

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНОЙ И ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В. В. Киселевич

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

EVALUATION OF RELIABILITY INDICATORS FOR POWER CABLES WITH PAPER AND POLYETHYLENE INSULATION

V. V. Kiselevich

Sukhoi State Technical University of Gomel

Аннотация. Предложено соотношение, описывающее зависимость параметра потока отказов силовых кабелей от времени их эксплуатации. Показана высокая степень соответствия между экспериментальными статистическими данными об удельной повреждаемости кабелей с полимерной изоляцией и расчётными временными зависимостями параметра потока отказов, отвечающими предложенному соотношению. Проведён анализ повреждаемости и дана количественная оценка показателей надёжности силовых кабелей Гомельских распределительных сетей напряжением 6–10 кВ. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании «кривых жизни» и расчёте функциональной надёжности электрических кабелей с бумажной и полиэтиленовой изоляцией.

Ключевые слова: надёжность, распределение вероятностей, параметр потока отказов, силовые кабели, полимерная изоляция.

Для цитирования: Киселевич, В. В. Оценка показателей надёжности силовых кабелей с бумажной и полиэтиленовой изоляцией / В. В. Киселевич // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 2 (67). – С. 85–92. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_85. – EDN: MBJRAV

Abstract. A relationship has been put forward that describes how the failure rate of power cables depends on their operating time. A high degree of agreement is demonstrated between experimental statistical data on the normalized failure rate of polymer-insulated cables and the calculated time dependency trends of the failure rate indicator, which are consistent with the proposed relationship. An analysis of failure rates was conducted, and a quantitative assessment of the reliability indicators was provided for power cables in the distribution networks of 6–10 kV in Gomel, Belarus. The results obtained can be used to model “life curves” and calculate the functional reliability of electrical cables with paper and polyethylene insulation.

Keywords: reliability, probability distribution, failure rate parameter, power cables, polymer insulation.

For citation: Kiselevich, V. V. Evaluation of reliability indicators for power cables with paper and polyethylene insulation / V. V. Kiselevich // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 2 (67). – P. 85–92. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_85 (in Russian). – EDN: MBJRAV

Введение

Надёжность работы любой электроэнергетической системы напрямую зависит от надёжности составляющих её элементов [1]. Знание закономерностей изменения надёжности силовых кабелей от времени эксплуатации позволяет существенно снизить уровень их повреждаемости и, таким образом, повысить эффективность и безопасность функционирования энергосистемы в целом [1]–[3]. Для количественного описания надёжности кабелей с полимерной изоляцией широкое распространение получило вероятностное распределение Вейбулла [4]–[6]. Закон Вейбулла имеет сравнительно простую математическую форму, удовлетворительно описывает статистические данные о распределении вероятностей времени безотказной работы кабелей и допускает возможность физического обоснования [4], [7]–[9].

Из анализа публикаций [7]–[12] следует, что применение распределения Вейбулла является оптимальным при большом объёме статистической выборки и неизменном физическом механизме старения электрической изоляции высоковольтных устройств. Между тем процесс эксплуатации кабелей часто сопряжён с колебаниями температуры, скачками напряжения и воздействием других деструктивных факторов [4], [7], [11]. Совокупное влияние разрушающих факторов может привести к трансформации доминирующего механизма старения изоляции кабелей и, как следствие, к снижению достоверности результатов моделирования их надёжности посредством вероятностного закона Вейбулла [7].

Перспективным подходом к решению данной проблемы служит применение математических функций, представляющих собой суперпозицию единичных законов распределения

вероятностей. Ранее нами [13] была разработана математическая модель отказа электрической изоляции, базирующаяся на сочетании равномерного и экспоненциального законов распределения вероятностей. Применение этой модели позволило вывести аналитические соотношения для расчёта основных характеристик надёжности изоляции как невосстанавливаемого элемента кабельной линии, работающего до первого отказа. В настоящей статье, являющейся продолжением публикации [13], приведено исследование эксплуатационной надёжности кабелей, рассмотренных в роли восстанавливаемых элементов линии электропередачи.

Цель работы – выполнить анализ повреждаемости и определить ключевые показатели надёжности силовых кабелей среднего напряжения с бумажной и полиэтиленовой изоляцией.

