

## Оценка математического ожидания ресурса изоляции в задачах повышения надежности электрооборудования

А.А. Шурыкин<sup>1</sup>, Н.К. Полуянович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет

<sup>2</sup>Южный федеральный университет, Таганрог

**Аннотация:** Рассмотрена модель возникновения отказов в результате старения изоляционных материалов силовых кабельных линий. Показано, что остаточный ресурс зависит от соотношения запаса прочности и предела прочности используемых материалов. Проведено моделирование процессов срабатывания ресурса с использованием математической модели состояния изоляции, связывающей время и вероятность ее безотказной работы с определенными ее параметрами. Модель позволяет прогнозировать состояние изоляции и срок службы силовой кабельной линии.

**Ключевые слова:** Надёжность, ресурс, изоляционные материалы, тепловое старение.

**Введение.** Надёжность электрооборудования необходимо учитывать при планировании ремонтно-эксплуатационного обслуживания и диагностике [1-3]. Актуальность задач по расчёту надёжности объясняется тем, что они дают ответ на вопрос о целесообразности дальнейших затрат на эксплуатацию и обслуживание силового энергетического оборудования. Цель работы – определить оптимальную стратегию технической эксплуатации и проведение планово-предупредительных ремонтов в заранее намеченные сроки [4]. Изменения, происходящие со временем в силовых кабельных линиях, связаны с внешними и внутренними воздействиями с термофлуктуационными процессами, соотнесенными с рассматриваемыми видами старения и показателями надёжности [5-9, 12, 13], используемыми в инженерной практике, рис. 1.

Деструкция приводит к изменению ряда физических свойств или признаков. Причинно-следственные связи для постепенных отказов, возникающих в электрооборудовании, влияющих на выбор моделей оценки надёжности для различных видов старения [3, 4, 13].

В работе [1] показано, что срок службы изоляции для электрического (1) и теплового (2) типов старения [8, 14] по моделям постепенных отказов рассчитывается:

$$T = \frac{A_1}{(U - U_{ч.р})^{n1}}, \quad (1)$$

где  $A$  - постоянная, обусловленная свойствами изоляции;  $n$  - степень определяющая конструктивные особенности изоляции и род действующего напряжения (для БМИ  $n=4-8$ );  $U_{ч.р}$  – напряжение появления в изоляции частичных разрядов (ЧР) – главная причина электрического старения основной изоляции:

$$t_{сп} = A_t \exp(-\gamma\theta), \quad (2)$$

где  $\gamma$  - коэффициент, характеризующий степень старения в зависимости от класса изоляции;  $A_t$  - срок службы изоляции при  $\theta=0$  (некоторая условная величина);  $\theta$  - температура нагрева.

