

13. OST 1 00497-97 Nadezhnost' izdeliy aviatsionnoy tekhniki. Metody otsenki i analiza pokazateley nadezhnosti samoletov (vertoletov) pri ikh ekspluatatsii [OST 1 00497-97 Reliability of aircraft products. Methods of evaluation and analysis of reliability indicators of aircraft (helicopters) during their operation], 13ps.
14. GOST 27.310-95 Analiz vidov, posledstviy i kritichnosti otkazov [GOST 27.310-95 Analysis of the types, consequences and criticality of failures], 14 p.
15. Available at: <http://oobskspetsavia.ru/2015/10/09/predposylki-i-prichiny-aviacionnyx-proisshestvij/>.
16. *Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D.* Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti: Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz [Mathematical methods in the theory of reliability: The main characteristics of reliability and their statistical analysis]. 2nd ed. Moscow: URSS, 2013, 584 p.
17. *Boldyrev A.S., Verevkin A.L., Pshikhopova K.V., Verevkina L.S.* Metodika i modelirovanie nadezhnosti sistemy gruppovogo upravleniya robotizirovannymi platformami [Methodology and modeling of reliability of a group control system for robotic platforms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (152), pp. 87-101.
18. Available at: <http://lektsii.net/4-18471.html> - Grazhdanskoy aviatsii [<http://lektsii.net/4-18471.html> - Civil aviation].
19. Available at: http://airforce.ru/aircraft/miscellaneous/ejectionseats/tu/tu-22_accidents.htm.
20. Available at: <https://szmtu-m.favt.ru/public/files/2017/02/НИР2016.pdf>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.Ю. Медведев.

Болдырев Антон Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: boldyrev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; Институт радиотехнических систем и управления; директор; к.т.н.

Веревкин Александр Леонидович – e-mail: verevkin.a@mail.ru; тел. +78634371634; кафедра летательных аппаратов; аспирант.

Веревкина Лина Станиславовна – e-mail: lverevkina@sfedu.ru; тел. +78634371697; к.т.н.; доцент.

Boldyrev Anton Sergeevich – Southern Federal University; boldyrev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; Institute of Radio Engineering Systems and Control; director; cand. of eng. sc.

Verevkin Alexander Leonidovich – e-mail: verevkin.a@mail.ru; phone: +78634371634; the department of aircraft; graduate student.

Verevkina Lina Stanislavovna – e-mail: lverevkina@sfedu.ru; phone: +78634371697; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-180-194

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков

ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СПЭ КАБЕЛЕЙ

Статья посвящена исследованиям вопросов по созданию метода оценки долговечности основной изоляции силовых кабельных линий на основе термофлуктуационной теории разрушения твердых тел. Рассмотрены особенности развития пробоя в однородных и неоднородных диэлектриках. Рассматриваются проблемные вопросы изоляционных материалов силовых кабельных систем (СКС) на основе разработки и развития методов неразрушающего контроля. Установлены основные компоненты, разрушающие изоляцию СКС. Описана термофлуктуационная теория разрушения и оценка долговечности электрической изоляции силовых кабелей. Предлагается аналитический метод оценки процессов окисления целлюлозы с определением наиболее вероятного. Предложенный подход выявления основ-

ных процессов разрушения изоляции позволяет более детально представить предпосылки к развитию частичных разрядов (ЧР) в изоляции и определить мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции изоляции СКС. Изложены результаты экспериментов по исследованию сроков службы изоляционного материала состаренных образцов силового кабеля в термошкафу, по определению критериев старения. Экспериментальные данные интерпретированы с позиций термофлуктуационной теории. Выявлена и исследована зависимость увеличения разности температур ΔT от степени износа электроизоляционных свойств материала, что позволяет прогнозировать его ресурс. Рассмотрена термофлуктуационная теория разрушения изоляционных материалов вызванного термофлуктуационным разрывом химических связей и оценки долговечности электрической изоляции кабелей из сшитого полиэтилена. Показано что, для расчета средней энергии мономерного звена различных полимерных материалах необходимо знать: химическую формулу мономерного звена и значения энергий связи. В работе проведено определение времени до пробоя основной изоляции СКЛ при действии температуры. Модель может быть использована в устройствах и системах непрерывного диагностирования силовых кабелей по температурным режимам.

Оценки долговечности электрической изоляции термофлуктуационным разрывом химических связей; термофлуктуационная теория разрушения; надежность систем энергообеспечения.

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich, D.V. Burkov

THERMOFLUCTUATION THEORY OF DESTRUCTION AND EVALUATION DURABILITY OF ELECTRICAL INSULATION OF SPE CABLES

The article is devoted to research on the creation of a method for assessing the durability of the main insulation of power cable lines based on the thermofluctuation theory of destruction of solids. The features of breakdown development in homogeneous and inhomogeneous dielectrics are considered. The problematic issues of insulating materials of power cable systems (PCS) are considered on the basis of the development and development of non-destructive testing methods. The main components that destroy the insulation of the PCS are installed. The thermofluctuation theory of destruction and the evaluation of the durability of electrical insulation of power cables are described. An analytical method is proposed for evaluating the processes of cellulose oxidation with the determination of the most probable. The proposed approach to identifying the main processes of insulation destruction allows us to present in more detail the prerequisites for the development of partial discharges (PD) in isolation and to determine measures to minimize the processes leading to the destruction of PCS insulation. The results of experiments on the study of the service life of the insulating material of aged ends of a power cable in a thermal cabinet, to determine the aging criteria, are presented. The experimental data are interpreted from the standpoint of the thermofluctuation theory. The dependence of the increase in the temperature difference ΔT on the degree of wear of the electrical insulating properties of the material is revealed and investigated, which makes it possible to predict its resource. The thermofluctuation theory of the destruction of insulating materials caused by the thermofluctuation rupture of chemical bonds and the evaluation of the durability of electrical insulation of cables made of cross-linked polyethylene are considered. It is shown that, in order to calculate the average energy of the monomeric link of various polymer materials, it is necessary to know: the chemical formula of the monomeric link and the values of the binding energies. In the work, the time before the breakdown of the main insulation of the PCS was determined under the action of temperature. The model can be used in devices and systems for continuous diagnosis of power cables according to temperature conditions.

