УДК 621.317.333.6 DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-84-89

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

METHODS AND DEVICES OF THE MEASUREMENT INSULATION RESISTANCE OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY OBJECTS AND THEIR CLASSIFICATION

© 2015 г. *В.И. Лачин, Нгуен Куок Уи, К.Ю. Соломенцев, И.Г. Балабан*

Лачин Вячеслав Иванович – профессор, д-р техн. наук, зав. кафедрой «Автоматика и телемеханика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: lachinv@mail.ru

Lachin Viatcheslav Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of department «Automatics and Telemechanics», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: lachinv@mail.ru

Нгуен Куок Уи – аспирант, кафедра «Автоматика и телемеханика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: nguyenquocuy_1102@yahoo.com

Nguyen Quoc Uy – post-graduate student, department «Automatics and Telemechanics», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: nguyenquocuy_1102@yahoo.com

Соломенцев Кирилл Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Автоматика и телемеханика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: sol_kir@mail.ru

Solomencev Kirill Yurievich – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, department «Automatics and Telemechanics», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: sol_kir@mail.ru

Балабан Игорь Геннадиевич – студент, кафедра «Автоматика и телемеханика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: i.balaban@inbox.ru

Balaban Igor Genadievich – student, department «Automatics and Telemechanics», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: i.balaban@inbox.ru

Проведен обзор и анализ существующих методов и устройств измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов (ЭО). К рассмотренным ЭО относятся: электрические сети постоянного тока, переменного тока или двойного рода тока в шахтах, в метро, на кораблях; оперативные цепи электростанций, подстанций; обмотки размагничивания кораблей; аккумуляторные и солнечные батареи; электрические машины и аппараты, в том числе электроподвижного состава, силовые и распределительные трансформаторы, электрогенераторы и другое подобное электрооборудование. Несмотря на большое число и разнообразие существующих методов и устройств измерения сопротивления изоляции отсутствует их классификация. Это затрудняет правильный выбор того или иного метода измерения, учитывающего конкретные особенности контролируемого ЭО. Результатом проведенного обзора и анализа существующих методов и устройств измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов является предлагаемая в статье классификация, которая должна помочь при выборе или разработке метода измерения сопротивления изоляции.

Ключевые слова: измерение сопротивления изоляции; методы и устройства измерения сопротивления изоляции; электроэнергетический; контроль; емкость; ток абсорбции; классификация; аппроксимация; индекс поляризации; электробезопасность.

The article deals with review and analysis of existing methods and devices for measuring insulation resistance of electric power industry objects. Electric power industry objects include electric circuits DC, AC or dual current type in mines, subway, ships; operative circuits of electric power stations and substations; demagnetization winding of ships; batteries and solar panels; electrical machines and equipment, including electric rolling stock; power and distribution transformers, electric generators and other similar electrical equipment. Currently the classification of methods and devices for measuring the insulation resistance is missing, despite their large number and variety. This complicates the correct choice of a method of measurement which takes into account the specific characteristics of the controlled electric power industry object. The classification, which proposed in this article, is the result of the review and analysis of existing methods and devices of measuring the insulation resistance of electric power industry objects. It will help to select or develop a method of measuring insulation resistance.

Keywords: insulation resistance measurement; methods and devices to measure the insulation resistance; electricity; control; capacity; current absorption; classification; approximation; polarization index; electrical safety.

Обеспечение безаварийности, долговечности, качества и надежности работы целого ряда электроэнергетических объектов (ЭО) является одной из основных задач при эксплуатации таких объектов. ЭО могут подвергаться механическим, электрическим, тепловым, атмосферным воздействиям. Перечисленные воздействия постепенно ведут к снижению уровня технического состояния объекта. В связи с этим встаёт задача качественного контроля параметров ОЭ, так как нерегулярный и некачественный контроль может привести к нарушению работы объекта, поражению людей электрическим током, возникновению пожара и т.п.

