

**I. О. КОСТЮКОВ**

## АБСОРБЦІЙНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

В статті наведено огляд найбільш розповсюджених методів контролю технічного стану електричної ізоляції, що засновані на використанні абсорбційних явищ, які виникають в ній під дією прикладеної постійної напруги. Описано основні положення методу контролю за визначеною на електродах досліджуваного ємнісного об'єкта напругою, відновлюваною після короткочасного розряду його ємності. Проаналізовано основні аспекти застосування індексу поляризації та коефіцієнта абсорбції для визначення технічного стану ізоляції шляхом використання коефіцієнтів, що характеризують зміну в часі струму через діелектрик при подачі на нього постійної випробувальної напруги.

**Ключові слова:** поляризація, наскрізний струм провідності, діагностика ізоляції, об'ємний заряд.

**И. А. КОСТЮКОВ**

## АБСОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В статье приведен обзор наиболее распространенных методов контроля технического состояния электрической изоляции, основанных на использовании абсорбционных явлений возникающих в ней под действием постоянного напряжения. Описаны основные положения метода контроля, основанного на определении напряжения на электродах исследуемого емкостного объекта контроля, восстанавливающегося после кратковременного разряда его емкости. Проанализированы основные аспекты применения индекса поляризации и коэффициента абсорбции для определения технического состояния изоляции путем использования коэффициентов, характеризующих изменение во времени тока через диелектрик при подаче на него постоянного испытательного напряжения.

**Ключевые слова:** поляризация, сквозной ток проводимости, диагностика изоляции, объемный заряд.

**I. KOSTIUKOV**

## ABSORPTION METHODS OF CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL INSULATION

The article provides an overview of the most common methods for monitoring the technical state of electrical insulation, based on the applying of absorption phenomena arising in dielectric materials under the influence of DC voltage. The main provisions of the control method based on determining the voltage at the electrodes of the investigated capacitive control object, which is recovering after a short-term discharge of its capacity, are described. The main aspects of the application of the polarization index and the absorption coefficient for determining the technical state of insulation by using the coefficients characterizing the change in time of the current through the dielectric when a constant test voltage is applied to it are analyzed. The advantages of using absorption methods for monitoring the technical state of electrical insulation, first of all, are the ability to carry out testing without the necessity of applying of relatively high test voltages, which greatly simplifies all the necessary technical operations. Such control methods show a significant dependence of the informative parameters used in them on the technical state of insulation on the degree of development of slow polarization processes in the material under study and, therefore, are successfully used to determine the degree of moisture in tested electrical insulation.

**Keywords:** polarization, conduction current, insulation diagnostics, space charge.

**Вступ.** Методи контролю технічного стану електричної ізоляції, основані на виміренні її абсорбційних характеристик, достатньо інтенсивно розвиваються в течение достаточного тривалого проміжку часу і широко застосовуються в електроенергетиці не тільки для контролю технічного стану ізоляції ємнісних об'єктів (силові кабелі), але і при контролі ізоляції електроенергетичного обладнання, яке працює в номінальних умовах і представляє активну-індуктивну навантаження, наприклад, при контролі ізоляції обмоток силових трансформаторів [1, 2]. Методи визначення технічного стану ізоляції, засновані на використанні виникаючих в ній абсорбційних явищ, зазвичай включають наступні методи контролю:

- контроль ізоляції методом відновлюваного напруги;

- контроль ізоляції шляхом визначення коефіцієнтів, що характеризують зміну в часі струму через діелектрик при подачі на нього постійного напруги. В більшості випадків в якості таких коефіцієнтів визначають індекс поля-

ризації і коефіцієнт абсорбції.

При контролі технічного стану ізоляції методом відновлюваного напруги проводять вимірення напруги на ємнісному об'єкті контролю після короткочасного розряду його попередньо зарядженої ємності. При визначенні характеристик зміни в часі струму через досліджує- мий діелектрик використовують допоміжні коефіцієнти, визначаємі на основі вимірених в визначені моменти часу значень опору ізоляції. Обидва методи використання абсорбційних явищ дозволяють контролювати технічний стан ізоляції без використання високих випробувальних напруг, що визначає актуальність їх практичного застосування.

**Ціль статті** полягає в проведенні огляду і аналізу основних аспектів застосування абсорбційних явищ в електричній ізоляції для визначення її технічного стану.