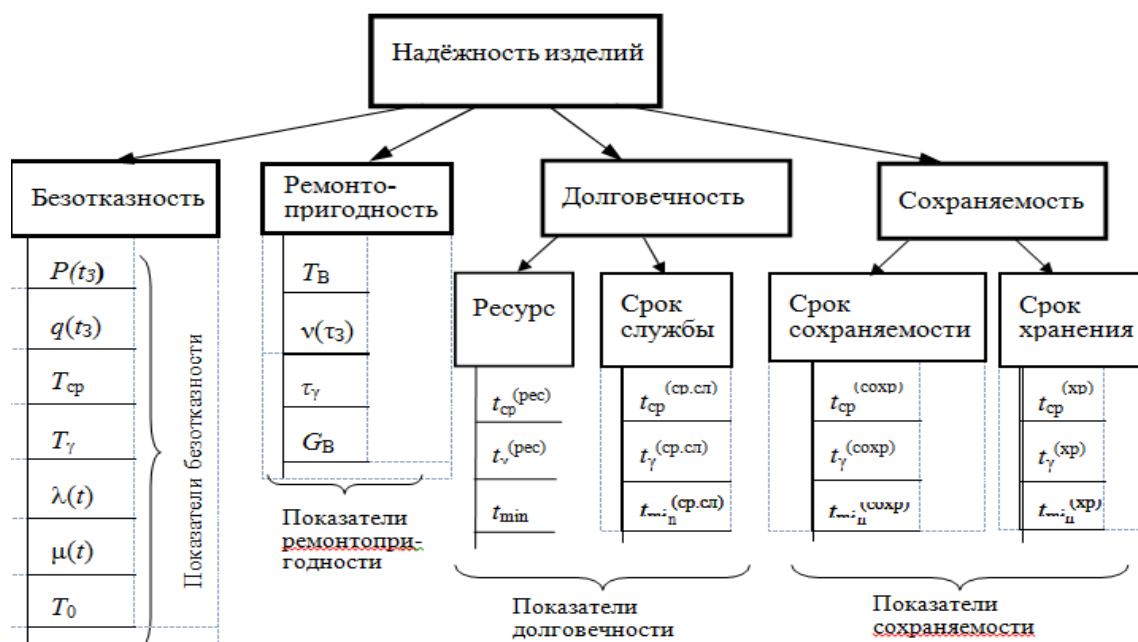


Рис. 1. Основные составляющие и показатели надёжности

**Модель возникновения отказов в результате старения [1].** Подход основан на теории: деградации – старения и износа изоляционных материалов, и изделий. Пусть во время работы надежность элемента определяется физическим параметром  $X$  под действием некоторого фактора  $M$  изменяется, т.е.:

$$X = \varphi(t, M).$$

Если значение параметра  $X$  превысит критический уровень  $X_{кр}$ , наступит отказ, а время жизни элемента определится выражением:

$$t_{ж} = \Psi(X_{кр}, M),$$

где  $\Psi$  – обратная к  $\varphi$  по первому аргументу функция.

Рассматривая распределение критического значения параметра, определяющего физические характеристики изделия -  $F(X_{кр})$ , и считая функцию  $\varphi(t, M)$  неубывающей для распределения времени безотказной работы, получаем:

$$F(t_{ж}) = F(\varphi(t_{ж}, M)),$$

Распределения для плотности вероятности времени безотказной работы:

$$f(t_{ж}) = \varphi'(t_{ж}, M) F'(\varphi(t_{ж}, M))$$

и интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = \frac{\varphi'(t_{ж}, M) F'(\varphi(t_{ж}, M))}{1 - F(\varphi(t_{ж}, M))}.$$

Распределение Вейбулла позволяет проанализировать срок жизни:

$$F(x) = 1 - \exp[-b(x - x_0)^a], X \geq X_0,$$

где  $a, b$  - параметры распределения;  $x$  - критическое значение параметра, определяющее отказ;  $x_0$  - наименьшее значение параметра, при котором не исключается отказ.

Моменты распределения высчитываются нижеуказанными выражениями [1]:

$$m_x = x_0 + \Gamma\left(l + \frac{1}{\alpha}\right)b^{-\frac{1}{\alpha}},$$

$$\sigma_x^2 = \left[\Gamma\left(l + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]b^{-\frac{2}{\alpha}},$$

где  $\Gamma(v)$  – гамма-функция.

Используя распределение Вейбулла для распределения времени безотказной работы и вероятности отказа при старении получаем:

$$F(t) = Q(t) = 1 - \exp\{-b[\varphi(t, M) - x_0]^\alpha\},$$

для интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = ab\varphi'(t, M)[\varphi(t, M) - x_0]^{\alpha-1}.$$

### **Тепловое старение как подход к оценке срока службы изоляции.**

При длительном нагревании диэлектриков в них происходят необратимые физико-химические процессы, приводящие к структурным изменениям, чем обусловлены соответствующие изменения физических, механических и электрических характеристик этих диэлектриков [10, 11]. Логарифм меры механических, физических и диэлектрических характеристик связан прямолинейной зависимостью со временем теплового старения изоляции. Логарифм меры (прочности изоляции  $E/E_0$ ) изменяется пропорционально времени и скорости химической реакции, зависящей от температуры  $T$  [1], т.е.:

$$\ln\left(\frac{E}{E_0}\right) = -kt,$$

где  $E_0$  и  $E$  - значения рабочей характеристики для времени  $0$  и  $t$ .

