

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 64, № 2 (2021), с. 121–129
Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 64, No 2 (2021), pp. 121–129 121

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-121-129>

УДК 621.316

Старение изоляции из сшитого полиэтилена кабельных линий

И. В. Олексюк¹⁾

¹⁾УП «БЕЛКОММУНПРОЕКТ» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В электрических сетях с номинальным напряжением 10 кВ при реконструкции существующих и сооружении новых промышленных предприятий предпочтение отдается кабельным линиям с изоляцией из сшитого полиэтилена. Нормативный срок службы таких кабелей составляет не менее 30 лет (при соблюдении условий хранения, транспортировки, монтажа и эксплуатации), а фактический определяется техническим состоянием кабеля. Ресурс кабельной линии зависит от состояния ее изоляции, старение которой происходит под действием нескольких факторов. Условно все факторы, влияющие в той или иной степени на ресурс изоляции кабелей, можно разделить на тепловые, электромагнитные, климатические, механические и эксплуатационные. Наиболее существенной причиной старения изоляции является высокая температура, ускоряющая реакцию термоокислительной деструкции, в ходе которой распадаются высокомолекулярные соединения полимеров. Поскольку в действительности кабели эксплуатируются при температурах, значения которых ниже длительно допустимых, следовательно, старение изоляции происходит медленнее и фактический срок службы больше нормативного. В настоящее время состояние изоляции контролируется с применением испытаний повышенным напряжением, относящихся к методам разрушающего контроля. При проектировании и эксплуатации кабельных линий необходимо оценивать продолжительность фактического срока службы в различных условиях работы. В теории существует несколько выражений для расчета срока службы кабельной линии при воздействии температуры, влажности, электрического поля и агрессивных сред, однако все они неприменимы на практике из-за большого числа коэффициентов, значения которых неизвестны. В статье представлено полученное автором аналитическое выражение для определения срока службы силовых электрических кабелей, учитывающее старение изоляции под действием температуры и электрического поля.

Ключевые слова: термоокислительная деструкция, силовой электрический кабель, сшитый полиэтилен, изоляция

Для цитирования: Олексюк, И. В. Старение изоляции из сшитого полиэтилена кабельных линий / И. В. Олексюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 2. С. 121–129. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-121-129>

Aging of Cross-Linked Polyethylene Insulation Cable Lines

I. V. Oleksyuk¹⁾

¹⁾UE “BELKOMMUNPROEKT” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Preference is given to cable lines with cross-linked polyethylene insulation in electrical networks with a nominal voltage of 10 kV during reconstruction of existing and construction

Адрес для переписки

Олексюк Илья Витальевич
УП «БЕЛКОММУНПРОЕКТ»
ул. Некрасова, 5,
220040, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 336-07-01
ilya.oleks@gmail.com

Address for correspondence

Oleksyuk Ilya V.
UE “BELKOMMUNPROEKT”
5, Nekrasova str.,
220040, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 336-07-01
ilya.oleks@gmail.com

of new industrial enterprises. The standard service life of such cables is at least 30 years (subject to the conditions of storage, transportation, installation and operation), and the actual one is determined by the technical condition of the cable. The service life of a cable line depends on the state of its insulation, the aging of which occurs under the influence of several factors. Conventionally, all factors influencing one or another degree on the cable insulation resource can be divided into thermal, electromagnetic, climatic, mechanical and operational. The most significant reason for the insulation aging is high temperature, which accelerates the reaction of thermo-oxidative destruction, during which high-molecular polymer compounds decompose. In fact, cables are operated at temperatures below the long-term permissible values, and, therefore, the aging of the insulation is slower, and the actual service life will be longer than the standard. At present, condition of the insulation is monitored with the use of high voltage tests related to destructive testing methods. When designing and operating cable lines, it is necessary to estimate the duration of the actual service life under various operating conditions. In theory, there are several expressions for calculating the service life of a cable line when exposed to temperature, humidity, electric field and aggressive environments, but all of them are not applicable in practice due to the presence of a large number of coefficients whose values are unknown. The paper presents an analytical expression obtained for determining the service life of power electric cables, taking into account the aging of the insulation under the influence of temperature and electric field.