**Контроль технічного стану ізоляції методом відновлюваного напруги.**

Причини виникнення абсорбційних явищ в електричній ізоляції можуть бути пояснені с

использованием приведенных на рис. 1 эквивалентных схем замещения диэлектриков (схемы Максвелла и Фойгта) [3, 4].

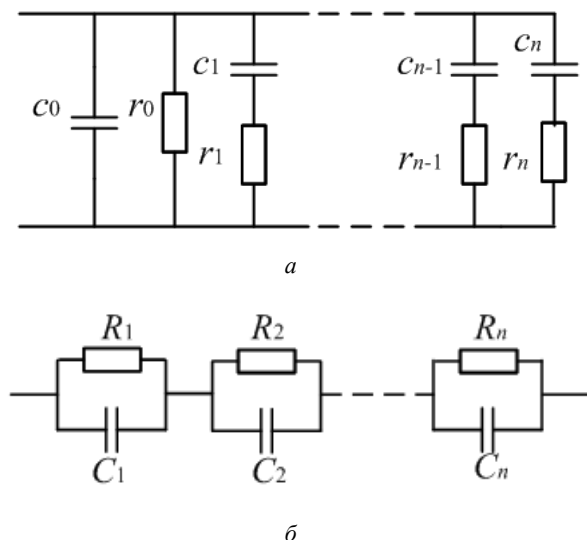


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения неоднородных диэлектриков [3, 4]:  
а – схема Фойгта; б – схема Максвелла.

На приведенных на рис. 1 схемах замещения неоднородного диэлектрика  $r_0$  – электрическое сопротивление утечки, которое обусловлено конечным значением электропроводности изоляционного материала,  $c_0$  – высокочастотная емкость, т.е. емкость, обусловленная видами поляризации с назначенным временем релаксации. При этом цепочки  $c_1 r_1 \dots c_n r_n$  используются для моделирования, согласно используемой в [5] терминологии, именно «медленных» видов поляризации, то есть видов поляризации, которые могут приводить к диэлектрическим потерям в исследуемом изоляционном материале. Для схемы замещения неоднородного диэлектрика на рис. 1. б все  $R_1 C_1 \dots R_n C_n$  представляют электрические емкости и сопротивления, определяемые поляризационными процессами и потерями на поляризацию и электропроводность в каждом из компонентов диэлектрического материала.

Именно наличие элементов  $r_1 c_1 \dots r_n c_n$ , отражающих влияние медленных видов поляризации на рис. 1 а, дает возможность проводить контроль технического состояния изоляции по ее абсорбционным характеристикам. При таком контроле исследуемый кабель заряжается до определенного напряжения, после чего его в течение относительно небольшого промежутка времени (несколько секунд) разряжают на достаточно малое сопротивление. За это короткое время емкость  $c_0$ , отвечающая за быстрые виды поляризации, успевает полностью разрядиться, а емкости  $c_1 \dots c_n$ , отвечающие за медленные виды поляризации, не успевают полностью разрядиться. Согласно классическому физическому объяснению явления диэлектрической абсорбции описанному, например, в [6] такая разница объясняется различием постоянных времени разряда емкостей  $c_0$  и  $c_1 \dots c_n$ . Дальнейшее перераспределение зарядов между емкостями вызывает появление возобновляемого напряжения на электродах объекта контроля, которое непосредственно и используется в ка-

честве источника информации о техническом состоянии электрической изоляции. Таким образом, метод контроля технического состояния электрической изоляции по параметрам восстанавливающегося напряжения достаточно эффективен при применении по отношению к неоднородным диэлектрикам, поскольку именно для таких диэлектриков существование миграционной поляризации приводит к увеличению электрической емкости и диэлектрических потерь, что, в свою очередь, находит свое отражение в увеличении параметров  $r_1 c_1 \dots r_n c_n$  на схеме замещения приведенной на рис. 1 а. Кроме того, такой метод контроля достаточно чувствителен к степени увлажнения электрической изоляции, поскольку ее увлажнение, как и наличие миграционной поляризации, приводит к увеличению параметров  $r_1 c_1 \dots r_n c_n$ .

