10. Comsol. Programmnyi paket dlya mul'tfizicheskogo modelirovaniya [Multiphysics software package] [Electronic media]. URL: <https://www.comsol.ru/products> (Accessed January 25, 2020).
11. MSC.Adams. Sistema virtual'nogo modelirovaniya mashin i mekhanizmov [MSC.Adams. The system of virtual modeling of machines and mechanisms] [Electronic media]. URL: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Metodicheskie-izdaniya/Osnovy-kinematicheskogo-i-dinamicheskogo-modelirovaniya-v-MSCADAMS--Elektronnyi-resurs-metod-ukazaniya-72544> (Accessed January 25, 2020).
12. SAPR dlya mashinostroeniya i promyshlennogo proizvodstva / Inzhenernye raschety i modelirovanie tekhnologicheskikh processov [CAD for mechanical engineering and industrial production / Engineering calculations and process modeling] / MSC [Electronic media]. URL: <http://www.cad.ru/ru/software/detail.php?ID=3181> (Accessed January 25, 2020).
13. Mukhutdinov A.R., Yanichev S.A. Osnovy primeneniya Autodesk Inventor dlya resheniya zadach proektirovaniya i modelirovaniya: uchebnoe posobie [The basics of using Autodesk Inventor to solve design and modeling problems: a textbook]. Kazan: KNRTU Publ., 2016, 140 p.
14. Londonskaya birzha tsvetnykh metallov [London stock exchange of non-ferrous metals] [Electronic media]. URL: <http://metallischekiy-portal.ru/index-cen-lme> (Accessed January 25, 2020).
15. Golikova A.V., Klimenko E.V. Osobennosti sovremennykh sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya: analiz i praktika primeneniya [Features of modern computer-aided design systems: analysis and application practice] [Electronic media]. URL: <http://files.scienceforum.ru/pdf/2014/5804.pdf> (Accessed January 25, 2020).

Информация об авторах

Мухутдинов Аглям Рашидович – д. т. н., профессор кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, e-mail: muhutdinov@rambler.ru
Ефимов Максим Геннадьевич – ассистент кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский научно-исследовательский технологический университет, г. Казань, e-mail: jero07@bk.ru
Вахидова Зулфия Рашидовна – доцент кафедры таможенного дела, Казанский кооперативный институт (филиал) автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования Центросоюза Российской Федерации «Российский университет кооперации», г. Казань, e-mail: MRZulphiya@rambler.ru

Information about the authors

Aglam R. Mukhutdinov – Doctor of technical sciences, Professor of the Department Technologies of solid chemical substances, Kazan National Research Technological University, Kazan, e-mail: muhutdinov@rambler.ru
Maksim G. Efimov – Assistens of the Department Technologies of solid chemical substances, Kazan National Research Technological University, Kazan, e-mail: jero07@bk.ru
Zulfia R. Vakhidova – associate Professor of the Department Customs matter, Kazan cooperative Institute (branch) of the Autonomous non-profit educational organization of higher education of the Centrosoyuz of the Russian Federation “Russian University of cooperation”, e-mail: MRZulphiya@rambler.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).37-42

УДК 004.94, 539.3

Моделирование схемы замещения высоковольтной изоляции, содержащей несколько включений (локальных неоднородностей)

С. М. Куценко, Н. Н. Климов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ klinn42@mail.ru