Keywords: thermo-oxidative destruction, electric power cable, cross-linked polyethylene, insulation

For citation: Oleksyuk I. V. (2021) Aging of Cross-Linked Polyethylene Insulation Cable Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (2), 121–129. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-121-129> (in Russian)

Введение

В Республике Беларусь растет потребление кабельной продукции с пластмассовой изоляцией. В электрических сетях с номинальным напряжением 10 кВ при реконструкции существующих и сооружении новых промышленных предприятий предпочтение отдается кабельным линиям с изоляцией из сшитого полиэтилена, эффективность применения которых доказана [1, 2]. Согласно [3], нормативный срок службы таких кабелей составляет не менее 30 лет (при соблюдении условий хранения, транспортировки, монтажа и эксплуатации), но фактический определяется техническим состоянием кабеля. Ресурс кабельной линии (КЛ) определяется состоянием ее изоляции. При эксплуатации КЛ с температурой токопроводящих жил, равной длительно допустимой, при средней напряженности электрического поля в изоляции, с перегрузками, длительность и значения которых не превышают нормативных, ресурс изоляции в конце нормативного срока будет близок к нулю. В действительности кабельные линии эксплуатируются при температурах, значения которых ниже длительно допустимых, следовательно старение изоляции происходит медленнее и фактический срок службы больше нормативного.

В настоящее время состояние изоляции КЛ контролируется с применением испытаний повышенным напряжением (метод разрушающего контроля).

При проектировании и эксплуатации кабельных линий необходимо оценивать продолжительность их фактического срока службы при различных условиях работы. В теории существует несколько выражений для расчета срока эксплуатации с учетом воздействия температуры, влажности, электрического поля и агрессивных сред, однако все они неприменимы на практике из-за большого числа коэффициентов, значения которых неизвестны.

Цель данной статьи – получение аналитического выражения для определения срока службы кабельных линий при совместном действии температуры и электрического поля.

Условно все факторы, влияющие в той или иной степени на ресурс изоляции кабелей, можно разделить на тепловые, электромагнитные, климатические, механические и эксплуатационные. Выделить степень влияния каждого из них на старение изоляции достаточно сложно, это требует не только составления аналитических выражений, но и проведения экспериментальных исследований, в том числе и на основе статистических данных. К тому же силовые кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена применяются относительно недавно, большинство из них еще не отработали нормативный срок эксплуатации.

Существенной причиной старения изоляции является высокая температура, ускоряющая реакцию термоокислительной деструкции, в ходе которой распадаются высокомолекулярные соединения полимеров. Повышение температуры ускоряет протекание химических реакций, в том числе при воздействии на диэлектрик возникающих в результате частичных разрядов продуктов либо реакций микрорадикалов с кислородом газовой среды или другими активными веществами, образовавшимися под действием частичных разрядов. Скорость протекания этих процессов определяется кинетикой химических реакций [4].

Следует отметить, что кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена выдерживают нормативную кратковременную перегрузку. Допустимая температура нагрева жил в режиме перегрузки составляет 130 °С [5] при продолжительности работы кабельной линии в этом режиме не более восьми часов в сутки и 1000 часов за весь срок службы.

Зависимость скорости реакции от температуры подчиняется закону Аррениуса [4]:

$$K_t = K_0 e^{-\frac{W_a}{kT}}, \quad (1)$$

где K_0 – постоянная, зависящая от структуры вещества; W_a – энергия активации в расчете на одну молекулу; k – постоянная Больцмана ($k = 1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – абсолютная температура.

