрезвычайно важными требованиями к ЭО. При этом, как показывает анализ опыта эксплуатации ЭО, их наиболее уязвимым элементом является обмотка. Например, 95–98% общего количества

отказов асинхронных электродвигателей приходится на долю обмоток статора, 93% отказов обусловлены пробоем межвитковой изоляции, в то время как на межфазную приходится всего 5%, а на корпусную – 2% [1, 2]. Аналогичная ситуация наблюдается и в трансформаторах, выход из строя которых также в основном обусловлен повреждением обмотки [3, 4]. Таким образом, именно качество и состояние обмотки, и в первую очередь её витковой изоляции, в основном и определяет надежность и долговечность обмотки в целом.

Активная часть любой электрической машины (ЭМ) содержит многовитковую обмотку, которая служит для создания магнитного поля, и магнитопровод, по которому это поле замыкается. Обмотка выполняется из обмоточных проводов, которые изготавливают одножильными, обычно из меди и гораздо реже из алюминия. Поскольку по обмотке протекает электрический ток, то отдельные ее витки должны быть изолированы друг от друга, т.е. обмоточные провода должны иметь собственную межвитковую изоляцию. Наиболее распространенными видами изоляции обмоточных проводов для производства обмоток электрических машин является волокнистая, эмалевая и комбинированная изоляция. Таким образом, обмоточные провода имеют два конструктивных элемента: металлическую электропроводящую жилу и слой изоляции на этой жиле из диэлектрического материала [5].

По статистике, обмотка является наиболее уязвимым узлом ЭМ. Так, если рассматривать асинхронные электродвигатели (АД), которые составляют львиную долю всех находящихся в эксплуатации ЭМ, то выход их из строя приводит к весьма негативным последствиям. При этом ущерб складывается из двух составляющих: 1) необходимо выполнить достаточно трудоемкий и дорогостоящий ремонт АД; 2) поскольку дефектный АД для его ремонта необходимо вывести из эксплуатации, то это приводит к вынужденной остановке работы оборудования.

С учетом огромного количества АД этот ущерб получается чрезвычайно большим. Витковые замыкания возникают по целому ряду причин, например, из-за ухудшения электрофизических характеристик изоляции вследствие её старения, перегрева обмотки вследствие перегрузки ЭМ, повреждение провода вследствие некачественной укладки обмотки и др. [6]. При этом совершенно очевидно, что значительное влияние на надежность обмотки оказывают собственные исходные параметры провода перед укладкой.

Очевидно, что из-за несовершенства технологических процессов, используемых при изготовлении обмоточных проводов [5, 7], свойства и характеристики элементов, входящих в их состав, могут изменяться. За счет этого возможны дефекты как изоляции, так и токоведущих жил. Например, вследствие растяжения провода под действием механических усилий при натяжении в процессе его изготовления могут появляться дефекты в изоляции, что значительно снижает пробивное напряжение и стойкость изоляции к воздействию растворителей в процессе пропитки и сушки, а также местные потери сечения электропроводящей жилы, что изменяет активное сопротивление данного участка провода. Таким образом, ухудшение свойств обмоточных проводов может привести в конечном счете к выходу из строя ЭМ и к значительным материальным потерям, а в ряде случаев и к катастрофическим последствиям и техногенным катастрофам вследствие прекращения работы оборудования, в котором данная машина используется. Поэтому при изготовлении необходим постоянный комплексный контроль качества обмоточных проводов, причем необходим контроль как их токоведущих жил, так и изоляции, поскольку токоведущие жилы непосредственно обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики, а изоляционное покрытие обеспечивает надежность и безопасность работы обмотки и ЭМ в целом.

### **Цель исследования**

При производстве проводов для изготовления обмоток ЭМ наиболее целесообразно проводить сплошной технологический контроль их качества, так как ЭМ является продуктом массового производства, и даже небольшое снижение производственного брака проводов может уменьшить количество эксплуатационных отказов ЭМ и дать тем самым

значительный экономический эффект. Очевидно, что такой контроль следует проводить методами неразрушающего контроля, которые не вызывают ухудшения эксплуатационных свойств проводов.

Существует большое количество различных неразрушающих способов контроля [8, 9]. Наиболее простой из них – это визуальный осмотр. Однако он может дать только информацию о наружных дефектах кабельных изделий, что явно недостаточно для их объективной диагностики, поскольку повреждения и износ могут происходить как внутри токопроводящих жил (в виде потерь сечения), так и в изоляционном покрытии (в виде старения изоляции), и при визуальном обследовании их не обнаружить. Известно большое количество различных способов контроля внутренних дефектов: измерение сопротивления изоляции; измерение емкости и диэлектрических потерь; измерение частичных разрядов; тепловизионный метод; измерение возвратного напряжения; измерение методом рефлектометрии (высокочастотным, импульсным); ультразвуковые и оптические методы измерения. Эти способы контроля описаны в целом ряде работ, например, в [10, 11]. Обычно известные диагностические способы позволяют выполнить контроль параметров одного определенного элемента кабеля – или токопроводящей жилы [12, 13], или изоляции [1, 2, 14], поэтому для каждого параметра требуется свой прибор контроля. Это делает системы контроля весьма дорогими и неудобными в эксплуатации. Поэтому необходимо разработать универсальный способ неразрушающего контроля параметров электрических проводов, позволяющий одновременно контролировать как их электропроводящие элементы, так и изоляцию.

### Результаты исследования и их обсуждение

Одним из способов неразрушающего контроля изоляции является электроемкостный [15-17]. Он основан на том, что любое кабельное изделие, в том числе изолированный провод, является, в сущности, цилиндрическим конденсатором с определенной электрической емкостью, величина которой зависит от геометрических размеров провода и физических свойств его изоляционного покрытия. Поэтому, контролируя изменение емкости, можно определить отклонения как электрических, так и геометрических параметров кабеля от нормируемых величин.

