

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

*Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007*

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс 41970

№ 3 (205). 2019 г.

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Каляев И.А. (председатель); Курейчик В.М. (зам. председателя); Бородинский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Вагин В.Н.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Курейчик В.В.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемповский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашимпур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чередниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Клевцов С.И.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Подписано к печати 19.11.2019. Формат 70×108 /₁₆¹. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 19,1. Уч.-изд. л. – 17,7.

Заказ № 7334. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 247-80-51.

Адрес редколлегии: 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, ЮФУ, Д-225, телефон/факс: +7(8634)371071. E-mail: onti@tgn.sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А.О. Пьявченко, А.В. Ильченко ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАСТЕРИЗАТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ПОЧТОВОГО ИНДЕКСА.....	6
С.П. Левашев РАСПОЗНАВАНИЕ 3D ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНВАРИАНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	20
Ю.А. Кравченко, А.Н. Нацкевич АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ.....	32
В.С. Потапов РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КЛАССИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В КВАНТОВОЕ СОСТОЯНИЕ, ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛУТОНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В БИНАРНОЕ	43
Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ .	51
А.Г. Хандизод, Р.Р. Дешмух, И.Б. Аббасов, С.Н. Mahender РАЗРАБОТКА НЕИЗМЕННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ PALMPRINT С ПОМОЩЬЮ SPD4 СПЕКТРОРАДИОМЕТРА SPES4.....	62
А.Н. Каркищенко, С.П. Левашев МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ГРАФОВ.....	72
В.М. Глушань, А.В. Зубрицкий ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛНОГО И ЧАСТИЧНОГО ПЕРЕБОРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧ.....	85
Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, А.Е. Лебединский ГИБРИДНЫЙ БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНДАРТНЫХ БИБЛИОТЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТОПОЛОГИИ ПОЛУЗАКАЗНОЙ СБИС	97
И.А. Тарасова ЗАДАНИЕ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ТЕРМОВ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗИРОВОК МЕДИКАМЕНТОВ ПРИ ЛЕЧЕНИИ ПРЕЭКЛАМПСИИ БЕРЕМЕННЫХ ЖЕНЩИН	110

РАЗДЕЛ II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАТРИЦЫ СМЕЖНОСТИ В ЗАДАННЫХ ПАРАМЕТРАХ ДЛЯ ИСХОДНОЙ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ С ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ПРИЧИННОСТЬЮ	122
М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович МЕТОД ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ	132
И.Е. Лысенко, Д.В. Науменко РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	143
В.В. Гривцов ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СФЕРИЧЕСКИ РАСХОДЯЩИХСЯ ВОЛНАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ	152
О.Ю. Воронков СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ».....	161

РАЗДЕЛ III. НАНОТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

С.В. Малохатко, Е.Ю. Гусев, О.А. Агеев РАЗРАБОТКА СТРЕЛОВИДНОГО КАНТИЛЕВЕРА ДЛЯ МНОГОЧАСТОТНОЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ.....	171
Хамед Е.А. Махьюб, Н.Н. Кисель ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛА В РАЗРАБОТКАХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ LTCC-ТЕХНОЛОГИИ.....	179
Хамед И.А. Махьюб, Н.Н. Кисель ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ МЕТАМАТЕРИАЛОМ	190
А.Л. Береснев, М.А. Береснев, А.В. Быстрицкий ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В ДВС.....	198
А.С. Коломийцев, И.В. Панченко, Н.А. Шандыба, А.В. Котосонова, И.Л. Житяев ФОРМИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ	208

CONTENT

SECTION I. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

A.O. Pyavchenko, A.V. Ilchenko ISSUES OF NEURAL NETWORK CLUSTERIZER CONSTRUCTION FOR ZIP CODE AUTOMATIC RECOGNITION	6
S.P. Levashev RECOGNITION OF 3D OBJECTS BASED ON SPECTRAL INVARIANTS USING DEEP MACHINE LEARNING	20
Yu.A. Kravchenko, A.N. Natskevich THE MODEL OF BOOSTING BIOINSPIRED ALGORITHMS FOR SOLVING PROBLEMS OF CLASSIFICATION AND CLUSTERING	32
V.S. Potapov IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM FOR TRANSFORMING A CLASSICAL IMAGE INTO A QUANTUM CONDITION, ALLOCATION OF BORDERS AND TRANSFORMATION OF A HALFTONE IMAGE TO A BINARY ONE	44
N.K. Poluyanovich, M.N. Dubyago FORECASTING THE CABLE LINES RESOURCE USING THE METHOD OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS	51
A.G. Khandizod, R.R. Deshmukh, I.B. Abbasov, C.N. Mahender DEVELOPMENT OF NON-IMAGING PALMPRINT SPECTRAL LIBRARY VIA ASD FIELD SPEC4 SPECTRORADIOMETER	63
A.N. Karkischenko, S.P. Levashev METHOD OF OBJECT RECOGNITION WIT THE USE OF LASER SCANNING DATA BASED ON SPECTRAL GRAPH THEORY	72
V.M. Glushan, A.V. Zubritckii APPLICATION OF EXHAUSTIVE AND PARTIAL SEARCH FOR SOLVING THE LOW-SIZED COMBINATOR PROBLEMS	86
B.K. Lebedev, O.B. Lebedev, A.E. Lebedinsky HYBRID BIOINSPIRED ALGORITHM FOR PLACING BASIC STANDARD LIBRARY ELEMENTS WHEN DESIGNING A TOPOLOGY VLSI	97
I.A. Tarasova SETTING THE MEMBERSHIP FUNCTIONS OF LINGUISTIC VARIABLES THERMES IN THE TASK OF DETERMINATION THE DOSING OF MEDICATIONS IN THE TREATMENT OF THE PREECLAMPSIA OF PREGNANT WOMEN	111