1 Показатели надёжности кабелей с полимерной изоляцией

Важной характеристикой надёжности невосстанавливаемых элементов является интенсивность отказов, равная отношению числа отказов, происшедших за единицу времени, к общему числу элементов, сохранивших свою работоспособность к данному моменту времени [14]. Соотношение, выражающее зависимость функции интенсивности отказов $F(t)$ электрической изоляции силовых кабелей от времени их эксплуатации, может быть представлено в форме [13]:

$$F(t) = \frac{c_w + (1 - c_w)k_1 \frac{t_E}{t_0} e^{-t/t_0}}{t_E [1 + k_1 (1 - c_w)(e^{-t/t_0} - 1)] - c_w t}, \text{ год}^{-1}, \quad (1.1)$$

где t , год – текущее время; c_w – долевого вклада равномерного износа при заданных условиях эксплуатации; $k_1 = (1 - e^{-t_E/t_0})^{-1}$ – нормирующий множитель, обеспечивающий выполнение необходимого граничного условия $Q(t)|_{t=t_E} = 1$; $Q(t)$ – функция распределения вероятностей отказов; t_E , год – время полного износа изоляции в отсутствие внезапных отказов; t_0 , год – математическое ожидание внезапного отказа в заданных условиях.

Формула (1.1) получена в рамках математической модели [13], основанной на предположении о том, что реальный отказ изоляции электротехнического устройства есть наложение внезапного и постепенного отказов. Внезапный отказ, которому присуще «отсутствие памяти» (длительность предварительного использования устройства не влияет на остаточное время его безотказной работы) и скачкообразное ухудшение свойств изоляции во времени, приводящее к её пробую, моделируется экспоненциальным распределением вероятностей [13]. Постепенный отказ, характеризующий поэтапным ухудшением свойств изоляции вследствие её электрического

износа и старения, описывается равномерным законом распределения вероятностей [13].

При исследовании надёжности восстанавливаемых элементов применяют понятие параметра потока отказов (удельной повреждаемости), определяемого отношением числа отказов в единицу времени к общему числу рассматриваемых элементов при условии, что восстановление отказавших элементов происходит мгновенно [14]–[16]. Ввиду того, что на практике потоки отказов электроустановок в подавляющем большинстве случаев являются ординарными, т. е. не допускающими совмещения двух или более событий в один и тот же момент времени [15], параметр потока отказов $\omega(t)$ и интенсивность отказов $F(t)$ будут равны [15]:

$$\omega(t) = F(t), \text{ год}^{-1}.$$

Тогда, учитывая это равенство, можно записать выражение для параметра потока отказов $F_\omega(t)$ силовых кабелей:

$$F_\omega(t) = k_F l_1 F(t) / l, \text{ год}^{-1}, \quad (1.2)$$

где k_F – положительный масштабный коэффициент; l_1 , км – унифицированная длина, равная 1 км; $F(t)$, год^{-1} – функция интенсивности отказов, определяемая соотношением (1.1); l , км – фактическая длина кабеля (кабельной линии).

Коэффициент масштаба k_F учитывает реальные условия эксплуатации силовых кабелей, имеющих конечный срок службы, который в силу процессов естественного старения и износа материалов кабельных изделий, как правило, колеблется в ориентировочных пределах от 30 до 60 лет [17]–[19]. Введение коэффициента k_F позволяет привести чрезмерно завышенные значения параметров t_0 и t_E , рассчитываемых по классическим соотношениям теории надёжности технических систем [16], к значениям времён ожидания отказа и износа, которые близки к действительным эксплуатационным условиям электроустановок.

В качестве примера на рисунке 1.1 представлены зависимости $F_\omega(t)$, построенные для силовых кабелей напряжением 5–36 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), которыми проложены городские распределительные электросети Германии. Полученные графики $F_\omega(t)$ демонстрируют хорошую сходимость литературных статистических данных [3], [18] (они показаны символами) и аппроксимирующих кривых 1, 2 (сплошные линии), отвечающих выражению (1.2). Кривые 1 и 2 описывают отказы СПЭ-кабелей, введённых в работу после (далее К-1) и до (далее К-2) 1983 г. соответственно.

Из рисунка 1.1 видно, что в сравнении с известными выражениями для $F_\omega(t)$, базирующимися на распределении Вейбулла, функция (1.2) обеспечивает [13]:

– охват всего срока эксплуатации («кривой жизни») кабелей, включая период приработки I ($0 - t_1$), период нормальной эксплуатации II ($t_1 - t_{II}$) и период окончательного износа III ($t_{II} - t_E$);

– естественную для кабелей как «нормально стареющих» объектов плавную возрастающую частоту отказов на интервале от t_1 до t_{II} .