На основании анализа возможностей электроемкостного способа контроля предлагается новый способ оперативного неразрушающего контроля параметров изолированных проводов. Принципиальная конструкция устройства для реализации данного способа контроля показана на рисунке 1.

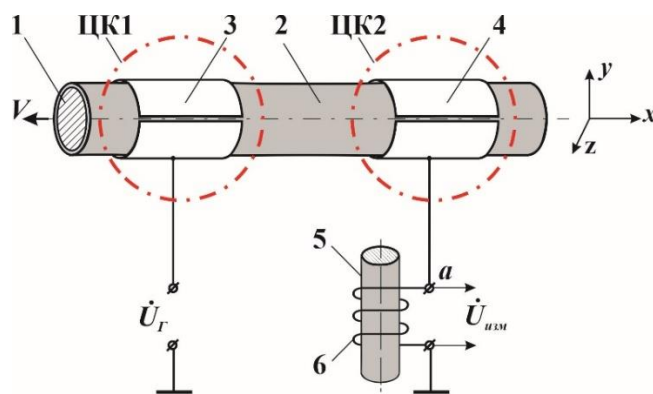


Рисунок 1 – Принципиальная конструктивная реализация устройства оперативного контроля параметров изолированных проводов:

1 и 2 – соответственно электропроводящая жила и диэлектрическая изоляция контролируемого участка провода; 3 и 4 – металлические трубчатые разрезные электроды; 5 и 6 – соответственно магнитопровод и электрическая обмотка дросселя

На рисунке 1 обозначено:  $\dot{U}_r$  – питающее синусоидальное напряжение;  $U_{изм}$  –

информационный выходной сигнал;  $V$  – скорость перемещения провода относительно неподвижных электродов 3 и 4. Конструктивно электроды 3 и 4 совместно с контролируемой частью провода образуют измерительную ячейку (ИЯ), электрические параметры которой, как будет показано ниже, фактически характеризуют электрические параметры провода.

Емкостный способ контроля обмоточных проводов заключается в измерении погонной электрической ёмкости контролируемого участка, которая зависит от его размеров, формы и диэлектрической постоянной вещества, заполняющего пространство между электродами. Указанная емкость  $C_{цк}$  для двухэлектродного цилиндрического конденсатора (ЦК) с коаксиально расположенными цилиндрическими электродами равна:

$$C_{цк} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot l}{\ln(r_{внеш}/r_{внут})}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между электродами;  $l$  – длина провода;  $r_{внут}$  и  $r_{внеш}$  – радиусы соответственно внутреннего и внешнего электродов.

В предлагаемом устройстве образовано два двухэлектродных цилиндрических конденсатора ЦК1 и ЦК2, наружными электродами которых являются трубчатые разрезные электроды 3 и 4, а внутренними электродами – участки токопроводящей жилы, расположенные под соответствующими наружными электродами, причем межэлектродное пространство между наружными и внутренними электродами заполнено бинарной средой, состоящей из воздушного слоя и диэлектрического материала. Таким образом, каждый из таких двухэлектродных цилиндрических конденсаторов ЦК1 и ЦК2 представляет собой, в сущности, два последовательно соединенных конденсатора соответственно с воздухом и диэлектрическим материалом.

Тогда, например, для первого из указанных двухэлектродных ЦК1 электрическая емкость будет равна:

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

где  $C_1$  и  $C_2$  – соответственно, емкости конденсаторов с воздухом и диэлектриком.

Тогда, записав выражения для  $C_1$  и  $C_2$  с учетом (1) и подставив их в (2), получим

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

где  $r_0$  и  $r_1$  – радиусы внутреннего и внешнего электродов конденсатора  $C_1$ , заполненного воздухом;  $r_2$  – радиус внешнего электрода конденсатора  $C_2$ , заполненного диэлектрическим материалом (ДМ);  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрические постоянные воздуха и ДМ.

Примем, что слой воздуха с толщиной  $d_1 = (r_1 - r_0)$  и слой ДМ толщиной  $d_2 = (r_2 - r_1)$  условно равномерно распределены в межэлектродном пространстве между наружным электродом (трубчатым разрезным электродом 3) и внутренним электродом (токопроводящей жилой 1). Тогда средняя суммарная величина зазора между этими электродами будет составлять  $D = (d_1 + d_2)$ .

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

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

Следовательно, величина суммарной электрической емкости конденсатора ЦК1 равна

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{D - [(\varepsilon_2 - 1)/\varepsilon_2] \cdot d_2}. \quad (5)$$

Известно, что объемное электрическое сопротивление для провода, находящегося в межэлектродном пространстве ЦК с коаксиально расположенными электродами,

определяется выражением:

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

где  $d$  – толщина слоя ДМ, находящегося в межэлектродном пространстве ЦК;  $l$  – осевая длина ЦК1;  $g_v = g_2$  – удельное объемное электрическое сопротивление.

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

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{D - [(\varepsilon_2 - 1)/\varepsilon_2] \cdot [(2\pi \cdot l \cdot G_2)/g_2]}. \quad (7)$$

Тогда величина импеданса ЦК1 равна:

$$\dot{Z}_C = -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} = -j \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \left( D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{2\pi \cdot l \cdot G_2}{g_2} \right). \quad (8)$$

Очевидно, что для второго двухэлектродного цилиндрического конденсатора ЦК2, образованного наружным электродом 4 и внутренним электродом в виде токопроводящей жилы 1 провода и также заполненного бинарной средой из воздушного слоя и диэлектрического материала, величина импеданса вычисляется аналогично:

$$\dot{Z}_{C'} = -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C'} = -j \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \times \left( D - \frac{\varepsilon'_2 - 1}{\varepsilon'_2} \cdot \frac{2\pi \cdot l \cdot G'_2}{g'_2} \right), \quad (9)$$

Электрическая схема замещения устройства оперативного контроля параметров изолированных проводов представлена на рисунке 2, 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. Здесь  $L$  – индуктивность дросселя.