Estimates of the durability of electrical insulation by thermal fluctuation rupture of chemical bonds; thermal fluctuation theory of destruction; reliability of power supply systems.

Введение. Большинство объектов таких отраслей промышленности как химическая, нефтехимическая, металлургическая, потребители многих организаций, служб жилищно-коммунального хозяйства по требованиям к обеспечению электрической энергией относятся к потребителям первой категории. При сохранении потребителей второй категории и уменьшении третьей появились объекты, тре-

бующие три независимых ввода (источника питания) при двух и более резервных генерирующих мощностях [1, 2]. Это увеличивает кабельные потоки. Поэтому повышение надежности силовых КЛ – одна из важнейших задач обеспечения надежного электроснабжения потребителей. Электрооборудование сложных распределительных систем (СРС) характеризуется значительным превышением нормативных сроков его эксплуатации, что означает большой износ электрооборудования. В распределительных электрических сетях среднего напряжения 6–35 кВ, систем электроснабжения, наибольшее распространение получили силовые кабели напряжением 6–10 кВ [3] (например, для внутризаводского сетевого хозяйства и питания мощных потребителей) [ГОСТ 24291-90, статья 70].

Вследствие различия физико-механических параметров материалов, составляющих систему изоляции, в них неизбежно возникают внутренние механические напряжения, которые могут привести к разрушению основной изоляции СКЛ [3]. В процессе теплового старения происходит углубление отверждения за счет непрореагировавших активных групп и двойных связей, а также структурирования, обусловленного термоокислительными процессами.

Самым слабым с точки зрения надежности элементом силовых кабельных линий является система изоляции [4]. Даже при кратковременном повышении температуры происходят качественные изменения в электрической изоляции. Если повышение температуры держится длительное время, начинаются необратимые химические процессы, сопровождающиеся необратимым ухудшением электрических свойств изоляции – тепловое старение изоляции [5–8]. Тепловой пробой – происходит когда изоляция получает больше тепловой энергии, чем способна отвести. Возникает как следствие размягчения, которое приводит к деформации и уменьшению толщины материала. После пробоя или микро пробоя происходит разрушение изоляции, образуются каналы, по которым повторный пробой будет происходить уже при меньшем напряжении.

Критерием отказа является наличие дефектов в изоляции, в местах которых возможно возникновение короткого замыкания. При всех прочих равных условиях вероятность отказа изоляции будет тем выше, чем больше число повреждений. Эксплуатационная надежность высоковольтных систем электрической изоляции обмоток электрооборудования определяется в первую очередь их рабочей температурой и нагревостойкостью примененных электроизоляционных материалов.

Особенности развития пробоя в неоднородных диэлектриках. Выделяют две стадии развития пробоя твердых диэлектриков [3]: подготовительную (стадию потери электрической прочности) и завершающую (стадию разрушения). По природе процессов, определяющих развитие подготовительной стадии, различают три основные формы пробоя твердых диэлектриков: электрический; тепловой и электрохимический. [9]. Основной закономерностью для электрохимической формы пробоя, является электрическое старение, обусловленное сравнительно медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, развивающимися под действие электрического поля или разрядов в окружающей среде. Электрическое старение развивается при гораздо более низких значениях напряжения, чем пробивное напряжение при электрическом и тепловом пробое. Время $\tau_{ж}$ от момента подключения напряжения U к электродам образца до завершения пробоя называется временем жизни. Значение $\tau_{ж}$ уменьшается с повышением U , а во многих случаях и с возрастанием температуры. На рис. 1. показаны поверхностные повреждения компонент кабельной системы вызванные длительными ЧР.



Рис. 1. Внешний вид пробоя в кабельной системе

Одним из наиболее востребованных диэлектрических материалов в современном высоковольтном оборудовании является бумага [3]. Согласно ГОСТ 23436–83 для изоляции силовых кабелей до 10 кВ применяют однослойную кабельную бумагу марок К-080, К-120, К-170 (толщиной 80, 120 и 170 мкм соответственно). Повторные циклы нагрева охлаждения кабеля (тепловое дыхание) приводят к перемещению как пропиточного состава, так и воздушных включений (ВВ). Ёмкость, замещающая целый участок изоляции принята, согласно справочным данным, СИ 2,13 10⁻⁸ Ф (согласно [10])

Для повышения механических, электрофизических, а также других свойств ЭИ бумаги используются различные виды модифицированной целлюлозы (органосульфатная, сульфатная, органосульфетная целлюлоза), полученной с помощью новых и модифицированных методов делигнификации.