Резюме

Существует множество методов оценки состояния высоковольтной изоляции. Все они прямо или косвенно регистрируют поверхностные частичные разряды или частичные разряды, которые образуются на поверхности и/или внутри диэлектрика. Одной из причин деструкции изоляции как раз и является большое количество подобных разрядных процессов. Проведенное моделирование схемы замещения высоковольтной изоляции позволяет, самое главное, провести временной анализ переходного процесса, происходящего при подаче импульсного напряжения на высоковольтную изоляцию, увидеть и оценить время переходного процесса от начала моделирования до наступления устойчивого режима работы модели. В статье приводятся режимы работы схемы, которые имитируют образование частичного разряда посредством работы электронного ключа или ключей в случае моделирования двух включений (двух частичных разрядов). Схема замещения изоляционного промежутка, используемая при моделировании, основана на классической теории образования частичных разрядов в высоковольтной изоляции, но с учетом особенностей, которые позволяют добиться более достоверных результатов, совпадающих с экспериментальными данными. Также модель дает возможность оценить временные параметры разряда с помощью изменения электрических величин элементов схемы замещения. В результате можно сделать вывод о наличии и примерном количестве частичных разрядов внутри изоляции. Отмечены значительные отличия между временем переходного процесса у схем, содержащих разное количество локальных неоднородностей (включений). Такой анализ, как оценка длительности переходного процесса, несомненно, можно использовать в качестве одного из критериев диагностики состояния высоковольтной изоляции, и на его основании делать выводы о дальнейшей ее эксплуатации, планировать сроки замены изоляции.

Ключевые слова

частичный разряд, схема замещения изоляционного промежутка, диэлектрик, высоковольтная изоляция, переходный процесс

Для цитирования

Куценко С. М. Моделирование схемы замещения высоковольтной изоляции, содержащей несколько включений (локальных неоднородностей) / С. М. Куценко, Н. Н. Климов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 37–42. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).37-42

Информация о статье

поступила в редакцию: 20.01.2020, поступила после рецензирования: 14.02.2020, принята к публикации: 24.03.2020

Modeling of the equivalent circuit of high voltage insulation containing several occlusions (local inhomogeneities)

S. M. Kutsenko, N. N. Klimov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ klinn42@mail.ru

Abstract

There are many methods for assessing the state of high voltage insulation. All of them directly or indirectly register surface partial discharges or partial discharges that form on the surface and / or inside the dielectric. One of the reasons for the destruction of insulation is precisely the large number of such discharge processes. Our simulation of the equivalent circuit for high-voltage insulation allows, most importantly, to conduct a temporary analysis of the transient process that occurs when a pulse voltage is applied to the high-voltage insulation, to see and evaluate the time of the transient process from the beginning of the simulation to the onset of a stable operation mode of the model. The article presents the operation modes of the circuit, which simulate the formation of a partial discharge by the operation of an electronic key or keys, in the case of modeling two occlusions (two partial discharges). The equivalent clearance circuit used in the simulation is based on the classical theory of the formation of partial discharges in high-voltage insulation, but taking into account the features that allow achieving more reliable results that coincide with experimental data. Also, the equivalent circuit model allows you to evaluate the temporal parameters of the discharge by changing the electrical values of the elements of the equivalent circuit. This allows us to conclude that there is an approximate number of partial discharges inside the insulation. Significant differences were noted between the time of the transition process in circuits containing a different number of local inhomogeneities (occlusions). Such an analysis as an assessment of the duration of the transition process can undoubtedly be used as one of the criteria for the state of high-voltage insulation, draw conclusions about its further operation, and plan the timing of replacement of insulation.

Keywords

partial discharge, simulation of the equivalent clearance circuit, dielectric, high-voltage insulation, transient

For citation

Kutsenko S. M., Klimov N. N. Kompleksnoe reshenie problemy razvitiya tekhnicheskogo osnashcheniya in-frastruktury magistral'nogo transporta [Modeling of the equivalent circuit of high voltage insulation containing several occlusions (local inhomogeneities)]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 37–42. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).37-42

Article Info

Received: 20.01.2020, Revised: 14.02.2020, Accepted: 24.03.2020

Введение

В процессе эксплуатации высоковольтного оборудования его изоляция подвергается различным физическим и химическим воздействиям. Деструкция высоковольтной изоляции происходит как внутри, так и на ее поверхности. Подробно об этом писали многие исследователи [1–11]. Тем не менее проведение профилактической диагностики изоляции помогает выявлять новые случаи, требующие дополнительных исследований, проведения экспериментов (порой дорогостоящих) либо вмешательства в работу технологического процесса на производстве [12–16]. Современные программные продукты частично позволяют производить моделиро-

вание процессов, возникающих во время эксплуатации высоковольтной изоляции, экономя при этом время и средства. Правда, следует признать, что далеко не все процессы подлежат моделированию.