ЭО представляют собой группу последовательно включенных источников энергии, которые подключены к нагрузке, либо группу последовательно включенных приёмников электрической энергии, т.е. нагрузок, либо совокупность первой и второй групп, либо группу фидеров, которые подключены к одному источнику энергии. Такие объекты называют объектами с дискретно-распределёнными параметрами или многоэлементными ЭО. К ним относятся электрические сети постоянного тока, переменного тока или двойного рода тока в шахтах, в метро, на кораблях; оперативные цепи электростанций, подстанций; обмотки размагничивания кораблей; аккумуляторные и солнечные батареи; электрические машины и аппараты, в том числе электроподвижного состава, силовые и распределительные трансформаторы, электрогенераторы и другое подобное электрооборудование.

В настоящее время имеется большое число методов и устройств контроля состояния ЭО, однако нет чёткой градации их достоинств и недостатков, не очерчены области их применимости, а также не обозначены границы параметров контролируемых объектов. Существуют классификации методов и устройств для отдельных типов ЭО [1], однако отсутствует общая классификация методов измерения для различных типов ЭО, что затрудняет выбор того или иного метода измерения при разработке устройств измерения сопротивления изоляции.

В настоящей статье предпринята попытка дать такую классификацию на основе обзора и анализа существующих методов и устройств измерения сопротивления изоляции ЭО различных типов.

Приведём эквивалентную схему замещения сетей постоянного и переменного тока на судах, в шахтах, обмоток размагничивания кораблей, электролизных серий в цветной металлургии и т.п. на рис. 1, где r_1, r_2 ... r_n – сопротивления участков сети; R_1, R_2 ... R_{n+1} – сопротивления изоляции каждого из участков сети; C_1, C_2...C_{n+1} – емкости каждого участка относительно земли.

Если ЭО содержит большое количество источников энергии (оперативные цепи электростанций, аккумуляторные и солнечные батареи, электрохимические генераторы), то эквивалентная схема замещения таких объектов имеет вид, представленный на рис. 2, на котором обозначено: e_1, e_2...e_n – источники электроэнергии; R_1, R_2 ... R_{n+1} и C_1, C_2 ... C_{n+1} – параметры изоляции этих источников.

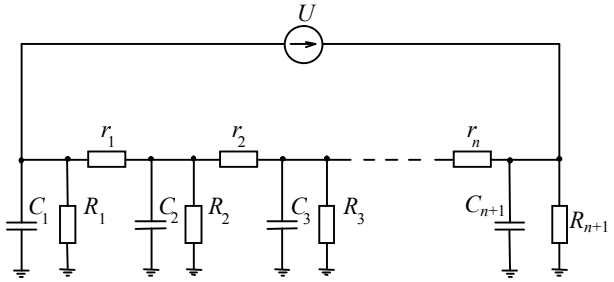

Рис. 1. Эквивалентная схема замещения ЭО

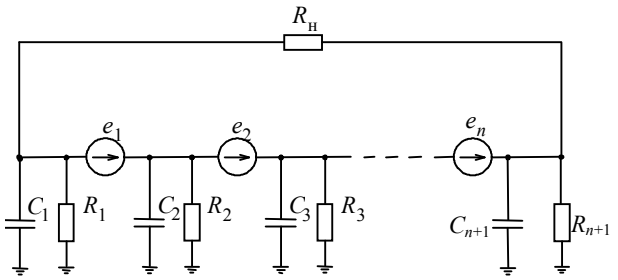

Рис. 2. Эквивалентная схема замещения ЭО с большим количеством источников энергии

В настоящее время широко распространёнными являются сети двойного рода тока, представляющие собой сеть переменного тока, соединённую с сетью постоянного тока через выпрямитель. Эквивалентная схема замещения сети двойного рода тока представлена на рис. 3, где $R^{+}_{\text{из}}$ и $R^{-}_{\text{из}}$ – сопротивления изоляции сети постоянного тока; C_A, C_B и C_C – ёмкости фаз A, B и C; C^{+} и C^{-} – ёмкости полюсов сети постоянного тока, R_A, R_B и R_C – сопротивления изоляции фаз A, B и C; $R_{\text{нагр}}$ – сопротивление нагрузки ЭО цепи постоянного тока; $Z_{\text{нагр}A}$, $Z_{\text{нагр}B}$, $Z_{\text{нагр}C}$ – нагрузка трёхфазной сети с изолированной нейтралью.