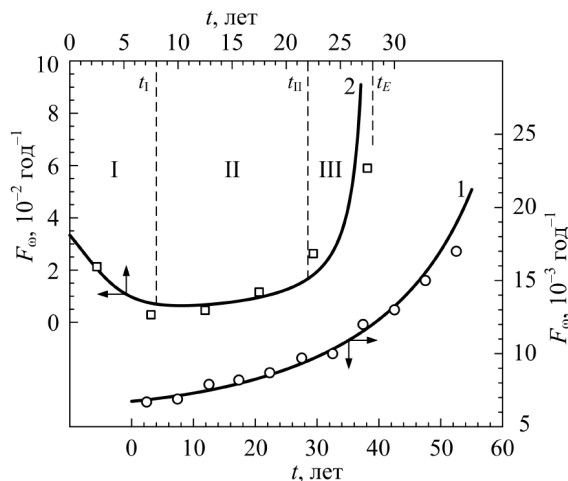


Рисунок 1.1 – Зависимости параметра потока отказов от времени эксплуатации для СПЭ-кабелей среднего напряжения, проложенных в распределительных электросетях Германии после (кривая 1) и до (кривая 2) 1983 г. [3], [18]

Значения параметров, использованные для построения функций $F_{\omega}(t)$, и числовые характеристики «кривой жизни» кабелей типа К-1, К-2, К-3 (СПЭ-кабелей напряжением 25 кВ) и К-4 (кабелей с бумажной пропитанной изоляцией (ПБИ) напряжением 6–10 кВ) представлены в таблице 1.1. Через F_{II} здесь обозначена средняя величина параметра потока отказов, имевших место в период нормальной эксплуатации кабелей; время τ_M характеризует среднюю наработку кабелей до отказа. Расчёт показателей надёжности кабелей К-3 и К-4 выполнен на основании данных о повреждаемости городских распределительных сетей США [19] и России [17].

Ближкие к единице значения параметра c_w для кабелей К-1, К-3 и К-4 указывают на преобладание равномерного износа над внезапными

отказами. Период приработки у данных кабелей отсутствует, а длительность t_{II} периода нормальной эксплуатации составляет 40, 28 и 30 лет соответственно. Значение $t_{II} \approx 40$ лет, указанное для кабелей К-1, является весьма условным, поскольку зависимость $F_{\omega}(t)$, характеризующая повреждаемость этих кабелей, есть равномерно возрастающая функция без отчётливо прослеживаемых границ между интервалами I, II, III (кривая 1 на рисунке 1.1).

Для кабелей К-2 наблюдается противоположная ситуация: внезапные отказы преобладают над постепенными отказами, доля которых равняется $c_w = 0,359$. Длительность периода приработки кабелей К-2 составляет 8 лет. Его наличие во многом обусловлено высокой дефектностью и низкой долговечностью СПЭ-кабелей первого поколения [3], [18]. Период нормальной эксплуатации данных кабелей завершается на отметке 22 лет, по истечении которых частота отказов, вызванных интенсификацией процессов старения электрической изоляции, начинает резко возрастать (кривая 2 на рисунке 1.1). Высокий уровень удельной повреждаемости при относительно небольших значениях времени эксплуатации ($t \in [22; 28]$ лет) авторы [3] связывают с малой степенью устойчивости изоляции кабелей К-2 к образованию электрических и водных дендритов. Их развитие повышает вероятность преждевременного отказа кабелей вследствие наступления электрического пробоя изоляции [7], [8].

Величины средней наработки до отказа τ_M , приведённые в таблице 1.1, были рассчитаны по формуле [13]:

$$\tau_M = c_w \frac{t_E}{2} + (1 - c_w) k_1 t_0 [1 - e^{-t_E/t_0} (1 + t_E/t_0)], \text{ год.}$$

Наибольшее значение τ_M отвечает СПЭ-кабелям типа К-1 с плавной возрастающей функцией отказов $F_{\omega}(t)$. В случае кабелей К-3 и К-4, главным образом подверженных постепенному износу, наработка τ_M получилась практически одинаковой и приблизительно втрое большей по сравнению с кабелями К-2, отказ которых часто носит внезапный характер.