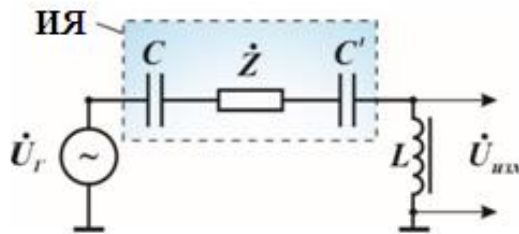


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения устройства оперативного контроля параметров изолированных проводов

На внешний электрод 3 (рис. 1) ЦК1  $C$  подается переменное синусоидальное напряжение  $\dot{U}_r$ . Внешний электрод 4 ЦК2  $C'$  имеет точку соединения «а» с электрической обмоткой б дросселя, что обеспечивает соответствующее последовательное электрическое соединение ЦК2 с этим дросселем, образуя, по своей сути, резонансный индуктивно-емкостный полумост. 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 ИЯ и дросселя. Фактически ИЯ образован конденсаторами  $C$  и  $C'$ , соединенными между собой проводом с комплексным сопротивлением:

$$\dot{Z} = R + j \cdot X, \quad (10)$$

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

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

$$\dot{Z} = R = \rho \cdot \lambda / S, \quad (11)$$

где  $\rho$ ,  $\lambda$  и  $S$  – соответственно удельное сопротивление, длина и площадь поперечного сечения контролируемого участка металлической жилы круглого сечения провода.

Используя (8), (9) и (11), определим импеданс для ИЯ:

$$\dot{Z}_я = \dot{Z}_C + \dot{Z}_{C'} + \dot{Z} = R - j \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \left[ 2D - 2 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \cdot \frac{\pi \cdot l \cdot (G'_2 + G_2)}{g} \right] = R + j \cdot K \cdot (G'_2 + G_2), \quad (12)$$

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

Определим импеданс электрического контура из последовательно соединенных ИЯ и дросселя:

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_я + \dot{Z}_д = R + R_д + j \cdot [K \cdot (G'_2 + G_2) + \omega \cdot L]. \quad (13)$$

При питании этого контура синусоидальным напряжением  $\dot{U}_Г$  в нем будет протекать электрический ток, равный

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_Г / \dot{Z}_0. \quad (14)$$

Подставив в (14) все необходимые составляющие, получим:

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_Г \cdot \frac{R + R_д}{R_д^2 + \omega^2 \cdot L^2} - \dot{U}_Г \cdot j \cdot \frac{K \cdot (G'_2 + G_2) + \omega \cdot L}{R_д^2 + \omega^2 \cdot L^2}. \quad (15)$$

Угловая частота  $\omega_0$  питающего напряжения  $\dot{U}_Г$  выбирается такой, при которой напряжение на индуктивности  $\dot{U}_{изм}$  в последовательном колебательном индуктивно-емкостном контуре достигает своего наибольшего значения  $\dot{U}_{мизм}$ :

$$\dot{U}_{мизм} = \dot{I}_0 \cdot \omega_0 \cdot L = \dot{U}_Г \cdot \frac{(R + R_д) \cdot \omega_0 \cdot L}{R_д^2 + \omega_0^2 \cdot L^2} - \dot{U}_Г \cdot j \cdot \frac{[K \cdot (G'_2 + G_2) + \omega_0 \cdot L] \cdot \omega_0 \cdot L}{R_д^2 + \omega_0^2 \cdot L^2}, \quad (16)$$

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

С учетом того, что  $\omega \cdot L / R_д = Q$  является добротностью дросселя, выражение (16) несложно привести к следующему виду:

$$\dot{U}_{мизм} = \dot{U}_Г \cdot \frac{(R + R_д) \cdot Q}{R_д(1 + Q^2)} - \dot{U}_Г \cdot j \cdot \left[ \frac{K \cdot (G'_2 + G_2) \cdot Q}{R_д(1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right]. \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что напряжение на индуктивности  $\dot{U}_{изм}$  содержит вещественную и мнимую составляющие:

$$\dot{U}_{мизм} = \text{Re}(\dot{U}_{мизм}) + j \cdot \text{Im}(\dot{U}_{мизм}), \quad (18)$$

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

Анализ выражения (18) показывает, что предложенное техническое решение позволяет регистрировать электрический сигнал  $\dot{U}_{мизм}$ , содержащий информацию о текущих электрических параметрах контролируемого участка изолированного провода.

Для определения  $\text{Re}(\dot{U}_{изм})$  и  $\text{Im}(\dot{U}_{изм})$  можно воспользоваться методом квадратурной демодуляции для измерения комплексных параметров информационного сигнала [18], реализуемым посредством двух синхронных детекторов. В результате для синфазной и квадратурной составляющих информационного сигнала получим:

$$U_{Reизм} = \frac{M_1 \cdot U_{изм} \cdot U_{OC}}{2} \cdot \cos(\varphi_0 - \varphi^*); \quad U_{Imизм} = \frac{M_2 \cdot U_{изм} \cdot U_{OS}}{2} \cdot \sin(\varphi_0 - \varphi^*), \quad (19)$$

где  $M_1 = M_2$  – коэффициенты преобразования синхронных детекторов.

После соответствующего цифрового преобразования информационных сигналов (19) в блоке алгоритмической обработки сигналов получают информацию о численных значениях параметров контролируемого участка электрического провода в соответствии со следующими алгоритмами:

$$R = \frac{U_{Reизм} \cdot R_D \cdot (1 + Q^2) - \dot{U}_Г \cdot Q \cdot R_D}{\dot{U}_Г \cdot Q}; \quad G = \frac{U_{Imизм} \cdot R_D \cdot (1 + Q^2) - \dot{U}_Г \cdot Q^2 \cdot R_D}{\dot{U}_Г \cdot K \cdot Q} \dots \quad (20)$$

По вычисленным в соответствии с алгоритмами (20) значениям  $R$  и  $G$  оценивают техническое состояние контролируемого электрического провода путем их сравнения с заданными нормированными показателями бездефектного участка контролируемого провода  $R_{зад}$  и  $G_{зад}$ .