Классическим примером неоднородных диэлектриков, для которых применение описанного метода контроля позволяет достаточно точно определить их техническое состояние является бумажная пропитанная изоляция силовых кабелей. Использование приведенной на рис. 1 б схемы замещения неоднородной изоляции предусматривает последовательное расположение слоев изоляции по отношению к электрическому полю. На практике такое расположение слоев изоляции можно встретить в достаточно ограниченном количестве случаев. Типичными примерами являются двухслойная изоляция эмалированных проводов [7-10], а также трехслойная структура изоляционной системы силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [11-17], представляющая собой основной слой изоляции и два полупроводящих слоя. Разработанные на основе приведенной на рис. 1 б схемы замещения модели неоднородных диэлектриков широко применяются для моделирования процессов, связанных с диагностикой по методу восстанавливающегося напряжения. Такие модели разработаны, например, для электроэнергетического оборудования, изоляция которого выполнена на основе такого типичного неоднородного диэлектрика как бумажная пропитанная изоляция [18, 19]. В данном случае применение такой схемы замещения позволяет отразить разное влияние диэлектрических проницаемостей компонентов изоляции на напряженность электрического поля и соответственно на напряжение в каждом из компонентов изоляции. Так, при включении неоднородного диэлектрика, который может быть описан схемой замещения приведенной на рис. 1 б, к источнику постоянного напряжения во время переходного процесса напряжение на каждом из компонентов изоляции распределяется обратно пропорционально их электрическим емкостям, в то же время после окончания переходного процесса напряжение будет распределяться прямо пропорционально значению электрических сопротивлений. Согласно физической интерпретации явления диэлектрической абсорбции при его использовании для диагностики технического состояния силовых кабелей, приведенной в [18], появление восстанавливаемого напряжения связано с существованием объемного заряда в исследуемой электрической изоляции.

Контроль технического состояния изоляции методом восстанавливаемого напряжения предусматривает следующие технические операции [21]:

- длительный процесс предварительной зарядки исследуемого объекта контроля. Так, например, при использовании описанной в [22] испытательной установки CDS продолжительность заряда составляет 15 минут;

- кратковременный процесс разряда предварительно заряженного объекта контроля на низкоомную нагрузку. Для испытательной установки CDS продолжительность разряда составляет 2 секунды [22];

- отключение исследуемого объекта контроля от нагрузки и измерение появляющегося (восстанавливающегося) напряжения на его электродах.

На рис. 2 в произвольном масштабе приведены характерные временные зависимости напряжения на электродах объекта контроля при выполнении приведенных технических операций [21].

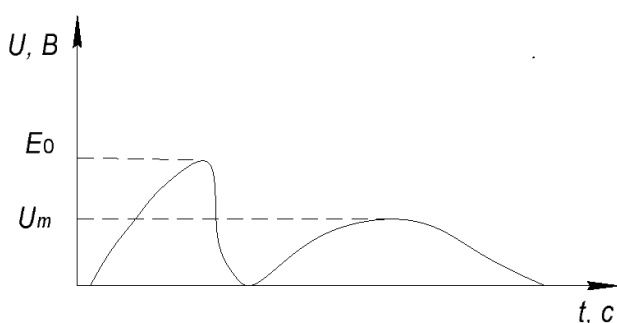


Рис. 2. Зависимость напряжения на электродах исследуемого емкостного при контроле технического состояния электрической изоляции методом восстанавливаемого напряжения

Согласно [18] при определении степени деградации электрической изоляции по методу восстанавливаемого напряжения в качестве критериев, чувствительных к его техническому состоянию, используют время, при котором наблюдается максимальное значение восстанавливаемого напряжения, отношение  $U_m$  к значению зарядного напряжения  $E_0$ , а также постоянную времени саморазряда. Учитывая, что измерения производятся при достаточно небольших значениях зарядного напряжения, а также возможность проведения измерений при различных его значениях, использование отношения  $U_m$  к значению зарядного напряжения  $E_0$  в качестве критерия, чувствительного к техническому состоянию изоляции, позволяет избежать влияния величины зарядного напряжения на максимальное значение восстанавливаемого напряжения. Согласно результатам ранее упомянутого исследования [18] старение бумажной пропитанной изоляции силовых кабелей сопровождается постепенным увеличением отношения  $U_m$  к значению зарядного напряжения  $E_0$  с последующим уменьшением этого отношения. В то же время, деградация технического состояния такой изоляции также сопровождается уменьшением времени, при котором наблюдается максимальное значение восстанавливаемого напряжения.