Таблица 1.1 – Показатели надёжности кабелей с полимерной изоляцией

Кабель, вид изоляции	Напряжение кабеля, кВ	Параметры функции $F_{\omega}(t)$				Характеристики «кривой жизни» кабеля			
		c_w	t_0 , год	t_E , год	k_F	F_{II} , год ⁻¹	t_i , год	t_{II} , год	τ_M , год
К-1, СПЭ	5–36	0,910	24	75	0,42	0,0089	0	40	35,97
К-2, СПЭ	5–36	0,359	2	28	0,1	0,0098	8	22	6,31
К-3, СПЭ	25	0,812	9	41	0,1	0,0051	0	28	18,26
К-4, ПБИ	6–10	0,890	10	39	1,0	0,0587	0	30	18,37

Удельная повреждаемость, характеризующая средней величиной параметра потока отказов F_{II} , существенно зависит от типа изоляции и условий эксплуатации кабелей. СПЭ-кабели К-1 и К-2, эксплуатируемые в схожих условиях [3], [18], имеют близкие значения F_{II} . СПЭ-кабелям типа К-3 соответствует наименьшая частота отказов F_{II} . Она практически в два раза ниже значений F_{II} , найденных для К-1 и К-2. Это выступает косвенным признаком того, что в сопоставлении с кабелями К-1, К-2 эксплуатация СПЭ-кабелей К-3 проходит в более благоприятных условиях.

Повреждаемость кабелей К-4 с бумажной изоляцией на порядок выше величины F_{II} для кабелей К-3 и в 7,4 раза выше средней повреждаемости исследованных СПЭ-кабелей. Данный факт позволяет утверждать, что одним из возможных путей повышения эксплуатационной надёжности кабельных линий электропередачи среднего напряжения может служить замена кабелей с бумажной изоляцией на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Наряду с рассмотренным вероятностным подходом к определению характеристик надёжности электрических кабелей на практике широко применяется статистический подход [14]–[16]. В его основе лежит использование эмпирических формул математической статистики, обеспечивающих возможность приемлемой оценки количественных показателей надёжности исследуемых объектов при ограниченном объёме исходной информации об их повреждаемости [14]–[16].

Ниже выполним анализ повреждаемости и статистическую оценку характеристик надёжности кабельных линий напряжением 6–10 кВ, входящих в состав Гомельского городского района электрических сетей филиала «Гомельские электрические сети» РУП «Гомельэнерго» (далее ГПРЭС).

2 Анализ повреждаемости силовых кабелей ГПРЭС

В зависимости от условий возникновения отказы кабелей можно разделить на две группы: отказы при испытаниях и отказы во время работы (аварийные отключения). Исследование

статистических данных, заимствованных из журналов повреждений и аварийных отключений кабельных линий ГПРЭС, даёт возможность заключить, что за период с 2017 по 2021 годы аварийные отключения кабелей, отказавших во время работы, составили 76,4% от общего числа отказов. На отказы, произошедшие в ходе испытаний кабелей, вводимых в эксплуатацию по завершении ремонтно-восстановительных работ, пришлось 23,6%.

Высокая повреждаемость при испытаниях изоляции повышенным напряжением вызвана, во-первых, недостаточным качеством проводимых ремонтно-восстановительных работ для кабелей, эксплуатируемых менее 15 лет, а во-вторых, весьма высокой степенью износа изоляции у кабелей, фактический срок эксплуатации которых превышает 15–20 лет.

Результаты анализа причин аварийных отключений кабельных линий сведены в таблицу 2.1, из которой видно, что практически 80% отказов связаны с электрическим пробоем изоляции. Причины аварийных отключений не установлены в 6,4% случаев, остальные отказы вызваны повреждениями на подстанциях, механическими повреждениями кабелей, повреждениями концевых муфт и действиями посторонних лиц.

Для оценки влияния степени износа и старения электрической изоляции на надёжность работы силовых кабелей ГПРЭС проанализируем распределение числа их отказов по срокам эксплуатации (рисунок 2.1).

Из гистограммы, представленной на рисунке 2.1, следует, что наибольшее количество отказов (~60% от общего числа), имевших место в 2017–2021 гг., пришлось на кабели, находившиеся в эксплуатации от 30 до 50 лет. Такое распределение во многом обусловлено тем, что кабели, выработавшие минимальный нормативный срок службы $t_N = 30$ лет [20], переходят в период окончательного износа, сопровождающийся значительным ростом числа отказов (см., например, рисунок 1.1).