Эквивалентная схема замещения многослойной корпусной (главной) изоляции электрических машин и аппаратов, силовых и распределительных трансформаторов представлена на рис. 4, который содержит следующие обозначения: U – приложенное к ЭО измерительное напряжение; R_1, R_2 ... R_{n+1} – сопротивления изоляции каждого из слоев; C_1, C_2 ... C_{n+1} – емкости каждого из слоев. Причем количество слоев изоляции электрических машин определяется числом пар сопротивлений и емкостей каждого слоя. Так, корпусная изоляция тяговых электродвигателей всегда выполняется многослойной: в качестве диэлектрического барьера применяются слюдинитовые ленты, а в качестве пропиточных составов – компаунды на основе эфирных и эпоксидных смол.

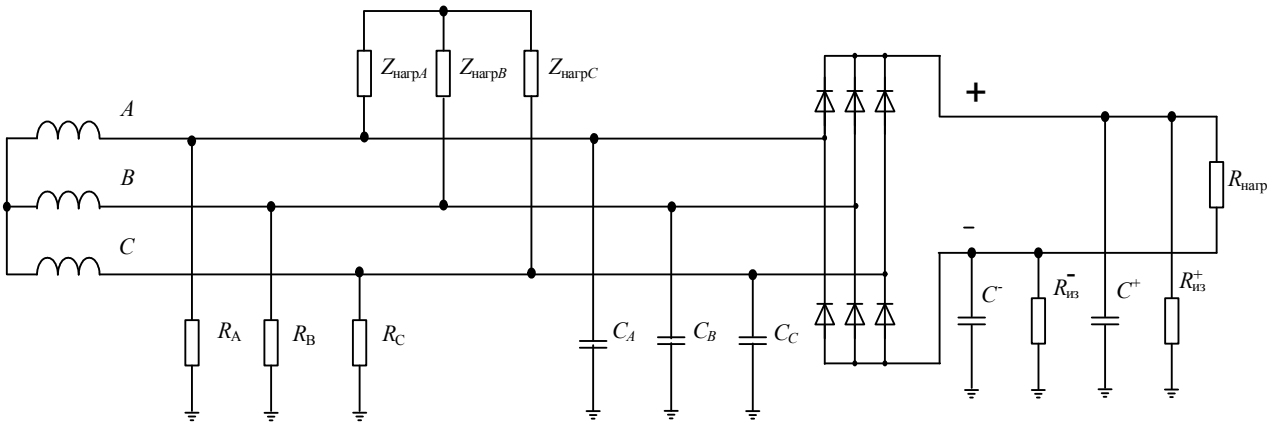

Рис. 3. Эквивалентная схема замещения сети двойного рода тока

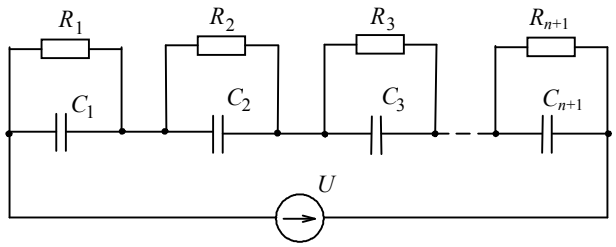

Рис. 4. Эквивалентная схема замещения корпусной изоляции электрических машин, аппаратов и трансформаторов

Рассмотрим *эквивалентную схему замещения изоляции проводника относительно корпуса ЭО* (рис. 5). При приложении к проводнику напряжения U через него будет протекать ток:

$$I = I_1 + I_2 + I_{СК},$$

где I_1 – ток заряда (ток мгновенной поляризации); I_2 – ток абсорбции; $I_{СК}$ – ток утечки (ток сквозной проводимости) [2].

Наличие геометрической ёмкости C_1 и абсорбционной ёмкости (ёмкости медленной поляризации) C_2 объясняет способность изоляции накапливать электрические заряды.