Оценки долговечности изоляционных материалов силовых кабельных линий (СКЛ) может выполняться с использованием теории механической прочности полимеров, какой является термофлуктуационная теория Журкова. Газовые включения (поры) являются одним из видов неоднородностей диэлектриков. Наличие таких включений (пор, трещин) снижает электрическую прочность полимера в результате резко понижающейся прочности самих газовых включений и по причине искажения поля внутри образца. Трещины и поры могут появляться при нарушении технологии изготовления изделий. Так, электрическая прочность политетрафторэтилена сильно зависит от наличия в нем пузырей и трещин, которые возникают при неправильных режимах спекания [11].

Деградация бумажно-масляной изоляции. Изменения свойств изоляционной бумаги и масла СКЛ связаны с нормальным старением и воздействием внешних нагрузок. Внешние напряжения могут резко ускорить деградацию ИМ. Промежутки между бумажными полосками в изоляции силового кабеля заполнены маслом, рис. 2, которое так же может изменять свои свойства.

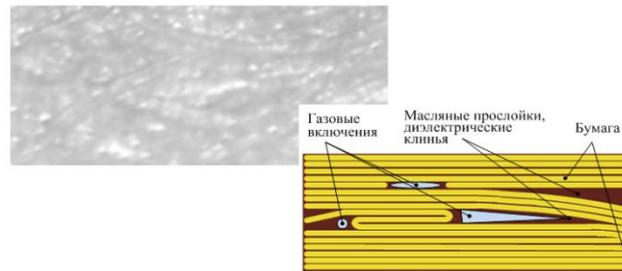


Рис. 2. а – поверхность бумаги, б – структура фрагментов бумажно-масляной изоляции

При эксплуатации кабеля в изоляции происходит три различных механизма деградации: механизм гидролитического разложения, окисления и термической деструкции. В ходе деструкции изоляционных материалов кабелей получаются

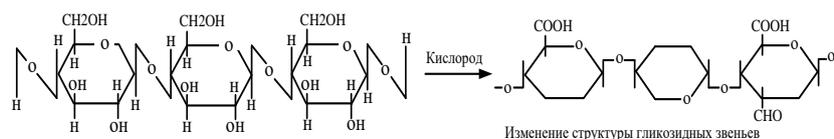
такие газы как угарный, углекислый, небольшое количество водорода, метана, этана и этилена. Эти газы вытесняют масло и заполняют области между бумажными полосками, образуя газовые полости. Газовые пузырьки диаметром от 1 мм и более являются явным дефектом изоляции. Напряженность электрического поля внутри полости газа выше, чем в окружающей изоляции. Когда его уровень превышает предельное значение, происходит ЧР, что приводит к образованию новых полостей, заполненных проводящими частицами, такими как углерод.

Результаты по исследованию долговечности и термодеструкции полимеров С.Н. Журкова с сотрудниками, привели к выводу, что в условиях опыта каждая флуктуация приводит к разрыву отдельно взятой цепи полимера. Поэтому энергия термодеструкции цепей полимера совпадает или практически близка к энергии активации разрушения полимера [12].

Термодеструкция или пиролиз целлюлозы в отсутствие окислителей и влаги приводит к разрыву гликозидных связей и открытию колец глюкозы. Влажность является самым мощным понижающим агентом бумажной изоляции. В зависимости от процесса деградации вода образуется или потребляется: например, формирование уксусной кислоты будет потреблять воду.

Пиролиз может происходить без доступа кислорода и влаги. Во время нормальной работы, при температуре ниже 140 °С, процессы пиролиза не достигают большого значения. На рис. 3 показаны различные процессы деградации и их основные продукты. Процесс окисления можно разбить на несколько стадий:

I – стадия окисления (начальная):



II – стадия частичного окисления:



III – стадия полного окисления:

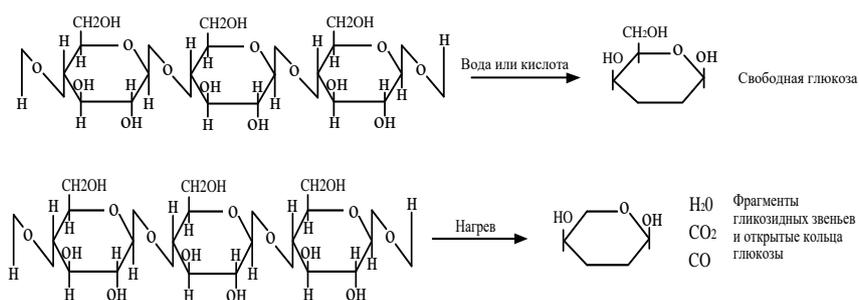
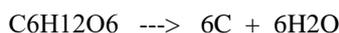
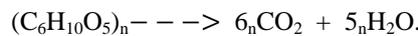


Рис. 3. Процессы деградации целлюлозы и их основные продукты

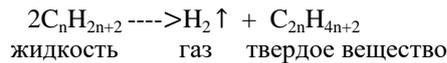
Во время деградации [13] уменьшается степень полимеризации изолирующей бумаги. Степень полимеризации новой бумаги составляет около 1100 до 1500, а значение менее 500 свидетельствует о значительном термическом разложении [14]. Ослабление механических свойств может привести к отказу кабеля при коротких замыканиях.