Таблица 2.1 – Причины аварийных отключений кабельных линий ГПРЭС напряжением 6–10 кВ

Причина аварийного отключения	Число аварийных отключений					
	2017	2018	2019	2020	2021	2017–2021
Повреждение (пробой) изоляции	122	135	125	111	85	578 (79,9%)
Повреждение на подстанции	5	12	13	3	8	41 (5,7%)
Механическое повреждение	7	8	4	7	4	30 (4,1%)
Повреждение концевой муфты	2	–	4	4	5	15 (2,1%)
Действия посторонних лиц	–	3	4	6	–	13 (1,8%)
Причина не установлена	7	13	16	4	6	46 (6,4%)
Всего	143	171	166	135	108	723 (100%)

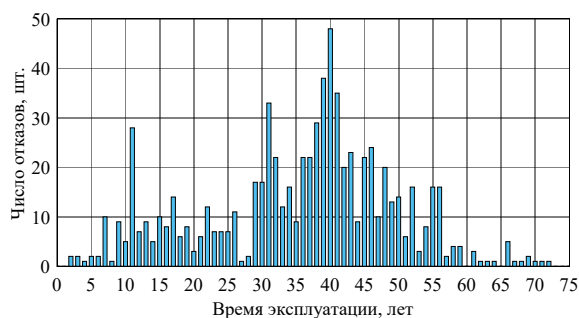


Рисунок 2.1 – Гистограмма распределения числа отказов силовых кабелей ГРЭС по срокам их эксплуатации за 2017–2021 гг.

Абсолютный пик повреждаемости кабелей в 2017–2021 гг. отвечает 40-летнему сроку эксплуатации, сопоставимому с наиболее часто встречаемыми в литературе [17]–[19] значениями фактического срока службы силовых кабелей, равными 35–45 лет. Небольшое количество отказов кабелей со сроком эксплуатации, превышающим 50 лет, в первую очередь обусловлено их малым числом в электросети, а не высокой надёжностью таких кабелей.

В период нормальной эксплуатации, простирающийся до 30 лет, наблюдалось 219 отказов (30% от общего числа), причём отсутствие отказов кабелей, отработавших менее 2 лет, подтверждает известный факт [9], [21] о полном отсутствии либо незначительной продолжительности периода приработки у технологически правильно изготовленных силовых кабелей. Для кабелей, эксплуатировавшихся в течение 11 лет, зафиксировано 28 отказов, что практически в 3 раза превышает среднее число отказов за период нормальной эксплуатации. Отклонение такого порядка объясняется большим количеством механических повреждений, пришедшихся на данные кабели в указанном интервале времени.

Неравномерность распределения числа аварийных отключений кабельных линий в течение годового цикла эксплуатации, вытекающая из гистограммы рисунка 2.2, в некоторой степени связана с влиянием климатических параметров на частоту отказов кабелей.

Согласно гистограмме на рисунке 2.2 наиболее высокая повреждаемость кабелей в 2017–2021 гг. наблюдалась в 3–6 месяцах. Рост числа отказов в весенний период сопряжён с увеличением влажности грунта, приводящим к усилению коррозионных процессов в защитных оболочках кабелей и, как следствие, к повышению вероятности пробоя изоляции.

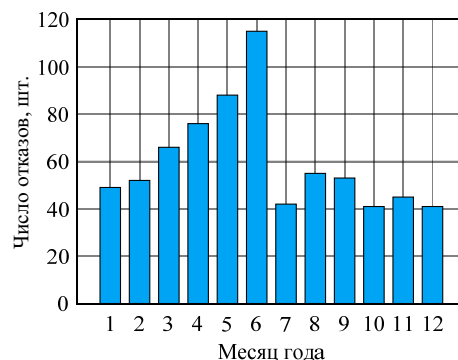


Рисунок 2.2 – Гистограмма распределения суммарного за 2017–2021 гг. числа отказов силовых кабелей ГРЭС по месяцам года

Пик повреждаемости кабельных линий ГРЭС (115 отказов), приходящийся на июнь, во многом вызван значительным ухудшением теплового режима работы кабелей вследствие сезонного повышения максимальных и средних суточных температур наружного воздуха. Относительно невысокой повреждаемости кабелей ГРЭС в июле и августе 2017–2021 гг. способствовала нормализация теплового режима их работы за счёт оптимизации функционирования электрических сетей, в частности, повышения равномерности разделения токовых нагрузок между находящимися в эксплуатации силовыми кабелями.

Распределение числа отказов линий ГРЭС по маркам кабелей, отражающее взаимосвязь между их повреждаемостью и основными конструктивными характеристиками (тип изоляции и материал токопроводящих жил), приведено в таблице 2.2; при составлении таблицы учитывались отказы, произошедшие как во время работы кабелей, так и при испытании их изоляции повышенным напряжением.