### Дифференциальный способ сравнительного контроля ближайших участков электрического изолированного провода

Для задач оперативного технологического контроля, используя свойства заполненного бинарной средой двухэлектродного ЦК и алгоритмы обработки измерительной информации (20), предлагается новый способ неразрушающего электроемкостного контроля, основанного на реализации процедуры сравнения регистрируемых параметров ближайших (соседних) участков электрического изолированного провода.

Способ основан на том, что все возможные дефекты провода имеют относительно пространственно-разнесенное расположение, т.е. находятся на его различных участках. При этом считается, что вероятность нахождения дефектов одновременно на двух соседних участках провода пренебрежимо мала.

В этом случае появляется возможность реализации дифференциального метода измерения, при котором измеряемый параметр входного участка провода (первый по направлению его перемещения в процессе контроля) сравнивается с одноименным параметром выходного (последующего) участка провода (второй по направлению перемещения провода), условно имеющего изменения в зоне допустимых значений.

Обобщенная блок-схема такого дифференциального способа представлена на рисунке 3.

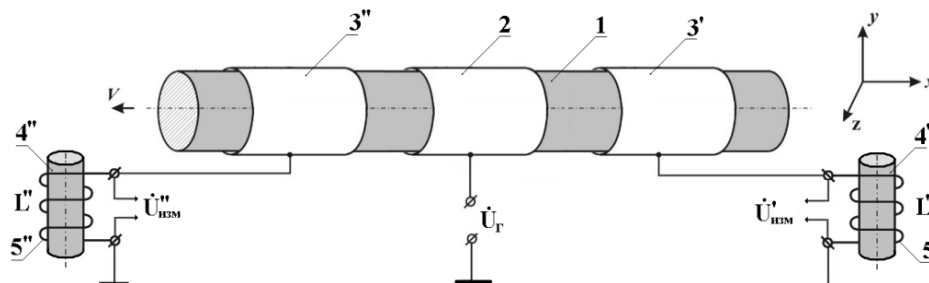


Рисунок 3 – Обобщенная схема реализации дифференциального способа контроля: 1 – контролируемый электрический изолированный провод; 2 – электрод активации; 3' и 3'' – электроды регистрации соответственно входной и выходной позиций контроля; 4' и 4'' – ферритовые магнитопроводы; 5' и 5'' – электрические обмотки

Электрод активации 2 образует с частью провода, расположенного в его внутреннем пространстве, ЦК с электрической емкостью  $C$ , а электроды регистрации 3' и 3'' образуют с частями провода, расположенных в их внутреннем пространстве, ЦК с электрическими емкостями соответственно  $C'$  и  $C''$ . Ферритовые магнитопроводы 4' и 4'' и электрические обмотки 5' и 5'' образуют соответственно дроссели входной и выходной позиций контроля с индуктивностями  $L'$  и  $L''$ . Электрод 3' совместно с индуктивностью  $L'$ , а также электрод 3'' с индуктивностью  $L''$  конструктивно образуют соответственно входную и выходную позиции контроля.

При проведении контроля на электрод активации 2 подают переменное напряжение активации  $\dot{U}_r$ , а на входной и выходной позициях контроля регистрируют информационные электрические сигналы  $\dot{U}'_{изм}$  и  $\dot{U}''_{изм}$ . При этом провод 1 (например, при осуществлении контроля его эксплуатационных параметров в процессе производства или непосредственно перед укладкой) перемещают вдоль координаты  $x$  с линейной скоростью  $V$ .

Электрическая схема замещения варианта схмотехнического решения с учетом заполнения ЦК с электрическими емкостями  $C$ ,  $C'$  и  $C''$  соответствующими бинарными средами представлена на рисунке 4.

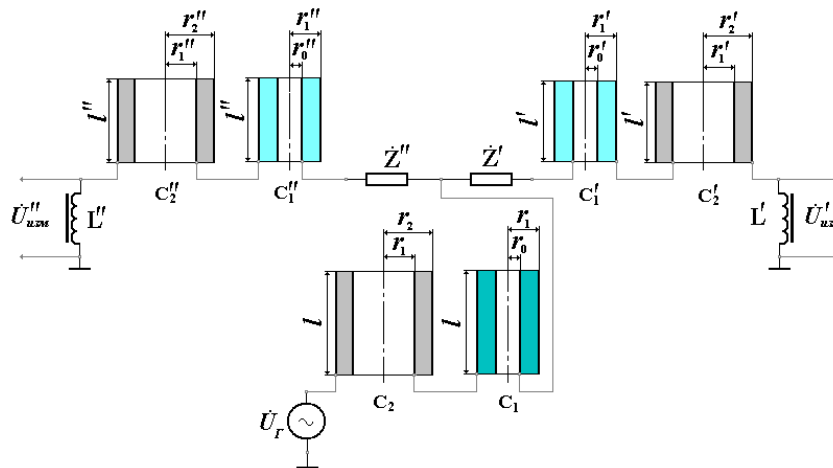


Рисунок 4 – Электрическая схема замещения ЦК с бинарным заполнением для схмотехнической реализации способа контроля

Для упрощения анализа особенностей функционирования схмотехнической реализации способа контроля рассмотрим вариант принципиальной электрической схемы этой реализации (рис. 3).