Срок службы изоляции при неизменной температуре определяется из уравнения:

$$\ln t_{cm} = \frac{B}{T} + \ln k_0 + \ln \ln \left( \frac{E}{E_0} \right).$$

Если выбрать как меру теплового старения определенное значение какой-либо рабочей характеристики диэлектрика (например, указанное выше отношение  $E/E_0$ , то время  $t_{cm}$ , по истечении которого изоляция достигнет этого состояния, может быть определено из уравнения:

$$\ln t_{cm} = \frac{B}{T+Y} \quad \text{или} \quad t_{cm} = \exp \left( \frac{B}{T+Y} \right).$$

Таким образом, остаточный ресурс зависит от соотношения запаса прочности и предела прочности используемых материалов.

**Моделирование процессов срабатывания ресурса силовой кабельной линии (СКЛ).** На ресурс влияют проводимые в электроэнергетических системах диагностика и планово – предупредительные ремонты (ППР), восстанавливающие срок службы элементов. Степень восстановления ресурса существенно зависит от глубины и объема проводимого ремонта (коэффициента релаксации).

В качестве примера рассмотрим расчет надежности СКЛ, типа ПвП2г 110 кВ., параметры интенсивности отказов которой приведены в таблице №1.

Для выполнения расчёта планово-предупредительного ремонта необходимо:

Найти суммарную интенсивность отказов системы по формуле:

$$\lambda_{сум} = \sum_m (\lambda_{i_m} N_{i_m} K_{i_m}),$$

где  $\lambda_{\text{сум}}$  – суммарная интенсивность отказов,  $m$  – общее количество элементов в системе;  $\lambda_i$  – средняя интенсивность отказов;  $N_i$  – количество элементов определённого типа;  $K_i$  – коэффициент надёжности элемента.

Таблица №1

№ п\п	Наименование изделия	Материал	Вероятность отказов, $\lambda, 10^{-6}, 1/\text{ч}$
1	Токопроводящие жилы	Алюминиевые	0,30
2	Изоляция	Сшитый полиэтилен	0,04
3	Экран	Медные проволоки	0,068
4	Водоблокирующая лента	Крепированная бумага	0,78
5	Наружная оболочка	Полиэтилен	0,72

Найти значение средней наработки на отказ:

$$T = 1/\lambda_{\text{сум}}$$

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  определяется функцией:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы;  $T$  – наработка на отказ;  $t$  – время.

Время до первого ремонта  $t_1$  находим из уравнения:

$$P(t) = P_{\text{нд}}$$

где  $P_{\text{нд}}$  – нижняя граница заданного значения вероятности безотказной работы.

Временные промежутки  $t$  между последующими ремонтами находим из уравнения:

$$P(t)K_{\text{нв}}^{n-1} = P_{\text{нд}},$$

где  $K_{НВ}$  – коэффициент неполного восстановления вероятности безотказной работы после ремонта;  $n$  – порядковый номер проводимого ремонта.

Вероятность безотказной работы до первого ремонта определяется как (3), вероятность безотказной работы для последующих ремонтов определяется функцией:

$$P_n(t) = e^{-\left(\frac{t-t_s}{T}\right)} K_{НВ}^{n-1},$$

где  $n$ – порядковый номер ремонта;  $t_s$ – сумма всех предшествующих ремонтных интервалов ( $t_s = t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1}$ ).

Проведено моделирование планово-предупредительных ремонтов в зависимости от показателей надежности для силовой кабельной линии (СКЛ) рис.2.