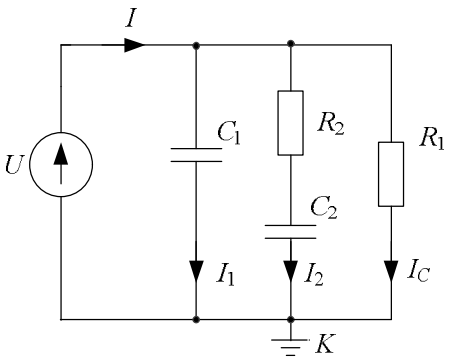

Рис. 5. Эквивалентная схема замещения изоляции проводника относительно корпуса ЭО

Геометрическая ёмкость C_l, через которую протекает ток мгновенной поляризации I_1, характеризует продолжительность броска тока при приложении к изоляции постоянного напряжения. Если к изоляции приложено переменное напряжение, то её наличие объясняется возникновением ёмкостного тока. Величина геометрической ёмкости определяется геометрическими размерами изоляции и расположением изоляции как диэлектрика между проводящими элементами.

Отметим, что данная схема является упрощенной эквивалентной схемой ЭО, причем C_1 в этом случае равна сумме геометрической емкости изоляции и эквивалентной емкости ЭО.

Сопротивления R_1 в эквивалентной схеме замещения изоляции проводника относительно корпуса ЭО определяет значение сопротивления изоляции и силу тока сквозной проводимости (тока утечки) $I_{СК}$.

Цепь, образуемая абсорбционной ёмкостью C_2 и сопротивлением R_2, характеризует явление абсорбции (поглощения) электрической энергии в диэлектрике. Значение сопротивления R_2 зависит от степени однородности изоляции – чем меньше в ней расслоений и пустот, тем больше R_2. Ток, протекающий через эту цепь, называется током абсорбции I_2, который возникает в момент приложения к сети постоянного напряжения из-за перераспределения зарядов между внутренними неоднородными слоями изоляции, и затем уменьшается во времени. Время окончания тока абсорбции зависит от величины постоянной времени заряда абсорбционной ёмкости τ, равной:

$$\tau = R_2 C_2 .$$

Поэтому при высокой степени однородности изоляции и большом значении абсорбционной ёмкости C_2 время затухания тока абсорбции увеличивается и, следовательно, в течение достаточно долгого времени ток I_2 соизмерим с током утечки $I_{СК}$.

Эквивалентное сопротивление изоляции является, как правило, основным параметром для контроля состояния ЭО. Этот параметр зависит от количества источников и приёмников энергии, входящих в объект, и их сопротивления изоляции. Так как обычно все сопротивления включаются параллельно, то эквива-

лентное сопротивление изоляции вычисляется по формуле:

$$R_{из} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{изi}} \right),$$

где n – количество источников и приёмников энергии; $R_{изi}$ – сопротивление изоляции источника или приёмника энергии.

Ёмкость сети относительно земли является распределённой величиной, однако при анализе состояния объекта её заменяют эквивалентной ёмкостью, складывающейся из ёмкости токоведущих элементов относительно корпуса – электрических проводников, обмоток электрических машин, трансформаторов, реле и т.п. и ёмкостью фильтров защиты электрооборудования от помех. Так, применение помехоподавляющих конденсаторов может существенно увеличить суммарную ёмкость сети (ёмкость каждого из фильтров может принимать значения от 0,047-10 мкФ) и, соответственно, ухудшить изоляционные параметры, понизив эквивалентное сопротивление изоляции, при исправном техническом состоянии ЭО. При значительном увеличении эквивалентной ёмкости ЭО (100 мкФ и более) значение сопротивления изоляции, измеренное существующими в настоящее время устройствами, имеет большую погрешность. Особенно это проявляется в случае использования обычных, а не высококачественных конденсаторов. Это обусловлено влиянием токов абсорбции.

В связи с этим встаёт вопрос учёта такого параметра, как ток абсорбции. Указанный ток достаточно сильно проявляется при диагностике ЭО большой мощности – электрических сетей кораблей, метрополитена, шахт; силовых электрических машин и аппаратов – генераторов, электродвигателей; силовых и распределительных трансформаторов и т.п. Переходный процесс спадания абсорбционного тока длится достаточно долго. Так, при приложении напряжения к изоляции мощных генераторов длительность процесса может составлять один час и более, поэтому, чтобы измерить сопротивление изоляции с достаточной точностью, необходимо увеличить время измерения.

Известно большое число работ по контролю параметров электроэнергетических объектов, однако нет их чёткой классификации, что затрудняет использование тех или иных методов контроля.