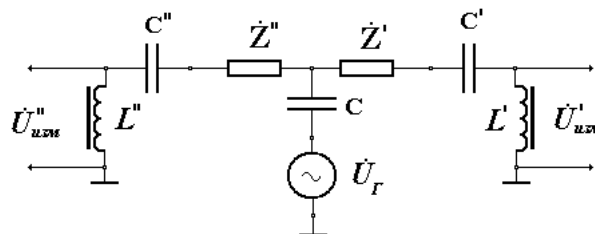


Рисунок 5 – Вариант принципиальной электрической схемы реализации способа контроля

Для основных элементов принципиальной электрической схемы, учитывая соотношение (2) и (7), можем соответственно записать:

$$C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}; \quad C' = \frac{C'_1 \times C'_2}{C'_1 + C'_2}; \quad C'' = \frac{C''_1 \times C''_2}{C''_1 + C''_2}.$$

С учетом (7) получим:

$$C = \frac{2\pi \times \varepsilon_0 \times l}{D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2}}; C' = \frac{2\pi \times \varepsilon_0 \times l'}{D - \frac{\varepsilon_2' - 1}{\varepsilon_2'} \times \frac{2\pi \times l' \times G_2'}{g_2'}}; C'' = \frac{2\pi \times \varepsilon_0 \times l''}{D - \frac{\varepsilon_2'' - 1}{\varepsilon_2''} \times \frac{2\pi \times l'' \times G_2''}{g_2''}}. \quad (21)$$

Принимая во внимание конструктивные особенности электрода активации, определяемые тем, что  $\varepsilon_2 \gg \varepsilon_2' \approx \varepsilon_2''$  и  $G_2 \gg G_2' \approx G_2''$ , принципиальную электрическую схему, приведенную на рисунке 4, можно представить в упрощенном виде (рис. 6).

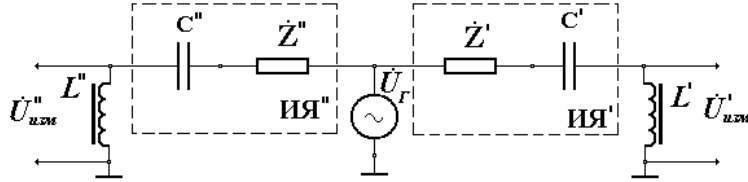


Рисунок 6 – Упрощённый вариант принципиальной электрической схемы схмотехнической реализации

В этом случае источником переменного напряжения  $\dot{U}_G$  активизируются измерительные ячейки  $IYA'$  и  $IYA''$ , образованные соответственно наборами элементов  $Z', C'$  и  $Z'', C''$ .

В соответствии с (10) и (11) определим импедансы измерительных ячеек  $IYA'$  и  $IYA''$ :

$$\dot{Z}'_{IYA} = R' - j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left( D - \frac{\varepsilon_2' - 1}{\varepsilon_2'} \times \frac{2\pi \times l \times G_2'}{g_2'} \right) = R' + j \times K \times G_2'; \quad (22)$$

$$\dot{Z}''_{IYA} = R'' - j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left( D - \frac{\varepsilon_2'' - 1}{\varepsilon_2''} \times \frac{2\pi \times l \times G_2''}{g_2''} \right) = R'' + j \times K \times G_2''.$$

Для импедансов электрических цепей входной и выходной позиций контроля можем записать:

$$\begin{aligned} \dot{Z}'_0 &= \dot{Z}'_{IYA} + \dot{Z}'_d = R' + R'_d + j \times (K \times G_2' + \omega \times L'); \\ \dot{Z}''_0 &= \dot{Z}''_{IYA} + \dot{Z}''_d = R'' + R''_d + j \times (K \times G_2'' + \omega \times L''). \end{aligned} \quad (23)$$

Электрические токи в электрических цепях входной и выходной позиций контроля определяются в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{I}'_0 &= \dot{U}_G / \dot{Z}'_0 = \dot{U}_G \times \frac{R'_d + R'}{R_d^2 + \omega^2 \times L^2} - \dot{U}_G \times j \times \frac{K \times G_2' + \omega \times L}{R_d^2 + \omega^2 \times L^2}; \\ \dot{I}''_0 &= \dot{U}_G / \dot{Z}''_0 = \dot{U}_G \times \frac{R''_d + R''}{R_d^2 + \omega^2 \times L^2} - \dot{U}_G \times j \times \frac{K \times G_2'' + \omega \times L}{R_d^2 + \omega^2 \times L^2}, \end{aligned} \quad (24)$$

где  $R_d = R'_d = R''_d$ ;  $L = L' = L''$ .

С учетом того, что угловая частота  $\omega$  питающего напряжения  $\dot{U}_G$  выбирается равной  $\omega_0$ , при которой электрические сигналы  $\dot{U}'_{тизм}$  и  $\dot{U}''_{тизм}$  на индуктивностях в соответствующих последовательных колебательных индуктивно-емкостных контурах достигают своих наибольших значений  $\dot{U}'_{тизм}$  и  $\dot{U}''_{тизм}$ , можем записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{тизм} &= \dot{I}'_0 \times \omega_0 \times L = \dot{U}_G \times \frac{(R' + R_d) \times Q}{R_d(1 + Q^2)} - \dot{U}_G \times j \times \left[ \frac{K \times G_2' \times Q}{R_d(1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right]; \\ \dot{U}''_{тизм} &= \dot{I}''_0 \times \omega_0 \times L = \dot{U}_G \times \frac{(R'' + R_d) \times Q}{R_d(1 + Q^2)} - \dot{U}_G \times j \times \left[ \frac{K \times G_2'' \times Q}{R_d(1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

Из выражения (25) следует, что электрические сигналы  $\dot{U}'_{мизм}$  и  $\dot{U}''_{мизм}$  содержат вещественную и мнимую составляющие, учитывая которые, выражения (25) можно представить в виде уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{мизм} &= Re(\dot{U}'_{мизм}) + j \times Im(\dot{U}'_{мизм}) = F(R') + j \times F(G'_2); \\ \dot{U}''_{мизм} &= Re(\dot{U}''_{мизм}) + j \times Im(\dot{U}''_{мизм}) = F(R'') + j \times F(G''_2). \end{aligned}$$