SECTION II. PROCESS AND SYSTEM MODELING

A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh THE RECONSTRUCTION OF THE ADJACENCY MATRIX IN THE GIVEN PARAMETERS FOR THE ORIGINAL GRAPH MODEL WITH A DETERMINISTIC CAUSALITY	122
M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich THE METHOD OF ESTIMATION AND FORECASTING OF A RESIDUAL RESOURCE OF ISOLATION IN CABLE LINES	133
I.E. Lysenko, D.V. Naumenko FINITE-ELEMENT MODELING OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE SENSITIVE ELEMENT OF A MICROMECHANICAL GYROSCOPE	143
V.V. Gritvsov PHASE CHARACTERISTICS IN SPHERICALLY DISPERSING WAVES OF PARAMETRICAL ANTENNA	153
O.Yu. Voronkov SYNERGETIC APPROACH TO THE "FLYING PLATFORM" CONTROL SYSTEM SYNTHESIS	161

SECTION III. NANOTECHNOLOGY AND MATERIALS SCIENCE

S.V. Malohatko, E.Yu. Gusev, O.A. Ageev DEVELOPMENT OF THE SWEPT CANTILEVER FOR MULTIFREQUENCY ATOMIC FORCE MICROSCOPY.....	171
Hamed E.A. Mahyoub, N. N. Kisel EVALUATION OF THE METAMATERIAL APPLICATION EFFICIENCY IN THE DEVELOPMENT OF MICROSTRIP ANTENNAS BASED ON LTCC TECHNOLOGY	179
Hamed E.A. Mahyoub, N.N. Kisel STUDY OF THE MICRO-STRIP ANTENNA CHARACTERISTICS WITH CONTROLLED METAMATERIALS	191
A.L. Beresnev, M.A. Beresnev, A.V. Bystritskii KNOCK COMBUSTION CONTROL POSSIBILITIES FOR VARIOUS IC-ENGINE TYPES	199
A.S. Kolomiytsev, I.V. Panchenko, N.A. Shandyba, A.V. Kotosonova, I.L. Jityaev FORMATION OF VACUUM AUTO EMISSION CATHODES BY THE METHOD OF LOCAL ION-STIMULATED DEPOSITION OF MATERIALS BY FOCUSED ION BEAM.....	208

21. Wang Y.X.R., Huang H. Review on statistical methods for gene network reconstruction using expression data, *J. Theor. Biol.*, 2014, Vol. 362, pp. 53–61.
22. Wittmann D.M. and other. Reconstruction of graphs based on random walks, *Theor. Comput. Sci.*, 2009, Vol. 410, No. 38-40, pp. 3826-3838.
23. Wu J. and other. A two-stage algorithm for network reconstruction, *Appl. Soft Comput.*, 2018, Vol. 70, pp. 751-763.
24. Wu J., Dang N., Jiao Y. Reconstruction of networks from one-step data by matching positions, *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 2018, Vol. 497, pp. 118-125.
25. Wu X., Wang W., Zheng W.X. Topology detection of complex networks with hidden variables and stochastic perturbations, 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2012, pp. 898-901.
26. Xu K. and other. Discovering target groups in social networking sites: An effective method for maximizing joint influential power, *Electron. Commer. Res. Appl.*, 2012, Vol. 11, No. 4, pp. 318–334.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Цельх Александр Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: ant@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; д.т.н.; профессор.

Васильев Владислав Сергеевич – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; кафедра ИАСБ; к.т.н.; доцент.

Цельх Лариса Анатольевна – Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ); e-mail: l.tselykh58@gmail.com; 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: +79185695760; кафедра экономики и предпринимательства; к.э.н., доцент.

Tselykh Alexander Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: ant@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; professor.

Vasilev Vladislav Sergeevich – e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; the department IASB; cand. of eng. sc.; associate professor.

Tselykh Larisa Anatolievna – Chekhov Taganrog Institute (branch) of Rostov State University of Economics; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; 48, Initsiativnaya street, Taganrog, 347936, Russia; phone: +79185695760; the department of Economics and business; cand. of ec. sc.; associate professor.

УДК 621.315.3

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-132-143

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович

МЕТОД ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Рассматриваются вопросы мониторинга состояния изоляции силовых кабельных линий (СКЛ). Показано, что наличие примесей, либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева в изоляционном материале (ИМ), приводит к возникновению токов утечки. Получена математическая модель, позволяющая рассчитать мощность ЧР, а также определить расположение включения t_1 в основной изоляции, обусловленные мощностью активной составляющей тока утечки, при его возникновении в основной изоляции кабеля. Расчет изменения теплового потока, проходящего через слои изоляции кабеля проводится в зависимости от радиальных расстояний методом кусочно-заданных функций, с учетом теплового сопротивления включения. Математическая модель, позволяет на ряду с послойным расчетом изотерм в поперечном сечении кабеля, определять наличие включений

в ИМ. Методика, предлагаемая в разработанной модели, позволяет проводить учет тепловых потерь основываясь на тепловых и геометрических размерах включения, что не было учтено в указанных выше моделях. Предложен способ определения срока службы изоляционного материала учитывающий суммарную напряженность электрического поля в изоляционном материале для различных размеров включения, а также геометрические и электрические параметры включений; энергия активации структурного пробоя материала. Модель старения изоляционного материала позволит использовать ее для определения остаточного ресурса и прогнозирования износа изоляционного материала. Исследована надежность ИМ, а именно срок службы изоляционного материала КЛ от напряженности и температуры, в сравнении с базовой формулой. Проведены экспериментальные исследования надежности изоляции, а именно разработан алгоритм и выполнено моделирование срока службы изоляции СКЛ от напряженности и температуры. Рассмотрены вопросы технического обслуживания силовых кабельных линий с использованием современных неразрушающих методов диагностики.