Все методы и устройства измерения сопротивления изоляции можно условно разделить на две группы:

1) без учёта токов абсорбции;

2) с учётом токов абсорбции.

В свою очередь методы и устройства измерения сопротивления изоляции без учёта токов абсорбции подразделяются на методы без применения дополнительных источников напряжения и методы с использованием дополнительных источников напряжения. Первая группа методов измерения сопротивления изоляции основана на использовании рабочего напряжения сети в качестве измерительного напряжения [1, 3], а вторая группа – на использовании дополнительных источников напряжения, называемых измерительными [1, 4 – 7].

Кроме того, методы этих двух групп можно разделить на «обычные» [1, 4, 5] и «ускоренные» [1, 6, 7].

Анализ существующих методов и устройств измерения сопротивления изоляции с учётом токов абсорбции позволяет разделить их на две большие группы:

1. Методы и устройства, основанные на аппроксимации токов абсорбции [8 – 11].

2. Методы и устройства, основанные на анализе формы тока абсорбции [12, 13].

Так как изменение тока абсорбции можно описать целым рядом функций, с различной точностью передающих реальную кривую спадания абсорбционного тока, то существующие методы и устройства измерения сопротивления изоляции, использующие аппроксимацию токов абсорбции, можно классифицировать следующим образом:

1) аппроксимация экспоненциальной функцией [8, 9];

2) аппроксимация степенной функцией [10, 11].

Применение методов и устройств, использующих аппроксимацию токов абсорбции, позволяет снизить погрешность при измерении сопротивления изоляции, особенно при большой емкости контролируемого объекта относительно земли. Однако в настоящее время нет достаточно четкого экспериментального подтверждения применимости тех или иных функций для аппроксимации токов абсорбции.

Методы и устройства, основанные на анализе формы тока абсорбции (или суммы токов абсорбции и токов утечки) позволяют судить о состоянии изоляции ЭО по изменению формы тока абсорбции.

О старении изоляции можно судить по изменению абсорбционных процессов, протекающих в ней, – по напряжению саморазряда и возвратному напряжению. Однако для проведения испытаний ЭО необходимо отключать от сети на достаточно длительное время, а это не всегда бывает приемлемо.

Существует целая группа способов [14, 15] для оценки состояния изоляции, основанных на контроле индекса поляризации *tpi (total polarization index)*, отражающего интенсивность структурной поляризации. Однако для применения этой группы методов необходимо большое количество данных о контроле реального электрооборудования, причем эксплуатируемого довольно длительное время. Кроме того, время, в течение которого выполняется оценка состояния, достаточно велико.

С учетом проведенного обзора и анализа существующих методов и устройств измерения сопротивления изоляции можно предложить их следующую классификацию (рис. 6).