В результате аппаратной реализации процедуры двухканального квадратурного синхронного детектирования каждого из электрических сигналов  $\dot{U}'_{мизм}$  и  $\dot{U}''_{мизм}$  получим регистрируемые электрические сигналы следующего вида:

$$\begin{aligned} U'_{Reизм} &= \frac{S \times U'_{мизм} \times U_{OC}}{2} \times \cos(\varphi_0 - \varphi^*); & U'_{Imизм} &= \frac{S \times U'_{мизм} \times U_{OS}}{2} \times \sin(\varphi_0 - \varphi^*); \\ U''_{Reизм} &= \frac{S \times U''_{мизм} \times U_{OC}}{2} \times \cos(\varphi_0 - \varphi^*); & U''_{Imизм} &= \frac{S \times U''_{мизм} \times U_{OS}}{2} \times \sin(\varphi_0 - \varphi^*), \end{aligned}$$

В дальнейшем информационные сигналы  $U'_{Reизм}, U'_{Imизм}$  и  $U''_{Reизм}, U''_{Imизм}$  подвергаются цифровому преобразованию, после чего их цифровые образы  $U'_{Redig}, U'_{Imdig}$  и  $U''_{Redig}, U''_{Imdig}$  поступают в блок алгоритмической обработки сигналов, на выходах которого получают информацию о численных значениях параметров контролируемого участка провода в соответствии со следующими алгоритмами:

$$\begin{aligned} R' &= \frac{U'_{Redig} \times R_D \times (1 + Q^2) - U_\Gamma \times Q \times R_D}{U_\Gamma \times Q}; & G' &= \frac{U'_{Imdig} \times R_D \times (1 + Q^2) - U_\Gamma \times Q^2 \times R_D}{U_\Gamma \times K \times Q}. \\ R'' &= \frac{U''_{Redig} \times R_D \times (1 + Q^2) - U_\Gamma \times Q \times R_D}{U_\Gamma \times Q}; & G'' &= \frac{U''_{Imdig} \times R_D \times (1 + Q^2) - U_\Gamma \times Q^2 \times R_D}{U_\Gamma \times K \times Q}. \end{aligned}$$

Принимая регистрируемые параметры участка электрического провода на второй позиции контроля за образцовые, а регистрируемые параметры участка электрического провода на первой позиции контроля за диагностируемые, путем сравнительного анализа этих параметров определяется наличие или отсутствие дефектов на участке провода, находящегося на первой позиции контроля, а также решаются вопросы их идентификации.

Структурная блок-схема варианта аппаратной реализации описанного способа неразрушающего технологического контроля представлена на рисунке 7.

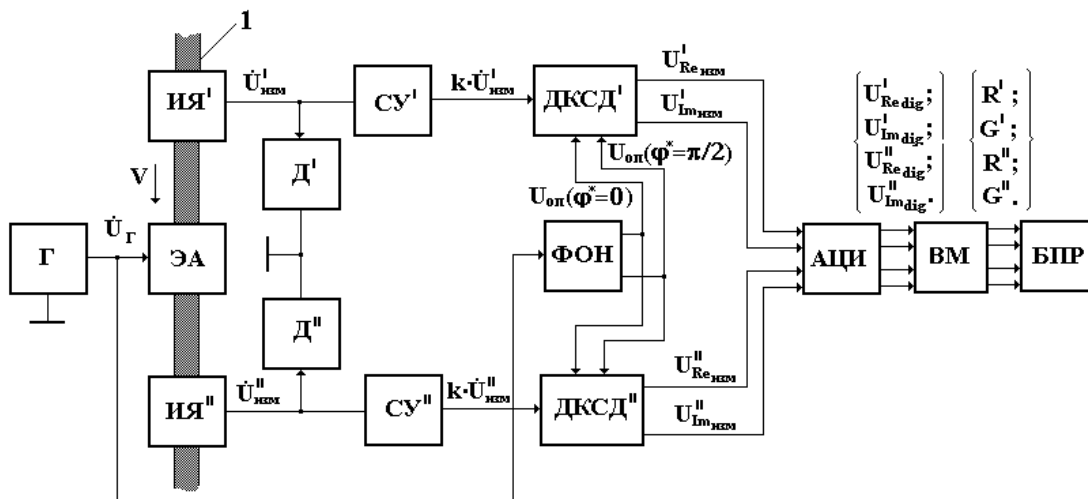


Рисунок 7 – Блок-схема аппаратной реализации способа технологического неразрушающего контроля изолированного провода

На рисунке 7 обозначено: 1 – объект контроля; Г – генератор возбуждающего напряжения  $U_{\Gamma}$ ; ЭА – электрод активации; ИЯ' и ИЯ'' – измерительные ячейки соответственно входной и выходной позиций контроля; Д' и Д'' – дроссели соответственно входной и выходной позиций контроля; СУ' и СУ'' – селективные усилители измерительных каналов соответственно входной и выходной позиций контроля; ДКСД' и ДКСД'' – двухканальные квадратурные синхронные детекторы измерительных каналов соответственно входной и выходной позиций контроля; ФОН – формирователь опорных напряжений; АЦИ – аналого-цифровой интерфейс; ВМ – вычислительный модуль; БПР – блок принятия решений. Данный вариант аппаратной реализации способа технологического неразрушающего контроля ориентирован не только на оперативное обнаружение дефекта на контролируемом участке изолированного провода, но и на определение конкретных особенностей этих дефектов, что в итоге позволяет вносить соответствующие корректировки в технологический процесс производства проводов.

Рассмотрим более подробно принцип работы блок-схемы аппаратной реализации способа технологического неразрушающего контроля изолированного провода, представленной на рисунке 7.