Изоляционные материалы; прогнозирование; неразрушающий метод контроля; энергия частичных разрядов; термофлуктуационные процессы; силовые кабели; тепловые потери; износ.

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich

THE METHOD OF ESTIMATION AND FORECASTING OF A RESIDUAL RESOURCE OF ISOLATION IN CABLE LINES

The article deals with the monitoring of the state of insulation of power cable lines (PCL). It is shown that the presence of impurities or oxidation products resulting from heating in the insulation material (IM) leads to leakage currents. A mathematical model is obtained to calculate the power of the CR, as well as to determine the location of the inclusion of ml in the main radiation, due to the power of the active component of the leakage current, when it occurs in the main cable insulation. The calculation of the change in the heat flux passing through the insulation layers of the cable is carried out depending on the radial distances by the method of piecewise given functions, taking into account the thermal conjugation of the inclusion. The proposed mathematical model allows to determine the presence of inclusions along with the layer-by-layer calculation of isotherms in the cross section of the cable. The technique proposed in the developed model allows to account for heat losses based on the thermal and geometric dimensions of the inclusion, which was not taken into account in the above models. A method for determining the service life of the insulation material taking into account the total electric field strength in the insulation material for different inclusion sizes, as well as geometric and electrical parameters of inclusions; activation energy of the structural breakdown of the material. The aging model of the insulation material will allow to use it to determine the residual life and predict the wear of the insulation material. The reliability of IM, namely the service life of the insulating material of CL from the tension and temperature, in comparison with the basic formula is investigated. Experimental studies of insulation reliability have been carried out, namely, an algorithm has been developed and simulation of the service life of PCL insulation from tension and temperature has been performed. The questions of technical service of power cable lines with the use of modern non-destructive diagnostic methods are considered.

Insulation materials; forecasting; non-destructive testing method; energy of partial discharges; thermal fluctuation processes; power cables; heat losses; wear.

Введение. Основным аспектом обеспечения надёжности электроснабжения является реализация энерго- и ресурсосберегающей концепции обслуживания электрооборудования на базе непрерывного мониторинга его технического состояния [1–3]. Для этого необходимы средства и методы позволяющие определять текущее состояние объекта, проводить контроль и прогнозировать состояние.

Актуальность концепции вызвана усложнением требований электросетей к их надёжности, обеспечиваемые в будущем интеллектуальными системами электроснабжения (smart grids), обязательным элементом которых являются средства мониторинга. При эксплуатации СКЛ подвержены воздействию многих факторов вызывающих: электрическое старение изоляционного материала (электрическое поле); увлажнение, ведущее за собой снижение электрических и физических характеристик изоляционного материала; химическое старение (происходящие под влиянием агрессивных веществ); а также тепловое старение и окисление изоляционного материала (тепловое поле). Старение изоляционного материала кабельных линий (КЛ) вследствие продолжительного взаимодействия с негативными факторами может привести к его пробоям. В связи с приведенными аргументами тема работы актуальна.

Достижение указанной цели требует решения задачи, формулируемой следующим образом: разработка диагностических методов которые позволяет обеспечить удаленность и безошибочность мониторинга СКЛ. Обеспечение непрерывного анализа состояния изоляции СКЛ является важным элементом в процессе создания интеллектуальных электрических сетей (smart grids). Решением этой научной и технической проблемы станет обнаружение дефектов изоляционных материалов на ранней стадии их развития и, как следствие, предотвращение аварийных ситуаций, которые способны привести к серьезным негативным последствиям и повлиять на работу системы электроснабжения в целом.

Научная новизна работы состоит в том, что исследуется термофлуктуационная теория разрушения изоляционных материалов, предложен неразрушающий метод диагностики.

Методы измерения характеристик частичных разрядов. Температура изоляции кабеля основной фактор вызывающий старение [4–8, 10, 13], разрушение и выход из строя кабеля. Так в изоляции под продолжительным воздействием напряжения ЧР образуются в газовых пузырях и микротрещинах. А при попадании влаги, возникают водные триинги [12]. Под ЧР понимается частичный электрический пробой изоляционной среды, т.е. при этом перекрывается лишь какой-то локально ограниченный участок всей изоляции. Поверхности, поврежденные длительными ЧР, рис. 1.