Таблица 2.2 – Распределение числа отказов кабельных линий ГРЭС напряжением 6–10 кВ по маркам кабелей

Группа	Марки кабелей	Число отказов кабельных линий					
		2017	2018	2019	2020	2021	2017–2021
I	АПвП, АПвПу, АПвПг	2	1	6	1	4	14 (1,7%)
II	ААБ, ААБв, ААБл, ААБлУ	66	77	72	71	37	323 (39,3%)
III	ААШв, ААШвУ	50	50	38	48	25	211 (25,7%)
IV	АСБ, АСБл	28	52	45	57	27	209 (25,4%)
V	СБ	4	1	1	2	0	8 (1,0%)
VI	Сочетание групп I–V	8	6	12	7	24	57 (6,9%)
Всего		158	187	174	186	117	822 (100%)

Более 90% зарегистрированных отказов относится к кабелям с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами (II–IV группы). Доля отказов кабелей марки СБ с бумажной изоляцией и медными жилами в 2017–2021 гг. составила всего 1%. Это связано с малым количеством данных кабелей на балансе ГГРЭС. Кабели I группы с изоляцией из сшитого полиэтилена и алюминиевыми жилами являются наиболее надёжными, поскольку их повреждаемость в 2017–2021 гг. не превысила 1,7%, при том что протяжённость линий ГГРЭС, выполненных такими кабелями, составляет 10,2% от общей протяжённости кабельных электрических сетей среднего напряжения.

3 Показатели надёжности силовых кабелей ГГРЭС

Надёжность и ремонтпригодность силовых кабелей Гомельских электрических сетей будем характеризовать следующими показателями:

- параметр потока отказов F_{ω} , год⁻¹;
- среднее время восстановления работоспособности $\bar{t}_r$, ч;
- интенсивность потока восстановлений μ_r , ч⁻¹.

Результаты оценки перечисленных показателей представлены в таблице 3.1, где также указаны величины недоотпуска электроэнергии потребителям (ΔW , кВт·ч) по кабельным линиям, вышедшим из строя во время работы. В строках таблицы 3.1 с аббревиатурой ЭИМ (электроизоляционный материал) приведены средневзвешенные по длине (протяжённости кабельных линий) значения показателей надёжности кабелей с ПБИ и СПЭ изоляцией.

Значения параметра потока отказов F_{ω} были рассчитаны на 1 км длины линии по эмпирической формуле:

$$F_{\omega}(t) = \frac{\omega(t)l_1}{l}, \text{ год}^{-1},$$

где $\omega(t) = n_0 / (n_{\Sigma} \Delta t)$, год⁻¹ [15]; n_0 – число кабелей, отказавших за время Δt ; $\Delta t = 1$ год –

рассматриваемый промежуток времени; n_{Σ} – общее число кабелей.

Параметр потока отказов силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией находится в пределах от 0,01 до 0,076 год⁻¹; у кабелей с бумажной изоляцией F_{ω} изменяется от 0,208 до 0,253 год⁻¹. Средние значения F_{ω} для кабелей с ПБИ и СПЭ изоляцией в период с 2017 по 2021 гг. составили 0,227 и 0,034 год⁻¹ соответственно.

Из анализа величин F_{Π} , приведённых в таблице 1.1, и общедоступных публикаций следует, что полученные для кабелей ГГРЭС значения параметров потоков отказов превышают значения F_{ω} , наиболее часто встречаемые в научной литературе. Так, согласно [18], [19], [22] параметр потока отказов СПЭ-кабелей в зарубежных электрических сетях изменяется от 0,003 до 0,01 год⁻¹; повреждаемость ПБИ-кабелей варьируется в диапазонах 0,01–0,075 год⁻¹ для зарубежных [18], [19], [22] и 0,045–0,2 год⁻¹ для российских [15], [17], [23] электросетей. Довольно высокий уровень повреждаемости кабелей ГГРЭС свидетельствует о немалой степени их износа.

Среднее время восстановления $\bar{t}_r$ количественно характеризует ремонтпригодность кабеля и представляет собой математическое ожидание времени восстановления его работоспособности [14]–[16]. Для статистической оценки $\bar{t}_r$ была использована формула [15]:

$$\bar{t}_r = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} t_{r(i)}, \text{ ч},$$

где $t_{r(i)}$, ч – длительность восстановления i -го кабеля.

В результате выявлено, что среднее время восстановления кабельных линий ГГРЭС, составившее в период с 2017 по 2021 гг. 12,33 ч (см. таблицу 3.1), сопоставимо с литературными данными [15], [23], согласно которым $\bar{t}_r$ находится в пределах от 1,5 до 100 ч.

При определении $\bar{t}_r$ нами учитывалось лишь фактическое время, пошедшее исключительно на поиск и устранение дефектов в отказавших линиях.