Несомненным преимуществом описанного метода контроля является возможность определения техни-

ческого состояния электрической изоляции путем использования сравнительно невысоких значений приложенного к ней напряжения, что, безусловно, значительно упрощает процедуру проведения измерений по сравнению с высоковольтными испытаниями. Так, например, для испытательной установки CDS значения зарядного напряжения составляют 1 кВ и 2 кВ, при этом испытание при величине зарядного напряжения 2 кВ проводят после испытаний при значении зарядного напряжения 1 кВ [22]. Приведенные в [23] результаты были получены при значении зарядного напряжения, составлявшего 1 кВ.

К недостаткам указанного метода необходимо, в первую очередь, отнести повышенные требования к величине внутреннего сопротивления вольтметра, используемого для измерения восстанавливающегося напряжения на исследуемом емкостном объекте контроля. Указанный недостаток был отмечен в [24]. При контроле технического состояния изоляции электроэнергетического оборудования этот недостаток, безусловно, осложняет практическое применение этого метода контроля. Так, например, он накладывает определенные ограничения на длину исследуемого образца силового кабеля, для которого можно с достаточной точностью проводить измерения. Другим существенным недостатком метода контроля технического состояния изоляции по параметрам восстанавливающегося напряжения на электродах исследуемого объекта контроля является достаточно большая продолжительность измерений, поскольку измерения в некоторых случаях необходимо проводить в течение 30 минут с момента времени, когда на объекте контроля начинает появляться восстанавливающийся напряжение. При контроле силовых кабелей продолжительность испытаний увеличивается из-за необходимости предварительной подготовки исследуемого образца силового кабеля к измерениям. В данном случае согласно [24] под подготовкой к измерениям подразумевается пребывание емкостного объекта контроля в течение некоторого времени (не менее 3 часов) с закороченными электродами. Такая подготовка позволяет избежать воздействия накопленных в изоляции объемных зарядов, накопленных при ее предварительной работе в эксплуатационных условиях и после предварительных испытаний.

Следует отметить, что на основе приведенной на рис. 1, б схемы замещения в [25] проведен анализ переходных процессов при включении неоднородной изоляции к источнику постоянного напряжения. При этом показано, что неоднородность изоляции может приводить к существенному изменению напряженности электрического поля в каждом из слоев изоляции.

**Контроль технического состояния изоляции с использованием коэффициента абсорбции и индекса поляризации.** Среди методов контроля технического состояния электрической изоляции, использующих абсорбционные явления в диэлектриках, особое место занимают методы, характеризующие изменение во времени тока через диэлектрик после его подключения к источнику постоянного напряжения. В качестве коэффициентов, характеризующих изменение во времени постоянного тока через диэлектрик, чаще всего используют коэффициент абсорбции и

индекс поляризации. Коэффициент абсорбции  $k_a$  определяют согласно выражению [26]:

$$k_a = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (1)$$

где  $R_{60}$  представляет собой значение сопротивления изоляции, измеренное через 60 секунд после подачи на контролируемый объект постоянного напряжения, а  $R_{15}$  представляет значение электрического сопротивления, измеренное через 15 секунд после подачи напряжения. Согласно приведенным в [26] данным для изоляции вращающихся электрических машин значения  $k_a$  превышающие 1.5 свидетельствуют о высоком качестве изоляции, в то же время приближение величины коэффициента абсорбции к 1 является признаком ухудшения состояния изоляции.

Индекс поляризации (PI), в свою очередь, может быть определен согласно соотношению [27]:

$$PI = \frac{R_{600}}{R_{60}}, \quad (2)$$

где  $R_{600}$  представляет собой значение электрического сопротивления, измеренное через 600 секунд после подачи на исследуемый объект постоянного напряжения. Физические процессы в электрической изоляции, приводящие к изменению во времени тока, связаны с тем, что помимо составляющей тока связанной с током утечки, через электрическую изоляцию протекает ток абсорбции, который обусловлен медленными процессами поляризации в диэлектрике. Для поляризуемых диэлектрических материалов токи абсорбции обусловлены относительно медленным вращением дипольных молекул под действием электрического поля. Для неоднородных диэлектриков токи абсорбции обусловлены миграционной поляризацией, то есть накоплением зарядов на границах составляющих компонентов неоднородного материала. Именно поэтому для большинства технических диэлектриков измерение электрического сопротивления производится через 60 секунд после подачи на объект испытательного напряжения. Считается, что за это время ток абсорбции спадает до 0 и величина тока через диэлектрик определяется непосредственно током утечки. Необходимо заметить, что при измерениях спустя 60 секунд с момента подачи испытательного напряжения не всегда удается получить постоянное значение электрического сопротивления [28]. Это означает, что переходный процесс, обусловленный абсорбционными токами, еще не завершен и на измеренное значение электрического сопротивления все еще влияет составляющая тока абсорбции. К тому же необходимо принимать во внимание возможные флуктуации тока через диэлектрик. Изменение тока через диэлектрик может быть обусловлено как, согласно терминологии [20], «электрической очисткой» материала, так и его старением и разрушением под действием внешнего электрического поля, вследствие чего в материале возникают новые носители заряда, ранее являвшиеся структурными элементами молекул диэлектрика. Указанные флуктуации тока через диэлектрик могут быть проиллюстрированы приведенными в [26] кривыми тока в изоляции вращающихся электрических машин. Таким образом, существование составляющих полного тока через диэлектрик, кото-

рые обусловлены током утечки, током абсорбции и емкостным током [29-31] дает возможность характеризовать медленные виды поляризации в материале путем применения определенных по формулам (1, 2) коэффициентов. Применение индекса поляризации и коэффициента абсорбции является эффективным средством для определения однородности электрической изоляции и степени ее увлажнения. Для разделения поверхностной и объемной составляющих тока через диэлектрик при измерениях используется система из 3 электродов [32]. В случае применения схем измерения с двумя электродами разделение поверхностной и объемной составляющих будет невозможным, что приведет к завышенным значениям протекающего через диэлектрик тока и, соответственно, к заниженным значениями электрического сопротивления.

**Выводы.** Преимущества использования абсорбционных методов контроля технического состояния электрической изоляции, прежде всего, заключаются в возможности проведения контроля без использования относительно высоких испытательных напряжений, что значительно упрощает технические операции. Такие методы контроля показывают значительную зависимость используемых в них информативных параметров о техническом состоянии изоляции от степени развития медленных процессов поляризации в исследуемом материале и, следовательно, с успехом применяются для определения степени увлажнения изоляции.

#### Список литературы

- Gutten M., D. Korenciak, M. Sebok, et al., Diagnostics of transformer with insulation oil-paper, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 91, no. 8, pp. 69-72, 2015.
- Simko M. Measuring and diagnostics system for analysis of transformer insulation by return voltage method / M. Simko, D. Korenciak, M. Gutten, R. Janura // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2020. – № 12. – P. 67 – 70.
- Борисова М. Э. Оценка параметров неоднородности диэлектрика на основе анализа абсорбционных характеристик / М. Э. Борисова, С. Н. Койков, М. С. Марченко, Н. В. Северюхина // *Электричество*. – 1995. – № 6. – С. 62 – 67.
- Борисова М. Э. Физика диэлектрических материалов. Электроперенос и накопление заряда в диэлектриках / М. Э. Борисова, О. В. Галюков, П. В. Цацынкин. – СПб.: Издательство СПбГПУ, 2004. – 106 с.
- Zaengl W. S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, part 1: Theoretical considerations, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, September - October 2013.
- Ренне В. Т. Электрические конденсаторы Л.-М.: Государственное энергетическое издательство, 1947. – 193 с.
- Гурин А. Г. Экспериментальное исследование электрическое прочности провода ПЭЭИДХ – 0,63 / А. Г. Гурин, С. Ю. Антонец // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2013. – № 4. – С. 44 – 46.
- Голик О. В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной изоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход / О. В. Голик // *Український метрологічний журнал*. – 2009. – №1. – С. 12 – 17.
- Голик О. В. Контроль та аналіз дисперсії параметрів кабельної продукції – основа реалізації принципу неперерваного підвищення якості / О. В. Голик // *Український метрологічний журнал*. – 2013. – №2. – С. 39 – 43.
- Голик О. В. Технологічний контроль дефектів в емальпроводі з поліамідною ізоляцією / О. В. Голик, С. Ю. Антонець, Л. А. Щепенюк, В. В. Золотарьов // *Вістник НТУ «ХПІ»*. – 2017. – № 31. – С. 12 – 18.