Термодинамический расчет процессов, разрушающих изоляцию. В работе [26] авторами был предложен подход выявления основных процессов разрушения изоляции, который позволяет более детально представить предпосылки к развитию частичных разрядов (ЧР) в изоляции и определять мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции изоляции СКС. Были установлены основные компоненты, разрушающие изоляцию СКС. Предложен аналитический метод оценки процессов окисления целлюлозы с определением наиболее вероятного. Показано, что наличие воздушных включений в кабелях с вязкой пропиткой (максимально до 3% по объему), приводит к окислению клетчатки. В этой стадии при температурах 60-70°C происходит окисление первичных гидроксильных групп до альдегидных или до карбоксильных

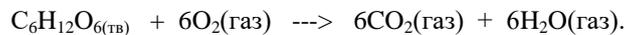
Дальнейшая стадия окисления связана уже с деструкцией молекул клетчатки (целлюлозы). Последняя стадия окисления завершается полным разложением клетчатки на окись углерода и воду:



При наличии ЧР в воздушных включениях в изоляции кабелей с вязкой пропиткой происходит разложение масла с выделением газов (преимущественно водорода) и твердого вещества («Х-воск»). Для метановых углеводородов реакция идет следующим образом:



Регулирующим фактором является наличие доступа кислорода и повышенной температуры. Если имеется доступ кислорода, то разрушение изоляции происходит ускоренным темпом из-за образования большого количества газов, так как из 1 моль молекулы глюкозы образуется 12 молекул газов (оксид углерода и вода):



Выделение газов увеличивает интенсивность ЧР с переходом их в критические с величиной заряда $q_{чр} \cong 10^{-8} - 10^{-7}$ Кл, что приводит к локальному повышению температуры и возрастанию термической деструкции целлюлозы (клетчатки). Например, под действием электрического поля порядка 30 кВ/мм и температуры 50°C происходит разложение пропитанной бумаги с выделением следующих газов: $H_2 - 55\%$, $CO_2 - 36\%$, $CO - 9\%$. Проникновение влаги в БМИ существенно ускоряет процесс деструкции (увеличение проводимости, рост температуры и т.д.).

В случае отсутствия кислорода и при наличии повышенной температуры процесс окисления идет до образования углерода, при этом объем образующихся газов в 2 раза меньше



Количество выделенного газа влияет на масштабы механического разрушения изоляции, а количество образующегося углерода в несколько раз повышает проводимость масла.

Термодинамический расчет процесса окисления. Рассчитаем, какое окисление целлюлозы термодинамически более вероятно, до углерода или до полного окисления. В случае полного окисления глюкозы [14.]



значения энтальпий образования веществ, участвующих в реакции, соответственно равны [1]: -1274,5 кДж/моль, 0 кДж/моль, -393,51 кДж/моль, -241,84 кДж/моль. Из 2-го следствия закона Гесса:

$$\Delta H = \sum n_{пр} \Delta H_{298}^{\circ} \text{обр.прод.} - \sum n_{исх} \Delta H_{298}^{\circ} \text{обр.исх.}$$

где $n_{пр}$, $n_{исх}$ – стехиометрические коэффициенты продуктов реакции и исходных веществ, находим изменение энтальпии в ходе этого процесса, оно равно -2537,6 кДж.

Значения энтропий для участников реакции записываются с такими значениями [15]: 212 Дж/мольК, 205,03 Дж/мольК, 213,8 Дж/мольК, 188,74 Дж/мольК.

Расчет энтропии химического процесса произведем по формуле:

$$\Delta S = \sum n_{пр} \Delta S_{298}^{\circ} \text{обр.прод.} - \sum n_{исх} \Delta S_{298}^{\circ} \text{обр.исх.}$$

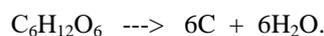
Изменение энтропии химической реакции равно 923,06 Дж/К.

Изменение изобарно-изотермического потенциала вычисляем по формуле:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S.$$

Подставим вычисленные значения термодинамических величин, температуру примем равной (393)К, получим значение $\Delta G_1 = -2928.1$ кДж.

Проведем аналогичные вычисления для реакции неполного окисления глюкозы:



Получим изменение энтальпии этого процесса, равное -176,54 кДж, изменение энтропии равно 954,88 Дж/К, изменение изобарно-изотермического потенциала получим равным $\Delta G_2 = -580.45$ кДж.

Сравнив полученные значения ΔG_1 и ΔG_2 изобарно-изотермических потенциалов (энергии Гиббса) этих процессов, делаем вывод: так как значение изобарно-изотермического потенциала процесса полного окисления глюкозы приблизительно в пять раз меньше изобарно-изотермического потенциала реакции с образованием углерода, как продукта неполного окисления глюкозы, то первый процесс более вероятен и с позиции термодинамики более выгоден.

Следовательно, при длительной эксплуатации в изоляционных материалах наиболее вероятным будет процесс полного окисления глюкозы (целлюлозы), с образованием большого объема газов, которые будут способны механически разрывать изоляционные слои. В свою очередь, такое механическое нарушение целостности изоляции приведет к увеличению поверхности соприкасающихся слоев, что в геометрической прогрессии увеличит адсорбцию влаги и других частиц на поверхности изоляции и значительно уменьшит срок эксплуатации кабеля в целом. Ослабление механических свойств неизбежно приведет к отказу кабеля при коротких замыканиях.

Расчеты показывают, что деградация бумаги в основном проходит в сторону ухудшения механических свойств, электрические свойства меняются незначительно.