Из (1) с учетом начальных условий (при $t = 0$, $N_t = N_0$) получаем

$$N_t = N_0 e^{-K_t t}, \quad (2)$$

где N_0 – начальное число молекул данного вещества; N_t – число этих молекул через промежуток времени t .

Процесс старения носит экспоненциальный характер, что успешно доказано в [6]. Ресурсы τ_{p1} , τ_{p2} изоляции при температурах T_1 , T_2 соответственно связаны соотношением [4]

$$\tau_{p1} e^{-W_a/(kT_1)} = \tau_{p2} e^{-W_a/(kT_2)}. \quad (3)$$

По формуле (3) определим отношение ресурсов изоляции из сшитого полиэтилена при температурах 90 и 130 °С

$$\frac{\tau_{p(90)}}{\tau_{p(130)}} = e^{\frac{104000}{8,31} \left(\frac{1}{273+90} - \frac{1}{273+130} \right)} = 30,543.$$

Таким образом, при 130 °С реакция термоокислительной деструкции в полиэтиленовой изоляции протекает в 30,543 раза быстрее, чем при 90 °С.

Нормативный срок службы кабеля составляет 262800 ч. Учитывая, что при перегрузке КЛ изоляция из сшитого полиэтилена подвергается воздействию повышенной температуры (130 °С), срок службы кабеля (приведенный к 90 °С) должен быть не менее 292343 ч, или 33,37 года.

Номинальная толщина изоляции кабеля на напряжение 10 кВ составляет 3,4 мм. Электрическая прочность полиэтилена 30–60 кВ/мм [7]. Испытания кабелей повышенным напряжением предполагают воздействие на изоляцию напряжения, в три-шесть раз выше номинального. Успешным считается испытание, в ходе которого не произошло электрического пробоя изоляции. Для кабелей на напряжение 10 кВ максимальное значение приложенного напряжения 60 кВ.

Для определения износа изоляции кабеля под воздействием реакции термоокислительной деструкции следует решить, что считать за 100%-й износ изоляции кабеля и, следовательно, ресурс изоляции, равный нулю. Рассмотрим два варианта оценки. Так, в качестве 100%-го износа может приниматься состояние изоляции кабеля, у которого в ходе реакции термоокислительной деструкции количество молекул, достаточное для электрического пробоя, распалось под действием: 1) рабочего напряжения; 2) испытательного напряжения.

Электрические кабели 6–10 кВ эксплуатируются, как правило, в сетях с изолированной нейтралью, для которых характерна работа в аварийном режиме в течение нескольких часов с одной заземленной фазой. Треугольник линейных напряжений при этом сохраняется, а для кабельных линий с группой одножильных кабелей или кабелями с пофазно экранированными жилами приложенное к изоляции напряжение вырастает до линейного значения. Для расчетов примем среднее значение электрической прочности полиэтилена 45 кВ/мм; электрическая прочность изоляции (номинальной толщины) кабеля на напряжение 10 кВ составит 153 кВ. Тепловое старение изоляции происходит неравномерно по толщине изоляции из-за неравенства температур: быстрее у поверхности жилы и медленнее у внешней поверхности изоляции. В большинстве случаев термическое разрушение, приводящее к выходу из строя изделия, возникает при определенном соотношении $N_i/N_0 = c_1$, где c_1 – коэффициент, показывающий

относительное количество неразрушенных молекул изоляции. Электрическая прочность изоляции кабеля напрямую связана с количеством нераспавшихся молекул, поэтому коэффициент $c_1 = \frac{10}{153} = 0,0654$.

Для случая, когда за 100%-й износ изоляции принимается электрический пробой под действием испытательного напряжения: $c_1 = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 153} = 0,2267$.

Как уже отмечали, срок службы кабеля определяется в основном старением изоляции. Рассмотрим вышеизложенную теорию применительно к кабелям с пластмассовой изоляцией. Кабельная продукция с изоляцией из сшитого полиэтилена работает 30 лет при температуре 90 °С, т. е. можно предположить, что если по кабелю на протяжении всего срока эксплуатации протекает ток, значение которого равно длительному допустимому для соответствующего сечения токопроводящих жил, то по истечении 30 лет ресурс изоляции будет полностью исчерпан.