11. Золотарев В. М. Тангенс угла диэлектрических потерь многослойных шитых изоляционных конструкций / В. М. Золотарев, В. П. Карпушенко, В. В. Золотарев, Ю. А. Антоненко, А. А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – № 8. – С. 64 – 73.
12. Золотарев В. М. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от конструкции многослойной шитой изоляции кабелей и проводов / В. М. Золотарев, В. П. Карпушенко, В. В. Золотарев, Ю. А. Антоненко, А. А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 21. – С. 78 – 89.
13. Золотарев В. В. Распределение стационарного электрического поля в цилиндрическом неидеальном диэлектрике / В. В. Золотарев, В. П. Карпушенко, В. М. Золотарев, А. А. Науменко // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №4. – С. 65 – 69.
14. Золотарев В. М. Влияние проводимости экранов на диэлектрические потери в кабелях / В. М. Золотарев, В. В. Золотарев, С. В. Бузько, Т. Ю. Антоненко, А. А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 21. – С. 50 – 54.
15. Набока Б. Г. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со шитой изоляцией / Б. Г. Набока, А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №3. – С. 44 – 47.
16. Кучерявая И. Н. Дефекты полупроводящего слоя по жиле и их влияние на распределение электрического поля в полиэтиленовой изоляции / И. Н. Кучерявая // Техническая электродинамика. – 2018. – № 1. – С. 17 – 22.
17. Щебенюк Л. А. Дослідження втрат в ізоляції високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією / Л. А. Щебенюк, Т. Ю. Антоненко // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 58 – 62.
18. Беспрозванных А. В. Физическая интерпретация кривых восстановления напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика / А. В. Беспрозванных // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 23 – 27.
19. Беспрозванных А. В., Набока Б. Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – 108 с.
20. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
21. Ковригин Л. А. Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей по возвратному напряжению / Л. А. Ковригин, Л. А. Сидельников // КАБЕЛЬ – news 2009. – № 8. – С. 54 – 56.
22. Ольшевский А. М. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий. Состояние и перспективы / А. М. Ольшевский // Электрические сети и системы. – 2013. – № 5. – С. 46 – 51.
23. Taran Kumar Saha Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service aged transformers / Taran Kumar Saha, Zheng Tong Yao // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – № 1. – P. 128 – 135.
24. Беспрозванных А. В. Современные электрические методы контроля и диагностики силовых кабелей со шитой полиэтиленовой изоляцией / А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Электрические сети и системы. – 2013. – № 5. – С. 52 – 58.
25. Розісулов С. С. Перехідні процеси у неоднорідній електричній ізоляції високовольтних кабелів при її діагностиці методами вимірювання і аналізу струму релаксації та поверхневої напруги / С. С. Розісулов, В. І. Михайлів, Б. Л. Грабчук // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – № 1. – С. 84 – 91.
26. Глинка Т. Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянным напряжением / Т. Глинка // Электричество. – 1998. – № 1. – С. 60 – 63.
27. Gonzales E. A. Novel polarization index evaluation formula and fractional-order dynamics in electric motor insulation resistance / E. A. Gonzales, I. Petras, M. D. Ortigueira // Fractional calculus & applied analysis. – 2018. – № 3. – P. 613 – 627.
28. Серебряков А. С. Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции / А. С. Серебряков // Электричество. – 1999. – № 5. – С. 40 – 43.
29. Лачин В. И. Методы и устройства измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов и их классификация / В. И. Лачин, Нгуен Куок Уи, К. Ю. Соломенцев, И. Г. Балабан // Известия вузов. Северо-Кавказский регион – 2015. – № 1. – С. 84 – 89.
30. Лачин В. И. Влияние тока абсорбции на процесс измерения сопротивления изоляции / В. И. Лачин, Нгуен Куок Уи, К. Ю. Соломенцев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион – 2013. – № 6. – С. 32 – 35.
31. Лачин В. И. Сравнительный анализ математических моделей аппроксимации тока абсорбции / В. И. Лачин, Нгуен Куок Уи, К. Ю. Соломенцев, И. Г. Балабан // Известия вузов. Северо-Кавказский регион – 2015. – № 2. – С. 14 – 18.
32. Луцкейкин Г. А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Г. А. Луцкейкин. – М.: Химия, 1988. – 160 с.