Экспериментальные исследования. Для выявления параметра, определяющего старение изоляционного материала, исследуемые образцы кабеля искусственно состаривались при одной и той же температуре, но при различном времени выдержки в термошкафу. Образец №1 был выдержан в термошкафу в течение 8 часов, образец №2 – выдержан в течение 16 часов, а образец №3 – 24 часа, табл. 1.

Таблица 1

Контрольная выборка состаренных образцов СКЛ

№ кабеля	Ток жилы кабеля, А	Время старения t, час	Средняя температура (эксперимент), t°C	Средняя температура (прогноз), t°C	Δt _{экс} /Δt _{прог} t°C	Ошибка прогнозируемой температуры,		
						t°C	%	
1 этап – новый кабель	1	480	–	33,971	34,3241	–	-0,354	1,02
	2	480	–	40,345	40,9571	–	-0,613	1,53
	3	470	–	38,28	39,6024	–	-1,323	3,34
2 этап – состаренный кабель	1	480	8	35,655	38,6252	1,68 / 4,37	-2,967	3,36
	2	480	16	42,595	44,3758	2,25 / 3,42	1,543	4,52
	3	470	24	41,435	43,4345	3,16 / 3,84	1,953	4,85

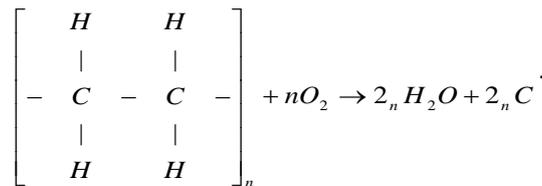
Результаты анализа показали, что чем больше время состаривания, тем больше разность температур между исходным и состаренным образцом. С увеличением времени старения кабеля растет разница температур. Сравнение экспериментальных и прогнозных данных по новым и искусственно состаренным образцам кабеля приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение параметров

Параметр	№ образца кабеля			Средняя разность температур	
	1 кабель	3 кабель	4 кабель		
Разность температур, Δt	Не состаренного	1.73	2.8	2.3	35,655 - 33,971 = 1,68 42,595 - 40,345 = 2,25 41,435 - 35,655 = 5,78 U _{max} = 39,895; U _{min} = 37,532 Разность = 3, 28 или 8,22%
	Состаренный	1.2	1.46	1.6	
Ошибка, %	Не с остаренного	4.2%	5.2%	3.8%	
	Состаренный	3.8%	2.3%	3.1%	

Мы полагаем [3], что это объясняется потерей электроизоляционных свойств материала за счет накопления фрагментов разрушенной структуры, содержащей, все в большем количестве, включения чистого углерода и других токопроводящих включений. Реакция неполного окисления полиэтилена с образованием углерода:



Таким образом, выявлена и исследована зависимость увеличения разности температур ΔT от степени износа (старения) электроизоляционных свойств материала, что позволяет прогнозировать его ресурс.

Термофлуктуационная теория разрушения электрической изоляции. Рассмотрим термофлуктуационную теорию разрушения электрической изоляции силовых кабелей [15, 16].

Воспользуемся описанной С.С. Марьиным [18], теорией прочности твердых тел согласно которой для оценки дефектности (λ) основной изоляции СКЛ. Число сквозных дефектов на единицу длины изоляции использовалось выражение [18].

$$\lambda = -\frac{1}{l_{\text{исп}}} \ln(1 - q_i), q_i = \frac{n_i}{n}, \quad (1)$$

где $l_{\text{исп}}$ – длина испытываемой части образца мм, q_i – вероятность появления сквозного дефекта (трещины) на единицу длины; n_i – число образцов, пробившихся напряжением, меньшим или равным испытательному напряжению; n – общее количество испытанных образцов.

Значение q из (1) в соответствии с термофлуктуационной теорией прочности представляет собой значение вероятности разрыва химических связей. Появление дефектов (трещин) в изоляции СКЛ обусловлено действующими факторами на изоляцию (тепловые и механические нагрузки). Согласно термофлуктуационной теории разрушения твердого тела, первой фазой разрушения материалов принято считать появление трещин на микроуровне (субмикротрещин), вызванное термофлуктуационным разрывом химических связей. Анализ результатов исследований позволяет математически описать вероятностную модель процесса образования микротрещин в полимерных материалах при их тепловом старении и одновременном воздействии на них механических нагрузок, а долговечность определить по выражению, предложенным Журковым:

$$\tau = A \cdot \exp(-\alpha\sigma) = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (5)$$

где τ_0 – период тепловых колебаний молекул ($\approx 10^{13}$ с) время ожидания распада одной связи; γ – структурная постоянная, характерная для данного материала; σ – напряжения, действующие на материал; k – постоянная Больцмана. U – начальная энергия активации процесса разрушения; T – температура окружающей среды. E_a – энергия активации процесса разрушения.

Оценивая вероятность разрыва химических связей в полимере, обычно принимают во внимание только углерод – углеродную связь (C–C). В действительности первопричиной образования субмикротрещины может служить разрыв любой химической связи, имеющийся в полимерном веществе [17]. Оценки долговечности электрической изоляции по формуле (5) [18], учитывает образования субмикротрещин, обусловленное разрывом любой химической связи в полимерном материале. Поэтому, в качестве энергетической характеристики процесса разрыва сплошности полимера можно использовать среднюю энергию мономерного звена:

$$E_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i E_{oi}}{n_o}, \quad (6)$$

где n_i – число химических связей i - типа; E_{oi} – энергия химической связи i -типа; n_o – общее число химических связей в мономерном звене.