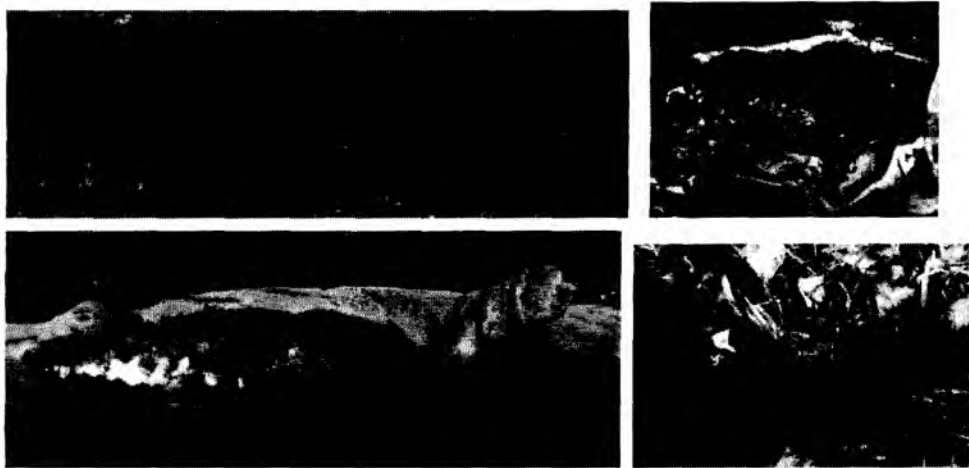


Рис. 1. Внешний вид пробоя в силовом кабеле

Исследование срока службы изоляции. При диагностике кабеля, на основе метода измерения характеристик ЧР, используют метод измерения и локализации ЧР осциллирующим затухающим напряжением [9]. Что позволит определить величину и расположение ЧР и делать заключение о реальном техническом состоянии кабеля. Объектом исследований в работе являются КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена, применяемые для общих задач электроснабжения. Включения в линии не препятствует работе, но имеет тенденцию к ухудшению ее технического состояния. Завершающей стадией развития включения является процесс выхода линии из строя, т.е. пробой. Время развития включения до пробоя может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет. Поэтому задача диагностики технического состояния СКЛ состоит в определении степени развития включения, его опасности и остаточном ресурсе эксплуатации до пробоя. Наличие информации о текущем действительном техническом состоянии СКЛ позволяет исключить внезапные аварии. Проведена комплексная диагностика электрической сети, рис. 2.

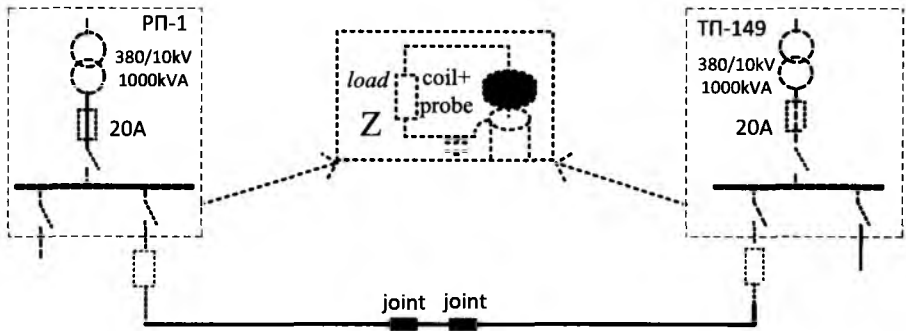


Рис. 2. Схема исследуемой кабельной системы

Технические данные одной из КЛ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические данные КЛ

Тип кабеля	Длина линии, м	Количество соединительных муфт	Особенности прокладки / год прокладки	Средняя токовая нагрузка, А
ААБ-10 3*150 10 кВ	590	2	в грунте /06.1983	10

Благодаря методу возможно определение, как общего состояния линии, так и конкретных мест с включениями, а также прогнозирование развития включения. Эксперимент проводился аппаратурой OWTS по всем фазам СКЛ длиной 590 м, которая находилась под напряжением 6кВ с 1983 года. Участок энергосети состоит из РП1 и ТП-149, соединенных между собой 3-х жильным кабелем типа ААБ 3*150. СКЛ состоит из трех секций, соединенных между собой муфтами. Распределение основной характеристики ЧР (интенсивности ЧР) на карте, представлено на рис. 3,б. На рис. 3,а показана схема участка силовой кабельной системы для измерения ЧР.

Обсуждение полученных результатов. Обнаруженные в кабельной линии (рис. 2) источники ЧР (рис. 3) свидетельствуют о наличии включений в ИМ кабельной системы.

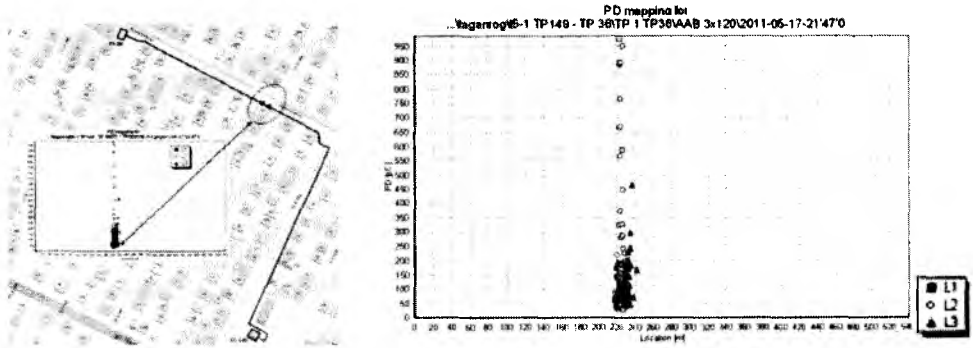


Рис. 3. а – распределение интенсивностей ЧР на участке энергосети; б – карта распределения и интенсивности ЧР в изоляции СКЛ

По результатам обследования КЛ ее техническое состояние оценивается как удовлетворительное. При обследовании на отметке 230 м по всем фазам от ТП–149 зафиксирована повышенная интенсивность ЧР, рис. 3.б. Обнаруженные источники ЧР свидетельствуют о наличии включений в изоляции кабеля. Это может быть связано со снижением электрической прочности основного диэлектрика кабеля, если это место обнаружения ЧР совпадает с расположением муфт, причиной появления такого включения может быть вызвано нарушением технологии монтажа этих муфт. Рекомендуется ремонт в вышеуказанных отметках в течение 1 года с последующей диагностикой. По результатам обследования аппаратурой CDS состояние изоляционного материала кабеля оценивается как неудовлетворительное. Степень увлажнённости изоляционного материала кабеля высокая (кабель «влажный»). Степень старения изоляционного материала кабеля высокая (кабель «сильно состаренный»). Результаты исследований участков СКЛ (напряжение возникновения ЧР, $U_{чр}$; максимальная величина (уровень) ЧР q) сведены в табл. 2, где: $R_{ст}$ – коэффициент старения; Q_S – коэффициент нелинейности.