С генератора Г возбуждающее переменное напряжение  $\dot{U}_{\Gamma}$  с циклической частотой  $\omega_0$  подается на электрод активации ЭА, который инициирует соответствующие электродинамические процессы на контролируемых участках изолированного провода, находящихся в пространстве между входной и выходной позициями контроля. Результаты взаимодействия электродинамических процессов со структурой контролируемого участка изолированного провода регистрируются на Д' и Д'' относительно корпуса в виде информационных сигналов  $\dot{U}'_{изм}$  и  $\dot{U}''_{изм}$ , индуцируемых соответственно на измерительных ячейках ИЯ' и ИЯ'', расположенных на входной и выходной позициях контроля. В свою очередь, информационные сигналы  $\dot{U}'_{изм}$  и  $\dot{U}''_{изм}$  поступают на вход селективных усилителей СУ' и СУ'', осуществляющих избирательное усиление информационных сигналов  $\dot{U}'_{изм}$  и  $\dot{U}''_{изм}$  на частоте возбуждения  $\omega_0$  ЭА соответственно до величин  $k \times \dot{U}'_{изм}$  и  $k \times \dot{U}''_{изм}$ . В последующем масштабированные информационные сигналы  $k \times \dot{U}'_{изм}$  и  $k \times \dot{U}''_{изм}$  преобразуются соответствующими двухканальными квадратурными синхронными детекторами ДКСД' и ДКСД''. Для обеспечения рабочих режимов ДКСД' и ДКСД'' используется формирователь опорных напряжений ФОН, когерентно функционирующий с возбуждающим напряжением  $\dot{U}_{\Gamma}$ . В результате этого на выходе ФОН относительно фазы возбуждающего напряжения  $\dot{U}_{\Gamma}$  формируется пара квадратурных опорных напряжений  $U_{оп}(\varphi=0)$  и  $U_{оп}(\varphi=\pi/2)$ , которые одновременно поступают на соответствующие входы синхронизации ДКСД' и ДКСД''. При этом на выходе ДКСД' формируются информационные сигналы вещественной  $U'_{Reизм}$  и мнимой  $U'_{Imизм}$  компонент информационного сигнала  $k \times \dot{U}'_{изм}$ , а на выходе ДКСД'' формируются информационные сигналы вещественной  $U''_{Reизм}$  и мнимой  $U''_{Imизм}$  компонент информационного сигнала  $k \times \dot{U}''_{изм}$ . В последующем вещественные и мнимые компоненты информационных сигналов преобразуются модулем АЦИ в цифровые значения  $U'_{Redig}, U'_{Imdig}$  и  $U''_{Redig}, U''_{Imdig}$  соответственно для измерительных каналов входной и выходной позиций контроля. В модуле ВМ, исходя из выражения (28), осуществляется алгоритмическая обработка цифровых значений  $U'_{Redig}, U'_{Imdig}$  и  $U''_{Redig}, U''_{Imdig}$ , в результате чего определяются параметры  $R', G'$  и  $R'', G''$  частей электрического провода, находящихся соответственно на входной и выходной позициях контроля. Сравнительный анализ параметров  $R'$  и  $R''$ , а также  $G'$  и  $G''$ , выполняемый модулем БПР, позволяет не только установить факт наличия дефекта, но и

осуществить его идентификацию, т.е. определить его конкретную принадлежность к конкретному классу.

Следует отметить, что возможен упрощенный вариант аппаратной реализации способа технологического неразрушающего контроля, позволяющий фиксировать лишь сам факт наличия дефекта на контролируемом участке изолированного провода без каких-либо дополнительных характеристик этого дефекта. Блок-схема упрощенного варианта аппаратной реализации способа технологического неразрушающего контроля представлена на рисунке 8, где СУ' и СУ'' – селективные усилители измерительных каналов соответственно входной и выходной позиций контроля; АД' и АД'' – амплитудные детекторы измерительных каналов соответственно входной и выходной позиций контроля; ИУ – инструментальный усилитель; К – компаратор аналоговых сигналов; ФОС – формирователь опорного сигнала; УИ – устройство индикации.

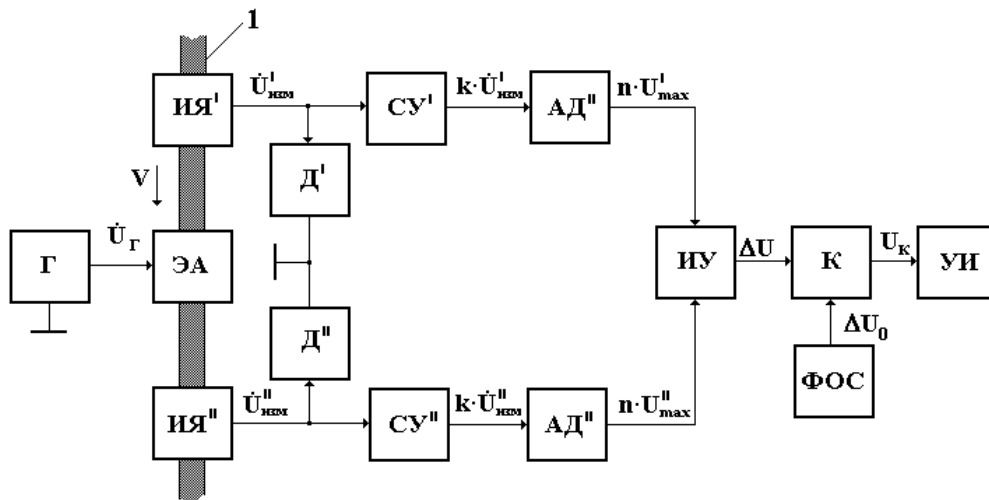


Рисунок 8 – Блок-схема аппаратной реализации упрощенного способа технологического неразрушающего контроля