Таблица 3.1 – Показатели надёжности и ремонтпригодности силовых кабелей ГГРЭС напряжением 6–10 кВ

Показатель надёжности	Изоляция кабеля	Значение показателя					
		2017	2018	2019	2020	2021	2017–2021
F_{ω} , год ⁻¹	СПЭ	0,019	0,010	0,057	0,010	0,076	0,034
	ПБИ	0,213	0,238	0,221	0,208	0,253	0,227
	ЭИМ	0,193	0,214	0,205	0,188	0,235	0,207
$\bar{t}_r$, ч	ЭИМ	11,03	12,75	12,95	12,90	12,00	12,33
μ_r , ч ⁻¹	ЭИМ	0,091	0,078	0,077	0,078	0,083	0,081
ΔW , кВт·ч	СПЭ	210	0	554	0	1 204	1 968
	ПБИ	14 380	17 248	24 305	40 749	41 184	137 866
	СПЭ и ПБИ	14 590	17 248	24 859	40 749	42 388	139 834

Время вынужденного простоя в ожидании ремонта кабельной линии, которое на практике в зависимости от ряда определяющих факторов (категория потребителя электроэнергии, доступность места расположения дефекта, наличие материальных и людских ресурсов для выполнения ремонтных работ и др.) может варьироваться от нескольких часов до нескольких месяцев, из рассмотрения исключалось.

Интенсивность потока восстановлений μ_r представляет отношение числа элементов, восстановленных на наблюдаемом интервале времени, к произведению длительности этого интервала на число элементов, ещё не восстановленных к моменту начала наблюдения [14], [15]. Ввиду того, что на проведение ремонтно-восстановительных работ силовых кабелей существуют нормативы времени, устанавливаемые эксплуатирующими организациями, интенсивность восстановления, как правило, является практически постоянной величиной, обратной времени $\bar{t}_r$ [14]: $\mu_r = 1 / \bar{t}_r$, ч⁻¹. Это в некоторой степени подтверждается результатами расчёта интенсивности восстановления кабелей ГПЭС, показавшими близость значений μ_r , найденных для разных лет (таблица 3.1).

Недоотпуск электроэнергии потребителям ΔW , вызванный отказом кабельных линий, косвенно характеризует материально-экономический ущерб, возникающий в случае аварийного нарушения работы системы электроснабжения. В период с 2017 по 2021 гг. суммарный недоотпуск электроэнергии в результате аварийных отключений кабельных линий ГПЭС составил 139834 кВт·ч, причём на СПЭ-кабели пришлось всего 1968 кВт·ч (1,4% от общего недоотпуска). Более того, в 2018 и 2020 годах недоотпуска по кабельным линиям со СПЭ изоляцией и вовсе не было (повреждения кабелей I группы (СПЭ-кабелей), приведённые в таблице 2.2 для 2018 и 2020 гг., произошли во время электрических испытаний). Данное обстоятельство дополнительно подчёркивает целесообразность перехода от кабелей с бумажной изоляцией к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Заключение

Получено соотношение, выражающее зависимость параметра потока отказов электрических кабелей от времени их эксплуатации. На примере силовых кабелей среднего напряжения с полимерной изоляцией показано, что применение данного соотношения способствует достоверному количественному описанию надёжности кабельных изделий на длительном интервале времени.

Выполнен анализ повреждаемости и рассчитаны основные характеристики надёжности силовых кабелей, входящих в состав Гомельских распределительных сетей напряжением 6–10 кВ. Отмечено, что, в целях снижения общего уровня

повреждаемости кабельных линий и минимизации ущерба от недоотпуска электроэнергии внешним потребителям, рационально проводить постепенный переход от кабелей с бумажной изоляцией, имеющих значительную степень износа, на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, обладающие высокой надёжностью.

Полученные в статье результаты могут быть использованы для прогнозирования «кривых жизни» и оценки показателей надёжности силовых кабелей с полимерной изоляцией.