Однако, в полимере имеются и межмолекулярные связи, энергия которых намного ниже, чем у химических. На первый взгляд, кажется, что образование трещины пойдет по межмолекулярным связям. Однако, отвержденный пропиоточный состав является сшитой структурой, а в этом случае роль межмолеку-

лярного взаимодействия на процесс образования субмикротрещин минимальна. Поэтому вероятность механического разрушения полимера в условиях термо-механических воздействий описывается выражением:

$$P = \exp\left(-\frac{E_{cp}-\gamma\delta}{kT}\right), \quad (7)$$

E_{cp} – средняя энергия мономерного звена.

В целом разрушение полимерного материала носит вероятностный характер и зависит от его структурных особенностей и механических нагрузок, действующих на него, а вероятность появления дефектов (трещин) в основной изоляции может быть описана экспоненциальным законом типа (7). Тогда долговечность изоляции можно оценивать в свете термofлуктационной теории Журкова, заменив в выражении (5) величину энергии активации процесса разрушения (Ua) величиной средней энергии мономерного звена E_{cp} (U_{cp}), так как данная характеристика определяет усредненную величину процесса разрыва химической связи в веществе. В этом случае окончательная формула для расчета долговечности основной изоляции СКЛ примет вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{E_{cp}-\gamma\sigma}{RT}\right). \quad (8)$$

В выражении (8) присутствуют три величины характеризующие прочность изоляции, это γ – структурно-чувствительный коэффициент, σ – напряжения, действующие на материал [27] и U_{cp} – средняя энергия мономерного звена изоляционного материала, R – универсальная газовая постоянная = 8,31 Дж/моль • град. Основным компонентом бумажно масляной изоляции (БМИ) является целлюлоза, мономером которой служит молекула глюкозы, рис. 4. Значение средней энергии мономерного звена выражается формулой (6). Химическая формула мономерного звена мономера звена целлюлозы представлена на рис. 4.

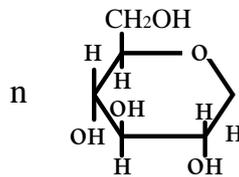


Рис. 4. Структурная формула мономера звена целлюлозы

В структуру мономерного звена входит четыре группы химических связей, это связи: С – Н (7 связей); С - О (7 связей); О - Н (5 связей); С - С (5 связей), общее количество химических связей в мономерном звене равно двадцати четырем. Используя значения энергий этих связей (U_0) (табл. 3) и выражение (6) рассчитаем среднюю энергию мономерного звена. Так для С – Н $E_0 = 128$ ккал/моль, С – О $E_0 = 79,58$ ккал/моль, О – Н $E_0 = 109,25$ ккал/моль, С – С $E_0 = 80,5$ ккал/моль.

Таблица 3

Значения энергий связи, ккал/моль E_{cp}

Вид связи	С – Н	С – О	О – Н	С – С
Энергия связи, E_0 Эв	128	79,58	109,25	80,5

Используя выражение (6), рассчитаем среднюю энергию мономерного звена целлюлозы (рис. 4):

$$E_{\text{ср}} = \frac{128 * 7 + 79,58 * 7 + 109,25 * 5 + 80,5 * 5}{24} = 100,08 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$$

Результаты расчета сведем в табл. 3.

Таблица 3

Средняя энергия мономера звена глюкозы

Связи в мономере			Энергия		
Тип связи	Количество	Энергия одной связи	Суммарная средняя энергия мономера, ЭВ	Средняя энергия звена мономера, ЭВ	Средняя энергия мономерного звена, ккал/моль
C – H	7	4,37			
C – O	7	3,46			
O – H	5	4,75			
C – C	5	3,6	96,56	4,02	91,36

Таким образом, для расчета средней энергии мономерного звена различных полимерных материалах необходимо знать: химическую формулу мономерного звена и значения энергий связи. Значения энергий химических связей U_0 для изоляционного материала исследуемого кабеля представлены в табл. 3.

Как отмечено [18] на основную изоляцию СКЛ действуют как внешние ($\sigma_{\text{внеш}}$), так и внутренние механические нагрузки ($\sigma_{\text{вн}}$). К основной внешней механической нагрузке, оказывающей действие на изоляцию, относятся вибрации [20–23]. Внутренние механические напряжения возникшие из-за физических и химических изменений (усадка, взаимодействие реакционно-способных групп, окислительно-полимеризационные процессы), постоянно растут. Таким образом из-за гетерогенности структуры ($\sigma_{\text{вн}}$) возрастает напряжение действующее на изоляционный материал (σ) и его разрушение (8). Внутренние механические напряжения на процесс разрушения изоляции оказывают большее влияние, чем внешние нагрузки.

В термофлуктуационной теории разрушения материалов [24], по Журкову коэффициент γ рассматривается, как прочностная характеристика материала, зависящая от его структурных особенностей. Использование тарировочной зависимости $\gamma = f(U_{\text{ср}})$, рис. 5 [работы Журкова С.Н., Регеля В.Р., Слуцкера А.И., Цоя Б.] позволяет найти параметр γ практически для любых пропиточных составов.

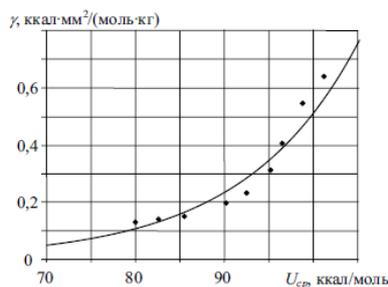


Рис. 5. Зависимость коэффициента γ от средней энергии мономерного звена для полимерных материалов

Таким образом, для определения величины γ исследуемого материала, необходимо рассчитать значения средней энергии мономерного звена (рис. 4) и по тарировочной кривой, представленной на рис. 5, определить величину коэффициента γ .