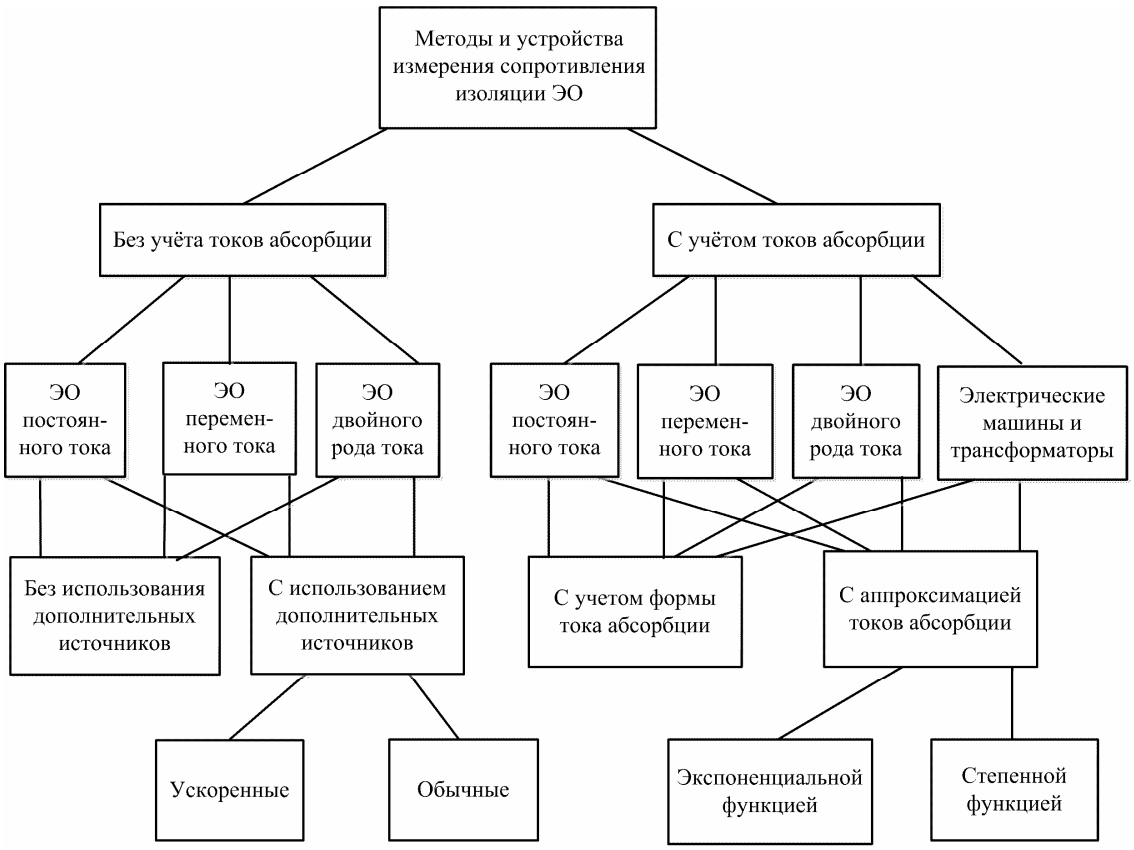

Рис. 6. Классификация методов и устройств измерения сопротивления изоляции

Использование данной классификации поможет правильно выбрать тот или иной метод измерения сопротивления изоляции ЭО. Так, например, если стоит задача измерения сопротивления изоляции ЭО, у которых небольшая эквивалентная емкость или используются качественные помехоподавляющие конденсаторы, то нет необходимости применять методы, учитывающие влияние токов абсорбции. Если же используются конденсаторы большой емкости (десятки и сотни микрофарад), имеющих значительные токи абсорбции, и необходимо измерять большие величины сопротивлений изоляции (сотни килоом и мегаомы), то необходимо использовать методы, учитывающие токи абсорбции. Подробно эти вопросы рассматриваются в последующих публикациях.

Литература

1. *Лачин В.И., Соломенцев К.Ю.* Методы и устройства контроля состояния электроэнергетических объектов с дискретно-распределенными параметрами / Юж.-гос. техн. ун-т (НПИ) Новочеркасск, 2012. 342 с.
2. *Иванов Е.А., Кузнецов С.Е.* Методы контроля изоляции судовых электроэнергетических систем. СПб., 1999.80 с.
3. Пат.2218642 РФ МПК H02H 3/16. Устройство контроля сопротивления изоляции и защиты электротехнической установки.
4. Пат.2120129 РФ МПК G01R 31/08. Способ контроля сопротивления изоляции однофазной электрической сети и устройство для его осуществления.
5. Пат. 2299444 РФ МПК G01R 31/02. Устройство контроля изоляции электрических цепей.
6. Пат. 2200329 РФ МПК G01R 27/18. Способ измерения электрического сопротивления изоляции.
7. Пат. 2044324 РФ МПК G01R 27/18. Способ определения сопротивления изоляции электрических сетей.
8. *Серебряков А.С.* Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции // Электричество. 1999. № 5. С. 40 – 43.
9. Пат. 2490652 РФ МПК G01R 27/02. Устройство для контроля качества электрической изоляции.
10. *Schleif F.R.* Corrections for Dielectric Absorption in High Voltage D-C Insulation Tests // AIEE Transactions. Vol. 75, pt. 111, August 1956.
11. *Curdts E.B.* Insulation Testing by D-C Methods. 1958, reprinted in 1964 in Biddle Technical Publication 22T1.
12. *Серебряков А.С., Семенов Д.А.* Тестовая диагностика корпусной изоляции распределительных трансформаторов АПК // Тр. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород. 2011. № 4 (91). С. 191 – 197.
13. *Серебряков А.С.* Определение параметров схемы замещения корпусной изоляции тяговых электродвигателей // Электротехника. 2009. № 5. С. 40 – 45.
14. Пат. 2491561 РФ МПК G01R 31/02. Способ определения состояния и ресурса изоляционной системы электрооборудования.
15. *Чернышев В.А., Зенова Е.В.* Контроль качества изоляционных промежутков электротехнического оборудования при эксплуатации // Электротехника. 2010. № 11. С. 22 – 28.