Ранее при исследовании образования частичных разрядов (ЧР) в толще диэлектрика (на примере фарфорового изолятора) была получена адекватная модель схемы замещения фарфорового изолятора, которая содержит одну локальную неоднородность (2011 г.). Результаты моделирования показали высокую корреляцию с экспериментом, который неоднократно проводился в высоковольтной лаборатории. Тем не менее многие исследователи утверждают, что в толще изоляции образуются несколько каверн (а именно в них воз-

никают ЧР) [17]. Получается, что для повышения качества диагностики и достоверности ее проведения необходимо изучить механизм образования нескольких ЧР одновременно в одном изоляторе.

Моделирование схемы замещения

В монографии В. П. Вдовико [2] приведена схема замещения изоляционного промежутка с включением. Подобная схема будет использована в этой работе, однако в данном случае предполагается, что включение образуется в толще диэлектрика (рис. 1). В монографии В. П. Вдовико указано, что включение образуется вблизи поверхности диэлектрика. На схеме замещения емкость C_3 отображает ту часть диэлектрика, в которой образуется включение (темный прямоугольник).

Рис. 1. Схема замещения изоляционного промежутка с включением:

U – воздействующее на изоляцию переменное напряжение; C_x – емкость изоляционного промежутка; C_1 – емкость основной изоляции; C_2 , C_3 и C_4 – емкости части изоляции, где образуется частичный разряд

Fig. 1. The equivalent clearance circuit with an occlusion:

U – the alternating voltage acting on the insulation; C_x – clearance capacity; C_1 – the capacity of the base insulation; C_2 , C_3 and C_4 – the capacity of a part of the insulation, where a partial discharge is formed

Прототипом модели схемы замещения изоляции явилась модель, предложенная нами ранее. В ней проведено моделирование единичного включения в изоляции. В данной статье рассмотрим модель, которая содержит два включения. Моделирование проведено в программном продукте «National Instruments Multisim».

Моделирование образования ЧР проводится в высоковольтной изоляции, геометрические размеры которой намного больше толщины изоляции. Предложенная в статье схема замещения изоляции несколько отличается от классической схемы замещения [1, 2]. Считаем, что добавление емкости к модели позволило приблизить результаты моделирования к натурным измерениям.

Ниже приведена схема модели, имитирующая образование ЧР в изоляции с одной каверной (рис. 2).

Рис. 2. Схема модели, имитирующая образование частичных разрядов в изоляции с одной каверной: $V_1 = 100$ В (источник сигнала); $L_1 = 6$ мкГн (замещение подводящих проводов); $C_1 = 30$ пФ; $C_2 = C_4 = 100$ пФ; $C_3 = 1$ пФ; $R_4 = 10$ кОм; $R_5 = 1$ кОм; $R_3 = 50$ Ом; I_2 и J_1 – управляемый ключ (в данной схеме он замыкается с периодичностью 1 мкс, время замыкания 40 нс, XSC_1 – осциллограф)
Fig. 2. The circuit of a model simulating the formation of partial discharges in insulation with one pocket: $V_1 = 100$ V (signal source); $L_1 = 6$ μ H (the equivalent of lead wires); $C_1 = 30$ pF; $C_2 = C_4 = 100$ pF; $C_3 = 1$ pF; $R_4 = 10$ k Ω ; $R_5 = 1$ k Ω ; $R_3 = 50$ Ω ; I_2 and J_1 – controlled key (in this circuit, it closes with a frequency of 1 μ s, closing time 40 nsec, XSC_1 – oscilloscope)

Ключ J_1 позволяет имитировать образование ЧР. Приведенные результаты моделирования (рис. 3) показывают, что наблюдается устойчивый колебательный процесс. Подобные сигналы фиксировали многочисленные исследователи ЧР.