Таблица 2

Исследование диэлектрических параметров состояния СКЛ

Кабельная система	Параметры диэлектрического старения ($I_{раб}$, $U_{воз}$)		Рекомендации по техническому обслуживанию			
	$R_{ст}$	Q_S	Степень увлажненности	Степень старения изоляции	Состояние	Диагностирование
РП-1 до ТП-149	0.279	1.172	Влажная	Сильно состарена	Неуд.	Через 1-год

Как следует из табл. 2, исправный изоляционный материал имеет значение максимального кажущегося заряда намного меньшей величины даже при установленном испытательном напряжении (СТО 80380011-РЭ(843)-ИСМ 017-2011 Стандарт «Объемы и нормы щадящих и неразрушающих методов испытания и диагностики кабельных линий 6–110кВ»). Таким образом, доказывается взаимосвязь характеристик ЧР со состоянием электрической изоляции.

Исследования процессов старения изоляционного материала. Целью работы является разработка способа определения остаточного ресурса изоляционного материала КЛ, для чего необходимо использовать математическую модель ее старения. Существует много работ, посвященных оценке степени износа и старения изоляционного материала. Для расчета срока службы изоляционного материала СКЛ, в работе использовалась уточнения в модель Журкова, для учета воздействия температуры и электрического поля:

$$\tau_{cl} = \tau_0 \exp \left[\frac{w - \chi E}{RT} \right], \quad (1)$$

где τ_0 – значение срока службы, когда степенное выражение стремится к единице, w – энергия активации структурного пробоя, R – универсальная газовая постоянная, χ – структурный параметр, E – напряженность электрического поля, T – абсолютная температура.

Недостатком определения старения по формуле Журкова является тот факт, что не учитывается энергия ЧР, а также разрывов связей (СС и СН), вызванных этой энергией. То есть предлагается в формуле (2) напряженность E учитывать как сумму напряженностей $E = E_0 + E_V$.

В связи с этим расчет остаточного срока службы изоляции необходимо вести в зависимости от: – напряженности определяемой размерами включения; – энергии разрыва связи мономера (СС и СН – связи); – емкости основной изоляции и включения; – толщины изоляции и размера включения.

Анализ моделей старения показал, что зависимость срока службы изоляционного материала от температуры и напряженности электрического поля существенно зависит от коэффициентов, задаваемых в моделях, которые могут варьироваться в больших пределах.

Исходные данные для расчета представлены на рис. 4, где: r_1 – радиус жилы; r_1 – наружный радиус основной изоляции; $\tau_0 = 10^{-13}$ – время ожидания распада одной связи; $R = 8.3144598 \cdot 10^{-3}$ – универсальная газовая постоянная; T – температура в Кельвинах; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-15}$ – диэлектрическая постоянная; $\epsilon_{SPE} = 2.4$ – диэлектрическая проницаемость полиэтилена; $\epsilon_{VKL} = 1$ – диэлектрическая проницаемость полиэтилена; $f = 50$ Гц – частота, $U = 10$ кВ – напряжение; r_{vkl1} – радиус включения 10 мкм; r_{vkl2} – радиус включения 250 мкм; r_{vkl3} – радиус включения 500 мкм; Включение для простоты представлено в виде сферы; Емкость включения определяется по формуле $C_V = 4\pi\epsilon_0\epsilon_{VKL}r_{VKL}$.

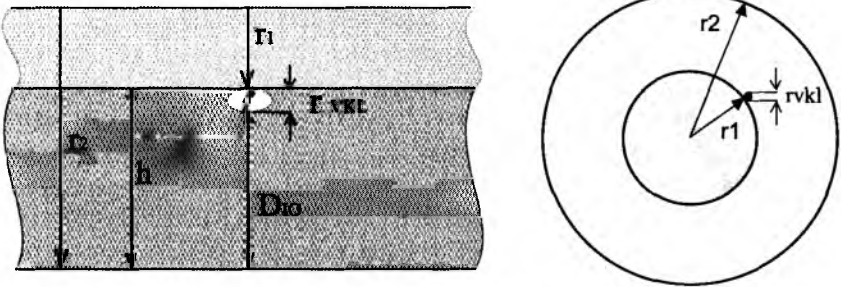


Рис. 4. Исследуемый изоляционный материал

Общая напряженность электрического поля в изоляционном материале при различных размерах включения (r_{vkl1} , r_{vkl2} , r_{vkl3}) запишется как

$$E = \begin{cases} E1 = E_{V1} + E_{O11}, \\ E2 = E_{V2} + E_{O12}, \\ E3 = E_{V3} + E_{O13}. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая, что напряженности на включении для радиуса r_{vkl1} , r_{vkl2} , r_{vkl3}

$$E_V = \begin{cases} E_{V1} = \frac{UC_{I1}}{2r_{VKL1}C_{V1} \log \left(\frac{h}{2r_{VKL1}} \right)}, \\ E_{V2} = \frac{UC_{I2}}{2r_{VKL2}C_{V2} \log \left(\frac{h}{2r_{VKL2}} \right)}, \\ E_{V3} = \frac{UC_{I3}}{2r_{VKL3}C_{V3} \log \left(\frac{h}{2r_{VKL3}} \right)}. \end{cases} \quad (3)$$