References

1. Lachin V.I., Solomencev K.Yu. *Metody i ustrojstva kontrolya sostoyaniya `elektro`energeticheskih ob`ektov s diskretno-raspredelennymi parametrami. Yuzh.-gos. tehn. un-t (NPI)* [Methods and devices of monitoring state of electric power industry objects with discrete distributed parameters]. Novocherkassk, YuRGTU(NPI) Publ, 2012,342 p.
2. Ivanov E.A., Kuznecov S.E. *Metody kontrolya izolyacii sudovyh `elektro`energeticheskih system* [Methods of insulation monitoring of ship power systems]. Sankt-Peterburg, `Elmor Publ, 1999, 80 p.
3. Pat. 2218642 RF MPK H02H 3/16. *Ustrojstvo kontrolya soprotivleniya izolyacii i zaschity `elektrotehnicheskoj ustanovki* [Device of monitoring insulation and protection electrotechnical installations].
4. Pat.2120129 RF MPK G01R 31/08. *Sposob kontrolya soprotivleniya izolyacii odnofaznoj `elektricheskoj seti i ustrojstvo dlya ego osuschestvleniya* [Method of monitoring the insulation resistance of single-phase electrical network and device for its realization].
5. Pat. 2299444 RF MPK G01R 31/02. *Ustrojstvo kontrolya izolyacii `elektricheskih cepej* [Device of insulation monitoring of electrical circuits]**.**
6. Pat. 2200329 RF MPK G01R 27/18. *Sposob izmereniya `elektricheskogo soprotivleniya izolyacii* [Method for measuring electric insulation resistance].
7. Pat. 2044324 RF MPK G01R 27/18. *Sposob opredeleniya soprotivleniya izolyacii `elektricheskih setej* [Method of determining the insulation resistance of electric networks].
8.Serebryakov A.S. Sposob izmereniya ustanovivshegosya znacheniya soprotivleniya izolyacii [A method for measuring steady-state value of insulation resistance] . *`Elektrichestvo,* 1999, no.5, pp. 40-43.
9. Pat. 2490652 RF MPK G01R 27/02. *Ustrojstvo dlya kontrolya kachestva `elektricheskoj izolyacii* [Device for controlling the electrical insulation quality].
10. Schleif F.R., Corrections for Dielectric Absorption in High Voltage D-C Insulation Tests. *AIEE Transactions,* vol. 75, pp. 111, August 1956.
11. Curdts E. B. Insulation Testing by D-C Methods. 1958, reprinted in 1964 in Biddle Technical Publication 22T1.
12. Serebryakov A.S., Semenov D.A. Testovaya diagnostika korpusnoj izolyacii raspredelitel'nyh transformatorov APK [Test diagnostics main insulation of distribution transformers APC]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alexeev]. N. Novgorod, 2011, no.4 (91). pp.191-197.
13. Serebryakov A.S. Opredelenie parametrov shemy zamescheniya korpusnoj izolyacii tyagovyh `elektrodvigatelej [Defining the parameters of the equivalent circuit main insulation of traction motors]. *`Elektrotehnika,* 2009, no. 5, pp. 40-45.
14. Pat. 2491561 RF MPK G01R 31/02. *Sposob opredeleniya sostoyaniya i resursa izolyacionnoj sistemy `elektrooborudovaniya* [A method for determining the status and the resource of electrical insulation system].
15. Chernyshev V.A., Zenova E.V. Kontrol' kachestva izolyacionnyh promezhutkov `elektrotehnicheskogo oborudovaniya pri `ekspluatacii [Quality control of insulation spaces of electrical equipment in operation]. *`Elektrotehnika,* 2010, no.11, pp. 22-28.

Поступила в редакцию ***13 января 2015 г.***