Рис. 3. Результат моделирования схемы замещения (масштаб: ось X – 500 нс / дел, ось Y – 10 нВ / дел)

Fig. 3. The result of modeling the equivalent circuit (scale: X axis – 500 ns/div, Y axis – 10 nV/div)

Далее добавим к существующей схеме элементы, позволяющие имитировать образование двух каверн в изоляции одновременно (рис. 4).

Результаты моделирования

На схеме замещения время замыкания ключей J1 и J2 одинаково (рис. 4). Ключи замыкаются по тому же закону, что и на схеме модели, имитирующей образование частичных разрядов в изоляции с одной каверной (см. рис. 2). Далее приведены осциллограммы, на которых отображены результаты моделирования для данного случая (рис. 5, 6).

Рис. 4. Схема модели, имитирующая образование частичных разрядов в изоляции двух каверн: $C2 = C3 = C4 = C7 = 100$ пф; $C5 = C6 = 1$ пф; $R2 = R4 = 10$ кОм; $R3 = R5 = 1$ кОм

Fig. 4. The diagram of a circuit simulating the formation of partial discharges in the insulation of two pockets:

$C2 = C3 = C4 = C7 = 100$ pF; $C5 = C6 = 1$ pF; $R2 = R4 = 10$ kΩ; $R3 = R5 = 1$ kΩ

Рис. 5. Результаты моделирования схемы модели, имитирующей образование частичных разрядов в изоляции двух каверн

Fig. 5. The results of a modeling of the circuit simulating the formation of partial discharges in the insulation of two pockets

Рис. 6. Результаты моделирования схемы модели, имитирующей образование частичных разрядов в изоляции двух каверн (другие начальные данные)

Fig. 6. Results of modeling a circuit simulating the formation of partial discharges in the insulation of two pockets: a – basic data; b – other initial data

При проведении моделирования отмечается интересное явление. Под воздействием постоянного (импульсного) напряжения в начальном времени моделирования наблюдается (вполне естественно) переходный процесс (см. рис. 5, а), а далее емкости цепей заряжаются, и схема работает в устойчивом режиме (см. рис. 6 рис. 5, б). Время переходного процесса при параметрах схемы (см. рис. 4) составляет примерно 0,1 мс. В случае изменения емкости, например, $C5 = 10$ пф, $C4 = 90$ пф, $R3 = 10$ кОм, время переходного процесса изменяется, оно увеличивается до 0,3 мс. Теперь ясно, что разница во времени переходного процесса зависит от наличия локальных неоднородностей внутри диэлектрика.

Заключение

Таким образом, при оценке состояния изоляции можно сделать вывод, что в случае импульсного воздействия на испытываемый объект наличие и количество ЧР внутри диэлектрика оценивается по времени переходного процесса, причем чем дольше длится переходный процесс, тем большее количество ЧР в изоляции и, самое главное – это и есть один из предвестников деструкции изоляции. Проводимый подобный временной анализ предлагается для оценки состояния высоковольтной изоляции, а длительность переходного процесса может быть использована в качестве критерия, по которому можно судить о ее дальнейшей эксплуатации.

Развитие железнодорожного транспорта предполагает эксплуатацию элементов инфраструктуры для совершенно разного подвижного состава, различных скоростей движения поездов по участку железной дороги и веса поездов. В связи с этим системы тягового электроснабжения (СТЭ) также требуют изменения [18]. Тем не менее во всех видах конструкций контактной сети СТЭ, естественно, применяется высоковольтная изоляция из разных материалов. Поэтому раннее выявление ее предотказного состояния является актуальной задачей, а предложенная модель позволит уточнить параметры отказа, что, в конечном счете, поможет спрогнозировать сроки проведения ее диагностики или замены.