Определив величины $U_{ср}$, γ , и на основании выражения (8) построим зависимость долговечности изоляционного материала СКЛ (τ), от температуры при различной степени усталости изоляционного материала σ .

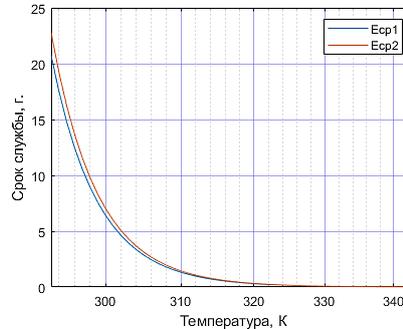


Рис. 6. Зависимость срока службы изоляции от температуры

Заключение. Приведены термодинамические расчеты процессов окисления целлюлозы с возможностью определения наиболее вероятного. Определено, что основными компонентами, разрушающими изоляцию, являются не углерод, как предполагается в [14], (хотя его образование в реальных системах не исключено), а газы, образующиеся при полном окислении. Результаты выполненных исследований позволяют более детально представить предпосылки к развитию ЧР в изоляционном материале и определить необходимые мероприятия по минимизации процессов, приводящих к деструкции основной изоляции кабелей. Показано, что основным воздействующим фактором, вызывающим деструкцию и пробой электроизоляции КЛ, являются термофлуктуационные процессы, возникающие при протекании тока проводимости, и развитие диэлектрических потерь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Полуянович Н.К.* Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Сер. учебники для вузов. Специальная литература. – 3-е изд. стереотипное. – СПб., 2017.
2. *Полуянович Н.К.* Энергетическая электроника: пособие по решению задач и методические указания. – Таганрог: ТРТУ, 2001.
3. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.
4. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable // Proceedings of XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM 2012. – 2012. – P. 418-422.
5. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихонов 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.
6. *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.
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., 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. 2. Сер. "2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies, AMRMT 2017". – 2017. – P. 012036.

9. *Сажин Б.И., Лобанов А.М., Романовская О.С.* Электрические свойства полимеров. – Л.: Химия, 1986. – 224 с.
10. *Макаров Е.В.* Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – М.: Папирус Про, 2004. – Т. 3. – 688 с.
11. *Полюянович Н.К., Дубяго М.Н.* Анализ характеристик и исследование теплового пробоя изоляционных материалов, вызванного частичными разрядами // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 157-174.
12. *Бартнев Г.М.* Физика и механика полимеров. – <https://www.ngpedia.ru/id508345p1.html>.
13. *Дубяго М.Н.* Исследование характеристик частичных разрядов в электрической изоляции систем электроснабжения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11. – С. 201-207.
14. Седьмое издание: «Краткий справочник физико-химических величин» / под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
15. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system // 2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013), Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 448-453. – P. 2455-2460.
16. *Prime J.B., Valdes J.G.* Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. PAS-100. – No. 1. – P. 211-219.
17. *Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M.* Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, No. 3. – P. 619-626.
18. *Марьин С.С.* Разработка метода оценки долговечности изоляции низковольтных электрических машин: автореф. дисс. – Томск, 2007.
19. *Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В.* Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. – 496 с.
20. *Mazzanti G.* The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – August 2009. – Vol. 16, No. 4. – P. 1168-1179. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=5211872&isnumber=5211830>. – DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211872.
21. *Mazzanti G.* Analysis of the Combined Effects of Load Cycling, Thermal Transients, and Electrothermal Stress on Life Expectancy of High-Voltage AC Cables // in IEEE Transactions on Power Delivery. – Oct. 2007. – Vol. 22, No. 4. – P. 2000-2009. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4302537&isnumber=4302501>. – DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905547.
22. *Crine J.P.* On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics // in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – Dec. 2005. – Vol. 12, No. 6. – P. 1089-1107. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=1561789&isnumber=33159>. – DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.
23. *Parpal J.L., Crine, Chinh Dang J.P.* Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model // in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – Apr. 1997. – Vol. 4, No. 2. – P. 197-209. – DOI: 10.1109/94.595247. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=595247&isnumber=13036>.
24. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Burkov D.V.* Estimation of partial discharge energy in a mathematical model of thermal fluctuation processes of a power cable. – Ufa: Publishing complex USATU, 2019. – 642 p.
25. *Полюянович Н.К., Дубяго М.Н.* Анализ и выбор методики в решении задач интеллектуализации систем прогнозирования термофлуктуационных процессов в кабельных сетях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – С. 52-66.
26. *Dubyago Marina N., Poluyanovich Irina A., Poluyanovich Nikolay K.* Thermodynamic Approach for Identifying oxidative processes insulation breakdown // Applied Mechanics and Materials. – April 2015. – Vol. 752-753. – P. 1153-1157.
27. Структурно-энергетическая теория прочности. – <http://energydurability.com/index.php/theory-ru/basic-article-ru/2019-02-06-11-02-19/basic-article-ch1-ru>.