Напряженности на остаточном слое изоляции для радиуса r_{vkl1} , r_{vkl2} , r_{vkl3}

$$E_{OI} = \begin{cases} E_{OI1} = \frac{U \cdot \frac{C_{V1} \cdot C_{OI1}}{C_{V1} + C_{OI1}}}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_{VKL} (h - 2r_{VKL1}) \cdot \log\left(\frac{h}{D_{OI1}}\right) \cdot (h - r_{VKL1})}, \\ E_{OI2} = \frac{U \cdot \frac{C_{V2} \cdot C_{OI2}}{C_{V2} + C_{OI2}}}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_{VKL} (h - 2r_{VKL2}) \cdot \log\left(\frac{h}{D_{OI2}}\right) \cdot (h - r_{VKL2})}, \\ E_{OI3} = \frac{U \cdot \frac{C_{V3} \cdot C_{OI3}}{C_{V3} + C_{OI3}}}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_{VKL} (h - 2r_{VKL3}) \cdot \log\left(\frac{h}{D_{OI3}}\right) \cdot (h - r_{VKL3})}. \end{cases} \quad (4)$$

При расчете остаточного срока службы учитывалось, что в одном мономере присутствует две СС связи и четыре СН связи. Энергии разрыва одной связи брались соответственно $W_{CC} = 84 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right]$ и $W_{CH} = 99 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right]$.

Энергию разрыва, как и в работе Полякова, в формуле (1), возьмем среднюю

$$W_{cp} = \frac{2 \cdot W_{CC} + 4 \cdot W_{CH}}{6}. \quad (5)$$

Таким образом, итоговая формула для расчета срока службы изоляционного материала СКЛ

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W_{cp} - \chi E}{RT}\right). \quad (6)$$

Здесь: χ – структурный параметр $\left[\frac{\text{кДж мм}}{\text{моль кВ}} \right] = 0,447$; E – общая напряженность электрического поля рассчитывалась по формулам для $E_1 E_2 E_3$.

Результаты математического моделирования выполненные в интерактивной среде Matlab, представлены на рис. 6. Алгоритм работы программы приведен на рис. 5.

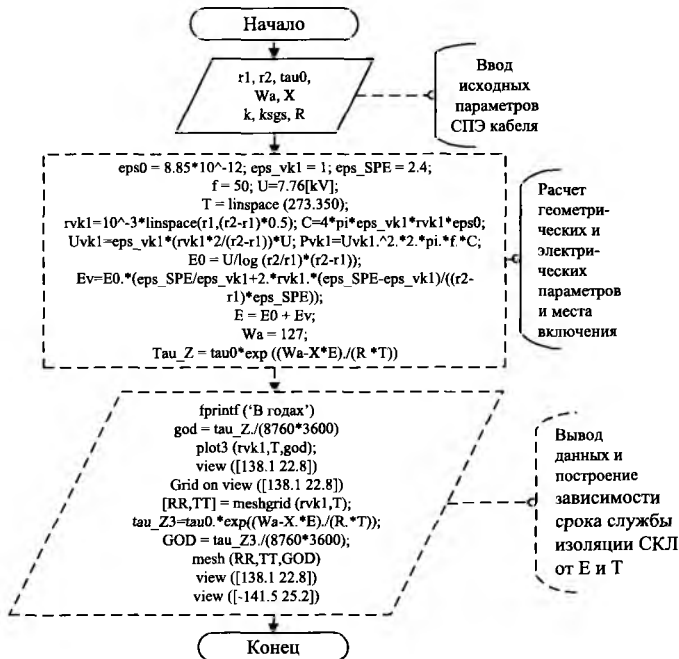


Рис. 5. Алгоритм расчета срока службы изоляции СКЛ

Для математического моделирования выбрана модель старения изоляционно-го материала Журкова, так как она базируется на учете энергетических составляющих разрушающих воздействий, которыми является температура изоляционного материала (как параметр термической и термоокислительной деструкции) и мощность ЧР, которая является функцией от напряженности электрического поля.

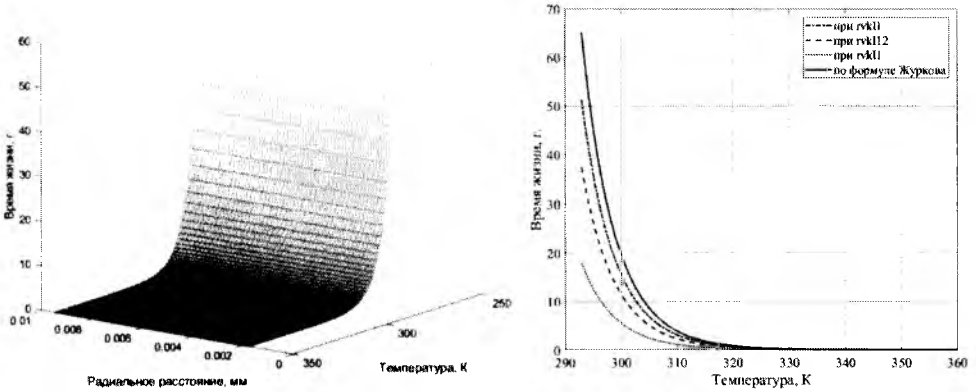


Рис. 6. Контурная поверхность зависимости срока службы изоляции

Обсуждение результатов. Анализ результатов моделирования срока службы изоляционного материала КЛ показывает зависимость ресурса изоляционного материала от величины включений и температуры. Очевидна существенная погрешность расчета по формуле Журкова, в сравнении с усовершенствованной формулой (6), даже при минимальном размере включения (10 мкм).