## References (transliterated)

1. M. Gutten, D. Korenciak, M. Sebok, et al., “Diagnostics of transformer with insulation oil-paper,” Przeglad Elektrotechniczny, vol. 91, no. 8, pp. 69-72, 2015.
2. Simko M. Measuring and diagnostics system for analysis of transformer insulation by return voltage method / M. Simko, D. Korenciak, M. Gutten, R. Janura // Przeglad Elektrotechniczny. – 2020. – № 12. – P. 67 – 70.
3. Borisova M. Je. Ocenka parametrov neodnorodnosti dijelektrika na osnove analiza absorbcionnyh karakteristik / M. Je. Borisova, S. N. Kojkov, M. S. Marchenko, N. V. Severjuhina // Jelektrichestvo. – 1995. – № 6. – С. 62 – 67.
4. Borisova M. Je. Fizika dijelektricheskikh materialov. Jelektroperenos i nakoplenie zarjada v dijelektrikah / M. Je. Borisova., O. V. Galjukov, P. V. Cacynkin. – SPb.: Izdatel'stvo SPbGPU, 2004. – 106 s.
5. W. S. Zaengl, “Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, part 1: Theoretical considerations,” IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, September - October 2013.
6. Renne V. T. Jelektricheskie kondensatory L.-M.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1947. — 193 s.
7. Gurin A. G. Jeksperimental'noe issledovanie jelektricheskoe prochnosti provoda PJeJeIDH – 0,63 / A. G. Gurin, S. Ju. Antonec // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2013. – №4. – С. 44 – 46.
8. Golik O. V. Issledovanie defektnosti nagrevostojkih provodov s dvojnoj poliimidnoj izolaciej pri ispytanih vysokim naprjazheniem na prohod / O. V. Golik // Ukraїns'kij metrologichnij zhurnal. – 2009. – №1. – С. 12 – 17.
9. Golik O. V. Kontrol' ta analiz dispersii parametriv kabel'noї produkcii – osnova realizacii principu neperervanogo pidvisshennja jakosti / O. V. Golik // Ukraїns'kij metrologichnij zhurnal. – 2013. – №2. – С. 39 – 43.
10. Golik O. V. Tehnologichnij kontrol' defektiv v emal'provodi z poliimidnoju izolacieju / O. V. Golik, S. Ju. Antonec', L. A. Shhebenjuk, V. V. Zolotar'ov // Vistnik NTU «HPІ». – 2017. – № 31. – С. 12 – 18.
11. Zolotarev V. M. Tangens ugla dijelektricheskikh poter' mnogoslajnyh sshityh izolacionnyh konstrukcij / V. M. Zolotarev, V. P. Karpushenko, V. V. Zolotarev, Ju. A. Antonec, A. A. Naumenko // Vistnik NTU «HPІ». – 2011. – № 8. – С. 64 – 73.
12. Zolotarev V. M. Zavisimost' tangensa ugla dijelektricheskikh poter' ot konstrukcii mnogoslajnoj sshitoj izolacii kabelej i provodov / V. M. Zolotarev, V. P. Karpushenko, V. V. Zolotarev, Ju. A. Antonec, A. A. Naumenko // Vistnik NTU «HPІ». – 2012. – № 21. – С. 78 – 89.
13. Zolotarev V. V. Raspredelenie stacionamogo jelektricheskogo polja v cilindricheskom neideal'nom dijelektrike / V. V. Zolotarev, V. P. Karpushenko, V. M. Zolotarev, A. A. Naumenko // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2008. – №4. – С. 65 – 69.
14. Zolotarev V. M. Vlijanie provodimosti jekranov na dijelektricheskie poter' v kabeljah / V. M. Zolotarev, V. V. Zolotarev, S. V. Buz'ko, T. Ju. Antonec, A. A. Naumenko // Vistnik NTU «HPІ». – 2014. – № 21. – С. 50 – 54.
15. Naboka B. G. Obosnovanie jelektrofizicheskikh karakteristik poluprovodjashhijh jekranov silovyh kabelej vysokogo naprjazhenija so sshitoj izolaciej / B. G. Naboka, A. V. Besprozvannyh, E. S. Moskvitin // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2010. – №3. – С. 44 – 47.
16. Kucherjavaja I. N. Defekty poluprovodjashhego sloja po zhile i ih vlijanie na raspredelenie jelektricheskogo polja v polijetilenovoj izolacii / I. N. Kucherjavaja // Tehnicheskaja jelektrodinamika. – 2018. – № 1. – S. 17 – 22.
17. Shhebenjuk L. A. Doslidzhennja vtrat v izolacii visokovol'tnih silovyh kabeliv z polimernoju izolacieju / L. A. Shhebenjuk, T. Ju. Antonec' // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2016. – №4. – С. 58 – 62.
18. Besprozvannyh A. V. Fizicheskaja interpretacija krivyh vosstanavlivajushhegosja naprjazhenija na osnove shem zameshenija neodnorodnogo dijelektrika / A. V. Besprozvannyh // Tehnichna elektrodinamika. – 2009. – № 6. – С. 23 – 27.