REFERENCE

1. *Poluyanovich N.K.* Montazh, naladka, ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Ser. uchebniki dlya vuzov. Spetsial'naya literatura [Installation, commissioning, operation and repair of power supply systems of industrial enterprises. Ser. Textbooks for universities. Special literature]. 3rd ed. Saint Petersburg, 2017.
2. *Poluyanovich N.K.* Energeticheskaya elektronika: posobie po resheniyu zadach i metodicheskie ukazaniya [Power electronics. Manual on problem solving and methodological guidelines]. Taganrog: TRTU, 2001.
3. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improvement of methods of diagnostics and forecasting of electrical insulation materials of power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
4. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable, *Proceedings of XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements SAUM 2012*, 2012, pp. 418-422.
5. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh.* Metod issledovaniya termofluktuatsionnykh protsessov v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya izolyatsionnykh materialov [Method of investigation of 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.
6. *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.
7. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Termodinamicheskiy sposob vyyavleniya destruktivnoy izolyatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya resursa kabel'nykh sistem [Thermodynamic method for detecting insulation destruction in problems of diagnostics and forecasting of cable systems resource], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017, No. 3 (46), pp. 25.
8. *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. 2. Ser. "2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies, AMRMT 2017"*, 2017, pp. 012036.
9. *Sazhin B.I., Lobanov A.M., Romanovskaya O.S.* Elektricheskie svoystva polimerov [Electrical properties of polymers]. Leningrad: Khimiya, 1986, 224 p.
10. *Makarov E.V.* Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV [Handbook of electric power grids of 0.4–35 kV and 110-1150 kV], ed. by I.T. Goryunova, A.A. Lyubimova. Moscow: Papirus Pro, 2004, Vol. 3, 688 p.
11. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Analiz kharakteristik i issledovanie teplovogo proboya izolyatsionnykh materialov, vyzvannogo chastichnymi razryadami [Analysis of the characteristics and investigation of the thermal breakdown of insulating materials, caused by partial discharges], *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of NSTU], 2018, No. 2 (71), pp. 157-174.
12. *Bartneev G.M.* Fizika i mekhanika polimerov [Physics and mechanics of polymers]. Available at: <https://www.ngpedia.ru/id508345p1.html>.
13. *Dubyago M.N.* Issledovanie kharakteristik chastichnykh razryadov v elektricheskoy izolyatsii sistem elektrosnabzheniya [Study of the characteristics of partial discharges in electrical insulation systems of power], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11, pp. 201-207.
14. Sed'moe izdanie: «Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin» [The seventh edition of "a Concise Handbook of physical-chemical values"], ed. by K.P. Mishchenko i A.A. Ravdelya. Leningrad: Khimiya, 1974, 200 p.
15. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system, *2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013), Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 448-453, pp. 2455-2460.
16. *Prime J.B., Valdes J.G.* Systems to Monitor the Conductor Temperature of Underground Cable, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 211-219.

17. Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 619-626.
18. Mar'in S.S. Razrabotka metoda otsenki dolgovechnosti izolyatsii nizkovol'tnykh elektricheskikh mashin: avtoref. diss. [Development of a method to assess the durability of the insulation of low-voltage electrical machines: abstract of the dissertation]. Tomsk, 2007.
19. Tsoy B., Kartashov E.M., Shevelev V.V. Prochnost' i razrushenie polimernykh plenok i volokon [Strength and destruction of polymer films and fibers]. Moscow: Khimiya, 1999, 496 p.
20. Mazzanti G. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, August 2009, Vol. 16, No. 4, pp. 1168-1179. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5211872&isnumber=5211830>. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211872.
21. Mazzanti G. Analysis of the Combined Effects of Load Cycling, Thermal Transients, and Electrothermal Stress on Life Expectancy of High-Voltage AC Cables, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oct. 2007, Vol. 22, No. 4, pp. 2000-2009. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4302537&isnumber=4302501>. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905547.
22. Crine J.P. On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Dec. 2005, Vol. 12, No. 6, pp. 1089-1107. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1561789&isnumber=33159>. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.
23. Parpal J.L., Crine, Chinh Dang J.P. Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Apr. 1997, Vol. 4, No. 2, pp. 197-209. DOI: 10.1109/94.595247. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=595247&isnumber=13036>.
24. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Burkov D.V. Estimation of partial discharge energy in a mathematical model of thermal fluctuation processes of a power cable. Ufa: Publishing complex USATU, 2019, 642 p.
25. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Analiz i vybor metodiki v reshenii zadach intellektualizatsii sistem prognozirovaniya termoflukuatsionnykh protsessov v kabel'nykh setyakh [Analysis and choice of methodology in solving problems of intellectualization of forecasting systems of thermal fluctuation processes in cable networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 52-66.
26. Dubyago Marina N., Poluyanovich Irina A., Poluyanovich Nikolay K. Thermodynamic Approach for Identifying oxidative processes insulation breakdown, *Applied Mechanics and Materials*, April 2015, Vol. 752-753, pp. 1153-1157.
27. Strukturno-energeticheskaya teoriya prochnosti [Structural-energy theory of strength]. Available at: <http://energydurability.com/index.php/theory-ru/basic-article-ru/2019-02-06-11-02-19/basic-article-ch1-ru>.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент М.Г. Левина.

Полюянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

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

Бурьков Дмитрий Владимирович – e-mail: bdv-76@yandex.ru; тел.: 89381015215; кафедра электротехники и мехатроники.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, 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.

Burkov Dmitry Vladimirovich – e-mail: bdv-76@yandex.ru; phone: +79381015215; the department of electrical engineering and mechatronics.