Список литературы

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 224 с.
2. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск : Наука, 2007. 155 с.
3. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. 367 с.
4. Коробейников С.М., Вечёркин М.В. Физика возникновения, характеристики и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 18. С. 204–211.
5. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах / Д.А. Поляков, К.И. Никитин, Н.А. Терещенко и др. // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 32–38.
6. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Анализ характеристик и исследование теплового пробоя изоляционных материалов, вызванного частичными разрядами // Научный вестник НГТУ. 2018. Т. 71, № 2. С. 157–174.
7. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. "Relay-race" mechanism of partial discharges in a long chain of cavities for stochastic nature of process // Journal of electrostatics. 2018. Vol. 94. P. 8–13.
8. Zhuang T., Ren M., Xie J., Zhang C., Duan R., Dong M. Slow current induced by partial discharge in kapton, epoxy and pet // IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation. 2019. Vol. 26. No. 3. P. 955–963.
9. Korobeynikov S.M., Ridel A.V., Karpov D.I., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B. Mechanism of Partial Discharges in Free Helium Bubbles in Transformer Oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26. № 5. P. 1605–1611.
10. Study of partial discharges in liquids / S.M. Korobeynikov, A.G. Ovsyannikov, A.V. Ridel et al. // Journal of Electrostatics. 2020. № 103. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388619302529?via%3Dihub> (access date: 12.03.2020).
11. Овсянников А.Г., Коробейников С.М., Вагин Д.В. Связь кажущегося и истинного зарядов частичных разрядов // Электричество. 2014. № 8. С. 37–43.
12. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage / S.M. Korobeynikov, A.V. Ridel, D.A. Medvedev et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Iss. 4. Vol. 26. P. 1035–1042.
13. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Об оценке параметров частичных разрядов // Электричество. 2016. № 6. С. 51–56.
14. Kutsenko S.M., Klimov N.N. Diagnostics of high-voltage insulation of the railway transport overhead system by the method of spaced antennas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019). Vol. 760. Moscow, 12–15 November 2019.
15. Ковригин Л.А. Моделирование частичных разрядов в изоляции кабелей среднего напряжения // Электротехника. 2013. № 11. С. 49–51.
16. Ovsyannikov A.G., Korobeynikov S.M., Vagin D.V. Apparent and True Charges of Partial Discharges // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24. № 6. P. 3687–3693.
17. Куперштох А.Л., Стамателатос С.П., Агорис Д.П. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках на переменном напряжении // Письма в журнал технической физики. 2006. Т. 32. Вып. 15. С. 74–81.
18. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Концепция интеллектуальной системы тягового электроснабжения // Инновационный транспорт. 2015. № 1(15). С. 59–65.

References

1. Kuchinskii G.S. Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruksiyakh [Partial discharges in high-voltage structures]. St. Petersburg: Energiya Publ., Leningrad dept., 1979, 224 p.
2. Vdoviko V.P. Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya [Partial discharges in the diagnosis of high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2007, 155 p.
3. Rusov V.A. Izmerenie chastichnykh razryadov v izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya [Partial discharge measurement in the isolation of high-voltage equipment]. Ekaterinburg: URGUPS Publ., 2011, 367 p.
4. Korobeinikov S.M., Vechorkin M.V. Fizika vozniknoveniya, kharakteristiki i klassifikatsiya chastichnykh razryadov v vysokovol'tnom oborudovanii [Physics of occurrence, characteristics and classification of partial discharges in high-voltage equipment]. Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical systems and complexes]. Novosibirsk: Magnitogorsk State Technical University Publ., 2010, Vol. 18, pp. 204–211.