График Аррениуса для процесса термической деструкции сшитого полиэтилена представлен на рис. 1 [8].

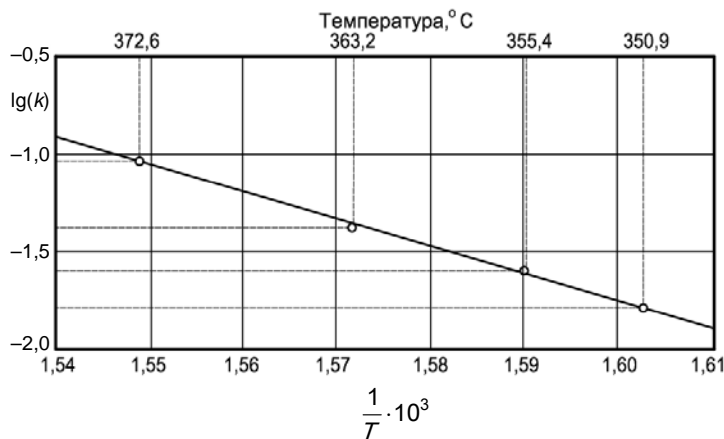


Рис. 1. График Аррениуса для процесса термической деструкции сшитого полиэтилена

Fig. 1. Arrhenius plot for thermal destruction process of cross-linked polyethylene

Срок службы изоляции при этом составит, лет:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln(c_1)}{-K_t(T) \cdot 8760 \cdot 3600} \quad (4)$$

Предположим, что износ изоляции определяется не остаточным количеством нераспавшихся молекул, а увеличением вероятности пробоя. В [9] для определения срока службы изоляции предложена модель, согласно которой достаточно пробить 10 % молекул, чтобы произошел электри-

ческий пробой в кабеле. В этом случае $c_1 = 0,9$, а срок службы изоляции составит 208,03 и 8,66 года при длительном воздействии температур 90 и 130 °С соответственно.

Представим модель пробоя изоляции, в которой помимо радиальной составляющей траектории пробоя присутствует тангенциальная (модель пробоя в объеме изоляции кабеля). Так, если пробито менее 35,5 % молекул – вероятность пробоя в кабеле менее 1 %; если более 35,5 % – вероятность пробоя в кабеле резко возрастает [10]. Тогда $c_1 = 0,645$, а срок службы изоляции составит 865,82 и 36,04 года при длительном воздействии температур 90 и 130 °С соответственно.

Возьмем две точки, лежащие на прямой (рис. 1), с координатами (1,548765; -1,04) и (1,602821; -1,789). Выполнив преобразования, получим

$$K_t(T) = e^{26,4542 - \frac{18658}{T}}. \quad (5)$$

Номинальное напряжение изоляции кабеля из сшитого полиэтилена должно соответствовать эксплуатационному режиму в системе, в которой он используется, причем может быть выше номинального напряжения сети. Для облегчения выбора номинального напряжения изоляции кабеля все системы подразделяют на три категории [11]:

А, в которых любой фазный проводник, приходящий в соприкосновение с землей или заземленным проводником, отключается от системы за время менее 1 мин;

Б, которые непрерывно в течение восьми часов могут эксплуатироваться с одной заземленной фазой; общая продолжительность замыканий на землю не должна превышать 125 ч в год;

В – все остальные системы.

Проблема определения остаточного ресурса изоляции актуальна не только для силовых электрических кабелей, но и для электрических машин, конденсаторов и других высоковольтных установок.