Автор выражает благодарность П. С. Гущеву, М. И. Химченкову и В. С. Лавриновичу за любезно предоставленные эксплуатационные данные о силовых кабелях Гомельских электрических сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ надёжности электроэнергетических систем на основе вероятностно-алгебраического моделирования / О. М. Демиденко, Е. И. Сукач, Д. В. Ратобильская, Ю. В. Жердецкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (19). – С. 69–76.
2. Маслович, С. Ф. Математическое моделирование параметров надёжности и электропотребления / С. Ф. Маслович, В. Н. Галушко, С. В. Бахур // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (19). – С. 77–83.
3. *Component reliability prognosis in asset management methods* / M. Schwan, K. Schilling, U. Zickler, A. Schnettler // Proceedings of the 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, 11–15 June 2006 / Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Piscataway, NJ, 2006. – P. 1–6.
4. Пушков, Н. В. Вероятностная оценка характеристик изоляции высоковольтных кабелей и проводов / Н. В. Пушков, С. С. Соломоник // Электричество. – 1972. – № 5. – С. 80–82.
5. *Failure prediction of underground distribution feeder cables* / R. M. Bucci, R. V. Rebbapragada, A. J. McElroy [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9, № 4. – P. 1943–1955.
6. Mazzanti, G. Updated review of the life and reliability models for HVDC cables / G. Mazzanti // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2023. – Vol. 30, № 4. – P. 1371–1390.
7. Ushakov, V. Y. Insulation of high-voltage equipment / V. Y. Ushakov. – Berlin – Heidelberg: Springer, 2004. – 421 p.
8. Blythe, T. Electrical properties of polymers / T. Blythe, D. Bloor. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 490 p.
9. Kogan, V. I. An explanation for the decline in URD cable failures and associated nonhomogeneous Poisson process / V. I. Kogan, T. L. Jones // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9, № 1. – P. 534–543.

10. Chiodo, E. Mathematical and physical properties of reliability models in view of their application to modern power system components / E. Chiodo, G. Mazzanti // *Innovations in power systems reliability* (Springer Series in Reliability Engineering); eds. G. Anders, A. Vaccaro. – London : Springer, 2011. – P. 59–140.
11. *Extruded cables for high-voltage direct-current transmission* / Eds. G. Mazzanti, M. Marzotto. – Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 349 p.
12. *Comparison of the Weibull and the crow-AMSAA model in prediction of early cable joint failures* / Z. Tang, W. Zhou, J. Zhao [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2015. – Vol. 30, № 6. – P. 2410–2418.
13. Шабловский, Я. О. Вероятностные аспекты надёжности электрической изоляции / Я. О. Шабловский, В. В. Киселевич // *Надёжность*. – 2015. – № 3 (54). – С. 42–44.
14. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надёжности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
15. Конюхова, Е. А. Надёжность электроснабжения промышленных предприятий / Е. А. Конюхова, Э. А. Киреева. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 92 с.
16. Ушаков, И. А. Курс теории надёжности систем / И. А. Ушаков. – М. : Дрофа, 2008. – 239 с.
17. Коржов, А. В. Метод оценки значимости влияния проектных и эксплуатационных факторов на срок службы изоляции силовых кабелей 6 (10) кВ городских электрических сетей / А. В. Коржов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 31–34.
18. *Asset-Management von Verteilungsnetzen – Komponentenverhalten und Analyse des Kostenrisikos: Technischer Bericht* / Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. – Mannheim, Deutschland, 2006. – № 299. – 174 s.
19. Zhou, Y. A practical method for cable failure rate modeling / Y. Zhou, R. E. Brown // *Proceedings of the 2005 / 2006 IEEE / PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, 21–26 May 2006* / Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Piscataway, NJ, 2006. – Vol. 1. – P. 794–798.
20. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия: ГОСТ 18410-73. – Переизд. 28.01.11 с изм. 1–5. – Взамен ГОСТ 340-59, ГОСТ 6515-55; введ. 01.01.75. – Москва: Гос. комитет стандартов Совета Министров СССР; Мн. : Госстандарт Республики Беларусь, 2011. – 28 с.
21. Hansen, J. Z. Results from Danish failure statistics for medium voltage XLPE cables / J. Z. Hansen // *Proceedings of the 22nd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, 10–13 June 2013 / Curran Associates, Inc. – Red Hook, New York, 2013. – Vol. 4 (IET Conference Publication Series, № 615). – P. 2270–2273.
22. *Improving reliability by focusing on the quality and condition of medium voltage cables and cable accessories* / O. Siirto, J. Vepsäläinen, A. Hämäläinen, M. Loukkalahti // *CIRED – Open Access Proceedings Journal*. – 2017. – Vol. 2017, № 1. – P. 229–232.
23. Виноградов, А. В. Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надёжности электроснабжения потребителей / А. В. Виноградов, Р. А. Перьков // *Вестник НГИЭИ*. – 2015. – № 12 (55). – С. 12–21.

Поступила в редакцию 03.04.2026.

Информация об авторах

Киселевич Валентин Владимирович – старший преподаватель