5. Polyakov D.A., Nikitin K.I., Tereshchenko N.A., Novosolov A.S., Bilevich Ya.P. Issledovanie chastichnykh razryadov v opornykh izolyatorakh [Investigation of partial discharges in support insulators]. Omskii nauchnyi vestnik [Omsk scientific bulletin], 2020, No. 1 (169), pp. 32–38.
6. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Analiz kharakteristik i issledovanie teplovogo proboya izolyatsionnykh materialov, vyzvannykh chastymi razryadami [Analysis of characteristics and investigation of thermal breakdown of insulating materials caused by partial discharges]. Nauchnyi vestnik NGTU [Scientific Herald of Nizhny Novgorod State Technical University], 2018, Vol. 71, No. 2, pp. 157–174.
7. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. “Relay-race” mechanism of partial discharges in a long chain of cavities for stochastic nature of process. Journal of electrostatics, 2018, Vol. 94, pp. 8–13.
8. Zhuang T., Ren M., Xie J., Zhang C., Duan R., Dong M. Slow current induced by partial discharge in kapton, epoxy and pet. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2019, Vol. 26, No. 3, pp. 955–963.
9. Korobeinikov S.M., Ridel A.V., Karpov D.I., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B. Mechanism of Partial Discharges in Free Helium Bubbles in Transformer Oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, Vol. 26, No. 5, pp. 1605–1611.
10. Korobeinikov S.M., Ovsyannikov A.G., Ridel A.V., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu.A., Yassinskii V.B. Study of partial discharges in liquids. Journal of Electrostatics, 2020, No. 103. 1034120304-3886/© 2019 Elsevier B.V.
11. Ovsyannikov A.G., Korobeinikov S.M., Vagin D.V. Svyaz' kazhushchegosya i istinnogo zaryadov chastichnykh razryadov [The relationship of the apparent and true charges of partial discharges]. Elektrichestvo [Electricity], 2014, No. 8, pp. 37–43.
12. Korobeinikov S.M., Ridel A.V., Medvedev D.A., Karpov D.I., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, Vol. 26, Iss. 4, pp. 1035–1042.
13. Kinsht N.V., Petrun'ko N.N. Ob otsenke parametrov chastichnykh razryadov [On the estimation of the parameters of partial discharges]. Elektrichestvo [Electricity], 2016, No. 6, pp. 51–56.
14. Kutsenko S.M., Klimov N.N. Diagnostics of high-voltage insulation of the railway transport overhead system by the method of spaced antennas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12–15 November 2019, Moscow, Russian Federation.
15. Kovrigin L.A. Modelirovanie chastichnykh razryadov v izolyatsii kabelei srednego napryazheniya [Modeling of partial discharges in the insulation of medium-voltage cables]. Elektrotehnika [Electrical engineering], 2013, No. 11, pp. 49–51.
16. Ovsyannikov A.G., Korobeinikov S.M., Vagin D.V. Apparent and True Charges of Partial Discharges. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, Vol. 24, No. 6, pp. 3687–3693.
17. Kupershtokh A.L., Stamatelatos S.P., Agoris D.P. Modelirovanie chastichnykh razryadov v tverdykh dielektrikakh na peremennom napryazhenii [Modeling of partial discharges in solid dielectrics with alternating voltage]. Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Letters in the journal of technical physics], 2006, Vol. 32, Iss. 15, pp. 74–81.
18. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Kontseptsiya intellektual'noi sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [The concept of an intelligent traction power supply system]. Innovatsionnyi transport [Innovative transport], 2015, No. 1(15), pp. 59–65.

Информация об авторах

Куценко Сергей Михайлович – к. т. н., доцент кафедры автоматизации, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsenko_s@irgups.ru

Климов Николай Николаевич – д. ф.-м. н., профессор кафедры автоматизации, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: klinn42@mail.ru

Information about the authors

Sergei M. Kutsenko – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Automation, Telemechanics and Communication, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsenko_s@irgups.ru

Nikolai N. Klimov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Automation, Telemechanics and Communication, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: klinn42@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).42-52

УДК 620.179

Способ определения и оценки дефектов и внутренних напряжений в протяженных стальных изделиях с симметричными поперечными сечениями

М. А. Степанов, А. П. Степанов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ Stepanov_AP@irgups.ru

Резюме

В статье описывается способ определения и оценки дефектов и внутренних напряжений в протяженных стальных изделиях с симметричными поперечными сечениями, представляющими собой большой класс объектов в промышленности и на транспорте. Суть способа сводится к созданию симметричного внешнего магнитного поля