Проводя аналогию с электрическими машинами, совокупное влияние температуры, влажности и агрессивных сред на срок службы изоляции кабелей можно оценить по следующему уравнению [12]:

$$\tau_p = Ae^{-B/T} C^{-m} \eta^{-n}, \quad (6)$$

где C – концентрация агрессивного агента; η – относительная влажность; B, m, n – коэффициенты.

Помимо (6) (уравнение С. Н. Журкова [13]), для прогнозирования срока службы изоляции часто используется модель старения Г. С. Кучинского [4]:

$$\tau_p = AE^{-a} e^{-W_a/(kT)}, \quad (7)$$

где E – напряженность электрического поля; a – константа.

Представим силовой электрический кабель переменного тока с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ в виде конденсатора, где токопроводящая жила и металлическая оболочка (экран, броня) – это его обкладки, изоляция – слой диэлектрика между обкладками. Для силовых конденсаторов на переменном токе при определении их ресурса по формуле (7) используются значения $a = (5 \dots 9)$ [14].

Средняя напряженность электрического поля в изоляции кабеля определяется по формуле

$$E_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{p.max}}}{\sqrt{3}d_{\text{из.ном}}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{p.max}}$ – максимальное рабочее напряжение электрической сети, кВ; $d_{\text{из.ном}}$ – номинальная толщина изоляции электрического кабеля (для кабеля 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена $d_{\text{из.ном}} = 3,4$ мм [3]).

При номинальном напряжении электрической сети 10 кВ максимальное рабочее напряжение электрического кабеля составляет 12 кВ [15], средняя напряженность $E_{\text{cp}} = 2,038$ кВ/мм.

Подставим (5) в (4) и, выполнив преобразования, приведем полученное выражение к форме (7). Тогда при $c_1 = 0,645$ получим

$$\tau_p = 4,51 \cdot 10^{-20} E^{-n} e^{18658/T}. \quad (9)$$

Чтобы срок службы изоляции кабеля составлял не менее 33,37 года (с учетом нормированной перегрузки), значение коэффициента n должно быть 4,701. В результате получаем аналитическое выражение для расчета срока службы изоляции кабелей, учитывающее старение изоляции под действием температуры и электрического поля:

$$\tau_p = 4,51 \cdot 10^{-20} E^{-4,701} e^{18658/T}. \quad (10)$$

Таким образом, процессы старения изоляции поддерживают и активизируют друг друга. Разрушение изоляции происходит постепенно, а начало ему дается процессом теплового воздействия.

ВЫВОД

Получено аналитическое выражение для определения срока службы силовых электрических кабелей, учитывающее старение изоляции под действием температуры и электрического поля, позволяющее оценивать остаточный ресурс изоляции кабельных линий из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ, уменьшая затраты на их испытания и восстановление после применения методов разрушающего контроля (в случае пробоя

под воздействием испытательного напряжения). Предложенное автором выражение может использоваться при проектировании новых кабельных линий 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, при выполнении технико-экономических обоснований, а также при эксплуатации кабельных линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 1 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 417–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432>.
2. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 2 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 505–522. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522>.
3. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ. Технические условия [Электронный ресурс]: ТУ 16.К71-335–2004: введ. впервые 01.04.2004. Литера А. Режим доступа: <http://www.tvn-moscow.ru/study/vee/overvoltages-insulation-coordination/TU.16.K71-335-2004.pdf>.
4. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь; под общ. ред. Г. С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
5. Силовые кабельные линии напряжением 6–110 кВ. Нормы проектирования по прокладке кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена пероксидной сшивки: ТКП 611–2017 (33240). Введ. 02.10.2017. Минск: Минэнерго, 2017. 149 с.
6. Беспрозванных, А. В. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией / А. В. Беспрозванных, Е. С. Москвитин // Электротехника і електромеханіка. 2013. № 4. С. 32–36.
7. Никитин, К. И. Определение срока службы изоляции / К. И. Никитин, Д. А. Поляков // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 129–132.
8. Мадорский, С. Л. Термическое разложение органических полимеров / С. Л. Мадорский; пер. с англ. Д. Г. Вальковского, Я. С. Выгодского, С. П. Круковского; под ред. С. Р. Рафикова. М.: Мир, 1967. 328 с.
9. Определение скорости разрушения полиэтиленовой изоляции линий электропередачи под воздействием температуры / Д. А. Поляков [и др.] // Омский научный вестник. 2016. № 4. С. 105–108.
10. Поляков, Д. А. Математическая модель расчета остаточного ресурса сшитой полиэтиленовой изоляции кабелей / Д. А. Поляков // Омский научный вестник. 2017. № 4. С. 66–69.
11. Кабели силовые для стационарной прокладки. Общие технические условия: ГОСТ 24183–80. М.: Изд-во стандартов, 1989. 33 с.
12. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. М.: Высш. шк., 1988. 232 с.
13. Бартнев, Г. М. Физика полимеров / Г. М. Бартнев, С. Я. Френкель; под ред. А. М. Ельшевича. Л.: Химия, 1990. 432 с.
14. Кучинский, Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
15. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В: ГОСТ 721–77. Введ. СССР 01.07.1978. М.: Изд-во стандартов, 2002. 6 с.