19. Besprozvannyh A. V., Naboka B. G. Matematicheskie modeli i metody rascheta jelektrioizoljacionnyh konstrukcij. – H.: NTU «HPI», 2012. – 108 s.
20. Tareev B. M. Fizika dijelektricheskijh materialov M.: Jenergoizdat, 1982. – 320 s.
21. Kovrigin L. A. Prognozirovanie ostatochnogo resursa silovyh kabelej po vozvratnomu naprjazheniju / L. A. Kovrigin, L. A. Sidel'nikov // KABEL" – news 2009. – № 8. – С. 54 – 56.
22. Ol'shevskij A. M. Nerazrushajushhaja diagnostika silovyh kabel'nyh linij. Sostojanie i perspektivy / A. M. Ol'shevskij // Jelektricheskie seti i sistemy. – 2013. – № 5. – С. 46 – 51.
23. Tapan Kumar Saha Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service aged transformers / Tapan Kumar Saha, Zheng Tong Yao // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – № 1. – P. 128 – 135.
24. Besprozvannyh A. V. Sovremennye jelektricheskie metody kontrolja i diagnostiki silovyh kabelej so sshitoj polijetilenovoj izoljaciej / A. V. Besprozvannyh, E. S. Moskvitin // Jelektricheskie seti i sistemy. – 2013. – № 5. – С. 52 – 58.
25. Roziskulov S. S. Perehidni procesi u neodnorodnij elektrichnij izoljaciej visokovol'tnih kabeliv pri ii diagnostici metodami vimirjuvannja i analizu strumu relaksacii ta poverhnevoi naprugi / S. S. Rozisulov, V. I. Mihajliv, B. L. Grabchuk // Metodi ta priladi kontrolju jakosti. – 2013. – № 1. – С. 84 – 91.
26. Glinka T. Diagnostika izoljaciej obmotok jelektricheskijh mashin postojannym naprjazheniem / T. Glinka // Jelektrichestvo. – 1998. – № 1. – С. 60 – 63.
27. Gonzales E. A. Novel polarization index evaluation formula and fractional-order dynamics in electric motor insulation resistance / E. A. Gonzales, I. Petras, M. D. Ortigueira // Fractional calculus & applied analysis. – 2018. – № 3. – P. 613 – 627.
28. Serebrjakov A. S. Sposob izmerenija ustanovivshegosja znachenija soprotivlenija izoljaciej / A. S. Serebrjakov // Jelektrichestvo. – 1999. – № 5. – С. 40 – 43.
29. Lachin V. I. Metody i ustrojstva izmerenija soprotivlenija izoljaciej jelektrojenergeticheskijh ob'ektov i ih klassifikacija / V. I. Lachin, Nguen Kuok Ui, K. Ju. Solomencev, I. G. Balaban // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region – 2015. – № 1. – С. 84 – 89.
30. Lachin V. I. Vlijanie toka absorbcii na process izmerenija soprotivlenija izoljaciej / V. I. Lachin, Nguen Kuok Ui, K. Ju. Solomencev, // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region – 2013. – № 6. – С. 32 – 35.
31. Lachin V. I. Sravnitel'nyj analiz matematicheskijh modelej approksimacii toka absorbcii / V. I. Lachin, Nguen Kuok Ui, K. Ju. Solomencev, I. G. Balaban // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region – 2015. – № 2. – С. 14 – 18.
32. Lushhejkin G. A. Metody issledovanija jelektricheskijh svojstv polimerov / G. A. Lushhejkin. – M.: Himija, 1988. – 160 s.

*Поступила (received) 17.11.21*

*Відомості про авторів/Сведения про авторов/About the Authors*

**Костюков Іван Олександрович (Костюков Иван Александрович, Kostjukov Ivan Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail iakostiukow@gmail.com