Заключение. В развитии метода расчета ресурса по формуле Журкова, в статье предложен практичный способ определения срока службы изоляционного материала. Для реализации которого: – получена формула суммарной напряженности электрического поля (2) в изоляционном материале для различных размеров включения; – предложен расчет геометрических и электрических параметров с учетом энергии ЧР, а также места включения; – учитывается энергия активации структурного пробоя (5) вызванная разрывом связей (СС и СН) мономера материала. Уточнена модель старения изоляционного материала Журкова, для кабелей из сшитого полиэтилена, что позволит использовать ее для определения остаточного ресурса и прогнозирования износа изоляционного материала.

Внедрение неразрушающих методов испытаний и диагностики СКЛ с использованием современного испытательного и диагностического оборудования будет способствовать повышению надежности электроснабжения потребителей, а также позволит эффективнее планировать ремонт и замену КЛ по их техническому состоянию. Проведены экспериментальные исследования надежности изоляции, а именно разработан алгоритм и выполнено моделирование срока службы изоляции СКЛ от напряженности и температуры.

Работа выполнена при поддержке гранта: Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии, № ВнГр-07/2017-15.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коржов А.В., Томашева Е.В. Энергетическая диаграмма силового кабеля для анализа активных потерь, влияющих на состояние изоляции // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – № 11. – Вып. 9. – С. 29-31.

2. *Полуянович Н.К., Тибейко И.А.* Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. – Таганрог, 2014.
3. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Щуровский В.А.* Методы испытания силового электрооборудования. – Таганрог, 2016.
4. *Зайцев Е.С. и др.* Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink // Матер. НПК. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – 176 с.
5. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Термофлуктуационный метод диагностики состояния изоляционных материалов СКЛ и прогнозирование их остаточного ресурса // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 66-71.
6. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишхопов В.Х.* Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 117-127.
7. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3 (46). – С. 25.
8. *Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K.* Thermal Processes of the Isolating Materials in Problems of Nondestructive Diagnostics of the Main and Distributive Power Stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 229. – 2017.
9. *Дубяго М.Н., Пишхопов В.Х., Полуянович Н.К.* Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 230-237.
10. *Дубяго М.Н., Пишхопов В.Х., Полуянович Н.К.* Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 230-237.
11. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. 18(16): e3.
12. *Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // 2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2017) 2–5 August 2017, Phuket, Thailand IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 229. – 012036. – ISSN: 1757-899X.
13. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследования изоляции кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 200-205.
14. *Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K.* Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 752-753. – P. 1153-1157.
15. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // Advances in energy, environment and chemical engineering (AEECE 2015). – 2015. – P. 49-54.
16. *Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S.* The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development // Proceedings of X International Saum Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2010). – 2010. – P. 265-269.
17. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges // Advances in Materials Science and Applications. – 2015. – Vol. 4, No. 1. – P. 23-32.
18. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Неразрушающий метод прогнозирования остаточного ресурса силовых кабельных линий // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2012. – № 1 (8). – С. 27-33.
19. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 459. – P. 70-75.

20. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal Processes of the Isolating Materials in Problems of Nondestructive Diagnostics of the Main and Distributive Power Stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 229(1),012036.
21. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems // EAI Endorsed Transactions on Energy Web 5(16),e3.
22. *Dubyago M.N. & Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technology 12 2017-01. – 2018. – Vol. 5, Issue 16. E3.
23. *Dubyago M.N. Poluyanovich N.K.* Dependence of dielectric loss tangent on the parameters of multilayer insulation materials cable. Environment, Energy and Applied Technology – Sung & Kao (eds), 2015 Taylor & Francis Group, London. – P. 1003-1007. ISBN 978-1-138-02691-9.
24. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations. EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies 18(16): e3. ж. SJR SCImago Journal & Country Rank
25. *Marina N. Dubyago and Nikolay K. Poluyanovich.* Estimation of Insulating Materials Depreciation and Forecasting the Residual Cable Resource Considering the Current Core Temperature // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2019. – Vol. 7, No. 1. – P. 415-420.

REFERENCES

1. *Korzhev A.V., Tomasheva E.V.* Energeticheskaya diagramma silovogo kabelya dlya analiza aktivnykh poter', vliyayushchikh na sostoyanie izolyatsii [Energy diagram of a power cable for the analysis of active losses affecting the insulation condition], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Energy"], 2008, No. 11, Issue 9, pp. 29-31.
2. *Poluyanovich N.K., Tibeyko I.A.* Eksploatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii [Operation and repair of power supply systems of industrial enterprises]. Taganrog, 2014.
3. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shchurovskiy V.A.* Metody ispytaniya silovogo elektrooborudovaniya [Methods of testing power electrical equipment]. Taganrog, 2016.
4. *Zaytsev E.S. i dr.* Modelirovanie teplovykh protsessov v kabele s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena sredstvami Matlab i Simulink [Modeling of thermal processes in a cable with cross-linked polyethylene insulation by means of Matlab and Simulink], *Mater. NPK* [Materials of scientific and practical conference]. Part 1. Saint Petersburg: Izd-vo Politehnicheskogo universitetata, 2014, 176 p.
5. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Termofluktatsionnyy metod diagnostiki sostoyaniya izolyatsionnykh materialov SKL i prognozirovanie ikh ostatochnogo resursa [Thermal fluctuation method of diagnosing the condition of the insulation materials of the SCR and the prediction of their residual life], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics], 2018, Vol. 61, No. 5, pp. 66-71.
6. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh.* Metod issledovaniya termofluktatsionnykh protsessov v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya izolyatsionnykh materialov [Research method thermal fluctuation processes in problems of diagnostics and forecasting of insulating materials], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the don state technical University], 2017, Vol. 17, No. 3 (90), pp. 117-127.
7. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Termodinamicheskiy sposob vyyavleniya destruktivnykh izolyatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya resursa kabel'nykh sistem [Thermodynamic method of detecting degradation of insulation in the problems of diagnostics and forecasting of resource cabling systems], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2017, No. 3 (46), pp. 25.
8. *Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K.* Thermal Processes of the Isolating Materials in Problems of Nondestructive Diagnostics of the Main and Distributive Power Stations, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 229, 2017.
9. *Dubyago M.N., Pshikhopov V.Kh., Poluyanovich N.K.* Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Assessment and prediction of the insulation materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 230-237.