REFERENCES

1. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 417–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432> (in Russian).
2. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 505–522. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522> (in Russian).
3. *Power Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation for a Voltage of 10, 20, 35 kV*. Technical Specifications. TU 16.K71-335–2004. Introduced for the First Time on 01.04.2004. Litera A. Available at: <http://www.tvn-moscow.ru/study/vee/overvoltages-insulation-coordination/TY.16.K71-335-2004.pdf> (in Russian).
4. Kuchinskii G. S., Kizevetter V. E., Pintal' Yu. S. (1987) *Isolation of High-Voltage Facilities*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 368 (in Russian).
5. TKP 611–2017 (33240) (2017) *Power Cable Lines with a Voltage of 6–110 kV. Design Standards for Laying Cables with Insulation Made of Cross-Linked Polyethylene of Peroxide Cross-Linking*. Minsk, Ministry of Energy Publ. 149 (in Russian).
6. Besprozvannykh A. V., Moskvitin E. S. (2013) Criteria for Assessing the Extent of Aging of Power Cables with Paper-Impregnated Insulation. *Elektrotehnika i Elektromekhanika = Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 32–36 (in Russian).
7. Nikitin K. I., Polyakov D. A. (2015) Determining the Service Life of Insulation. *Fundamental'nye Issledovaniya = Fundamental Research*, (3), 129–132 (in Russian).
8. Madorsky S. L. (1964) *Thermal Degradation of Organic Polymers*. Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc. 309.
9. Polyakov D. A., Yurchuk D. A., Koshchuk G. A., Nikitin K. I. (2016) Determination of the Rate of Temperature-Affected Destruction of Polyethylene Insulation of Power Transmission Lines. *Omskii Nauchnyi Vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, (4), 105–108 (in Russian).
10. Polyakov D. A. (2017) Mathematical Model for Calculating the Residual Life of Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation. *Omskii Nauchnyi Vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, (4), 66–69 (in Russian).
11. State Standard 24183–80 (1989) *Power Cables for Stationary Laying. General Technical Specifications*. Moscow, Publishing House of Standards. 33 (in Russian).
12. Kotelenets N. F., Kuznetsov N. L. (1988) *Testing and Reliability of Electric Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 232 (in Russian).
13. Bartenev G. M., Frenkel' S. Ya. (1990) *Polymer Physics*. Leningrad, Khimiya Publ. 432 (in Russian).
14. Kuchinskii G. S., Nazarov N. I. (1992) *Power Electrical Capacitors*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 320 (in Russian).
15. State Standard 721–77 (2002) *Power Supply Systems, Networks, Sources, Converters and Receivers of Electric Energy. Rated Voltage over 1000 V*. Moscow, Publishing House of Standards. 6 (in Russian).