Особенностью работы варианта блок-схемы аппаратной реализации упрощенного способа (рис. 8) является то, что информационные сигналы  $\dot{U}'_{изм}$  и  $\dot{U}''_{изм}$  с дросселей Д' и Д'' через соответствующие селективные усилители СУ' и СУ'' поступают на вход амплитудных детекторов АД' и АД'' измерительных каналов входной и выходной позиций контроля. В свою очередь, на выходах амплитудных детекторов АД' и АД'' соответственно формируются сигналы  $n \times U'_{max}$  и  $n \times U''_{max}$ , величины которых отражают масштабированные значения амплитуд информационных сигналов с выходов селективных усилителей СУ' и СУ''. Посредством инструментального усилителя ИУ определяется масштабированное разностное значение  $\Delta U$  между выходными сигналами измерительных каналов входной и выходной позиций контроля. На компараторе К аналоговых сигналов осуществляется процедура сравнения разностной величины  $\Delta U$  и эталонной величины  $\Delta U_0$ , задаваемой формирователем опорных сигналов ФОС. Если  $\Delta U \approx \Delta U_0$ , то результат компарирования  $U_k = 0$ , что говорит об отсутствии каких-либо дефектов на контролируемом участке изолированного провода, находящегося в пространстве между входной и выходной позициями контроля. В противном случае, т.е. при  $\Delta U \neq \Delta U_0$  результат компарирования  $U_k$  примет соответствующее значение, отличное от нуля ( $U_k \neq 0$ ), что, в свою очередь, будет свидетельствовать о наличии дефекта на контролируемом участке изолированного провода.

Данный вариант аппаратной реализации упрощенного способа технологического неразрушающего контроля в основном ориентирован на решение вопросов, связанных с реализацией выходного качественного контроля состояния изолированных электрических проводов при их изготовлении, а также входного контроля перед вводом их в эксплуатацию,

что существенно повысит надежность и безопасность используемых электрических систем различного назначения в целом.

### **Заключение**

Основными преимуществами устройств контроля дефективности обмоточных проводов являются:

– повышение эффективности неразрушающего контроля параметров изолированных проводов за счет повышения точности проверки и увеличения количества одновременно контролируемых параметров;

– повышение точности контроля за счет использования резонансных свойств низкочастотной кондуктометрической емкостной ячейки, содержащей в качестве дополнительного элемента электрический дроссель и два цилиндрических электрода с размещенным внутри кабелем;

– возможность проведения неразрушающего контроля как на неподвижных, так и на движущихся (например, в процессе изготовления) проводах и использование электродов в виде разъемных полуцилиндров, что позволяет использовать данный способ для контроля длинномерных проводов без нарушения их целостности;

– расширенная область применения за счет возможности контроля не только электрических проводов, но и других типов кабельной продукции, а также металлических изделий с большой длиной и малым поперечным сечением круглой формы, в том числе имеющих внешнее покрытие из изоляционных материалов, например, металлополимерных тросов, проволоки, стержней и т.п.;

– возможность проведения оперативного выходного качественного контроля состояния изолированных электрических проводов при их изготовлении, а также входного контроля перед вводом их в эксплуатацию, что позволяет производить оперативную отбраковку дефектных проводов без необходимости вычисления параметров их дефектов.

### **Список литературы**

1. Смирнов Г.В. Контроль дефектности изоляции обмоточных проводов – эффективный процесс повышения надёжности электродвигателей горнодобывающей, строительной и иных сфер человеческой деятельности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. № 3. – 100–111.
2. Смирнов Г.В. Контроль и ремонт изоляции обмоточных проводов электротехнических изделий // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – №7. – С. 52 – 61.
3. Ushakov, V.Y., Mytnikov, A.V., Lavrinovich, V.A., Lavrinovich, A.V. (2022). Causes of Power Transformer Failure. In: Transformer Condition Control. Power Systems. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83198-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83198-1_1).
4. Abdullaev A. A. U., Tychiev Z. Z., Jabborov T. K. et al. A review on power transformer failures: analysis of failure types and causative factors. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 2025 38(2):713. DOI:[10.11591/ijeecs.v38.i2.pp713-722](https://doi.org/10.11591/ijeecs.v38.i2.pp713-722).
5. Аникеенко В. М., Леонов А. П., Петров А. В. Обмоточные провода. – Томск: ТПУ, 2010. – 189 с.
6. Дудкин А.Н., Леонов А.П., Супуева А.С. Оценка влияния уровня дефектности эмалированных проводов на надежность межвитковой изоляции // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Том 20, № 2. – С. 123 –126.
7. Леонов В.М., Пешков И. Б., Рязанов И. Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. – М.: Изд-кий центр «Академия», 2006. – 432 с.

8. Decner A., Baranski M., Jarek T., Berhausen S. Methods of Diagnosing the Insulation of Electric Machines Windings. *Energies*, 2022, 15(22):8465. DOI:10.3390/en15228465.
9. Smirnov, G.V., Smirnov, D.G. Nondestructive testing for flaws in the insulation of winding wires. *Russ J Nondestruct Test* **52**, 469–477 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1061830916080088>.
10. Холодный С.Д., Серебрянников С.В., Боев М.А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. – М.: Изд-кий дом МЭИ, 2016. – 232 с.
11. Брякин И. В., Бочкарев И. В. Неразрушающий контроль металлических длинномерных объектов. – LAP Lambert Academic Publishing, 2021. – 177 с.
12. 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.
13. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Неразрушающий контроль дефектности изоляции обмоточных проводов // *Дефектоскопия*. – 2016. – № 8. – С. 63–74.
14. Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В. Измеритель погонной емкости одножильного провода для технологического контроля // *Ползуновский вестник*. – 2015. – № 3. – С. 38-42.
15. Radja Nadia., Rachek M., S. N. Larbi. Non-Destructive Testing for Winding Insulation Diagnosis Using Inter-Turn Transient Voltage Signature Analysis. *Machine*, 201, 6(2):21. DOI:10.3390/machines6020021.
16. Vavilova, G., Yurchenko, V., Keyan, L. (2021). 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*, vol 351. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_11).
17. Глушков А. Н., Литвиненко В. П., Литвиненко Ю. В. Цифровые алгоритмы обнаружения и демодуляции радиосигналов. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. – 153 с.