10. Dubyago M.N., Pshikhopov V.KH., Poluyanovich N.K. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Assessment and prediction of the insulation materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 230-237.
11. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies*. 18(16): e3.
12. Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration, *2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2017) 2–5 August 2017, Phuket, Thailand IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 229, 012036. ISSN: 1757-899X.
13. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Metod amplitudnogo i fazovogo raspredeleniya impul'sov chastichnykh razryadov v zadachakh issledovaniya izolyatsii kabel'nykh liniy [Method of amplitude and phase distribution of partial discharge pulses in the problems of cable lines insulation research], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 200-205.
14. Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K. Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 752-753, pp. 1153-1157.
15. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration, *Advances in energy, environment and chemical engineering (AEECE 2015)*, 2015, pp. 49-54.
16. Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S. The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development, *Proceedings of X International Saum Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2010)*, 2010, pp. 265-269.
17. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges, *Advances in Materials Science and Applications*, 2015, Vol. 4, No. 1, pp. 23-32.
18. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Nerazrushayushchiy metod prognozirovaniya ostatochnogo resursa silovykh kabel'nykh liniy [Non-destructive method of predicting the residual life of power cable lines], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer science, computer science and engineering education], 2012, No. 1 (8), pp. 27-33.
19. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 459, pp. 70-75.
20. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal Processes of the Isolating Materials in Problems of Nondestructive Diagnostics of the Main and Distributive Power Stations, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 229(1),012036.
21. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web* 5(16),e3.
22. Dubyago M.N. & Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations, *EAI Endorsed Transactions on energy Web and Information Technology*. 12 2017-01, 2018, Vol. 5, Issue 16. E3.
23. Dubyago M.N. Poluyanovich N.K. Dependence of dielectric loss tangent on the parameters of multilayer insulation materials cable. Environment, Energy and Applied Technology – Sung & Kao (eds), 2015 Taylor & Francis Group, London, pp. 1003-1007. ISBN 978-1-138-02691-9.
24. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies* 18(16): e3. ж. *SJR SCImago Journal & Country Rank*.
25. Dubyago Marina N. and Poluyanovich Nikolay K. Estimation of Insulating Materials Depreciation and Forecasting the Residual Cable Resource Considering the Current Core Temperature, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2019, Vol. 7, No. 1, pp. 415-420.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Финаев.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 621.396

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-143-152

И.Е. Лысенко, Д.В. Науменко

РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Микромеханические вибрационные гироскопы являются одним из устройств микроэлектромеханических систем (МЭМС) и предназначены для измерения угловой скорости. В данной работе исследуется модель одномассового микромеханического гироскопа LL-типа, изготавливаемого по объемной кремниевой технологии с толщиной приборного слоя 50 мкм. Целью работы является изучение измерительных свойств прибора с определенной частотной настройкой. Описаны проведенные для этого исследования его динамических характеристик, частотного отклика при воздействии гармонических нагрузок эквивалентных тем, что будут воздействовать при реальной работе микрогироскопа на изготовленный чувствительный элемент. АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) МЭМС гироскопа существенно зависит от конструкции и топологии чувствительного элемента. При выборе конструкции закладываются качественные характеристики и алгоритм его функционирования, при разработке топологии получают количественные характеристики существенно влияющие на измерительные свойства прибора. Получение амплитудно-частотных характеристик на этапе проектирования позволит оценить предельные точностные характеристики, определить его чувствительность, провести оптимизацию конструкции гироскопа для улучшения его конечных характеристик. В статье описана последовательность произведенных расчетов для получения АЧХ и определения чувствительности к угловой скорости методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench. В результате исследований определены собственные частоты ММГ по двум осям, по полученным АЧХ графическим способом определена полоса пропускания, определена зависимость изменения емкости от угловой скорости. По полученным результатам анализа проведена оценка измерительных свойств прибора и рекомендации по его дальнейшей частотной настройке и оптимизации.

МЭМС; микрогироскоп; конечно-элементный анализ; модальный анализ; гармонический анализ; резонанс.

I.E. Lysenko, D.V. Naumenko

FINITE-ELEMENT MODELING OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE SENSITIVE ELEMENT OF A MICROMECHANICAL GYROSCOPE

Micromechanical vibration gyroscopes are one of the devices of microelectromechanical systems (MEMS) and are designed to measure angular velocity. In this work, we study a model of a single-mass micromechanical linear gyro, manufactured by bulk silicon technology with an in-