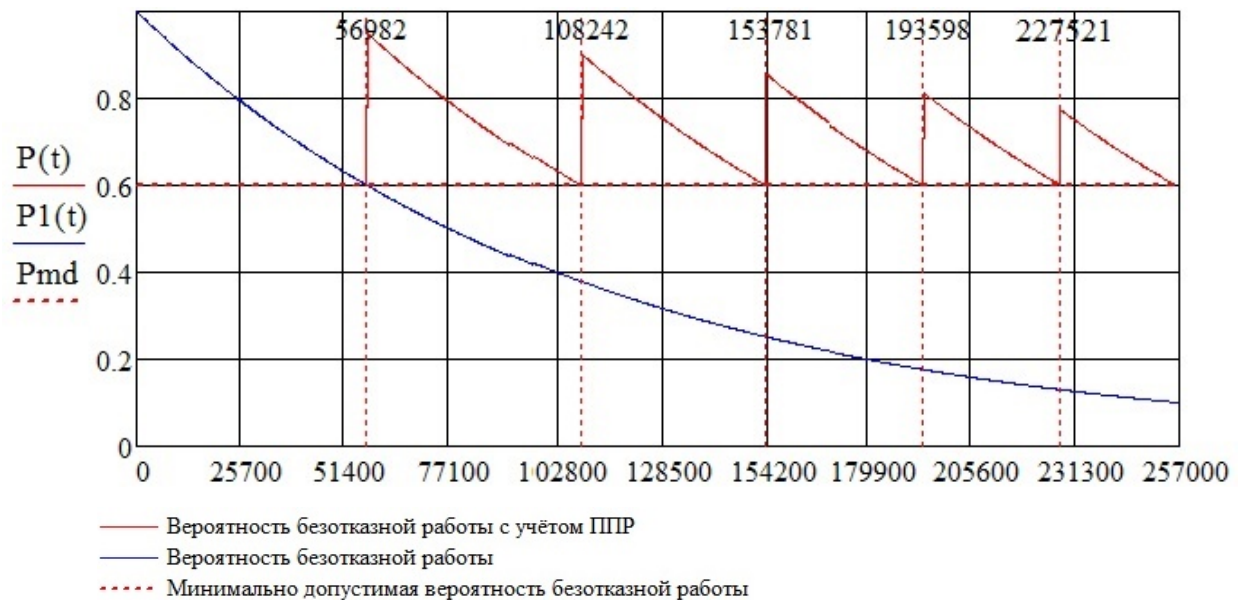


Рис.2. Показатель надежности и ППР

В исходном состоянии элементы изоляции имеют достаточно высокие показатели надежности. Первый ремонт необходимо провести через 56982ч. Второй ремонт необходимо провести через 108242ч. В дальнейшем

межремонтные интервалы уменьшаются, вплоть до завершения эксплуатации устройства. На установленный срок службы в 30 лет необходимо провести 5 планово-предупредительных ремонтов. Задачей, решаемой в процессе эксплуатации, является прогнозирование этого изменения [10]. Как видно, ремонты приводят к увеличению остаточного ресурса.

*Таким образом*, показана математическая модель состояния изоляции, связывающая время и вероятность ее безотказной работы с определенными ее параметрами, позволяющая прогнозировать ее состояние и срок службы. Исходя из текущей вероятности безотказной работы определена периодичность планово-предупредительных ремонтов (рис.2). Как только вероятность безотказной работы  $P(t)$  достигает минимально допустимый уровень надёжности  $P_{нд}$ , проводится планово-предупредительный ремонт.

Поскольку восстановить устройство полностью не представляется возможным, вводится коэффициент неполного восстановления  $K_{нв}$ , характеризующий необратимость процессов старения некоторых элементов системы. Как показано в расчетной и моделированной частях, в ходе эксплуатации периодичность ремонтов возрастает, а восстанавливаемая вероятность безотказной работы сокращается.

### Литература

1. Савина Н.В., Степанова О.С. Моделирование состояния изоляции для задач оценки надежности подстанционного оборудования. // Вестник АмГУ. 2008. № 41. С.50-55.
2. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. под ред. С. М. Боровикова. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.



3. Дубяго М.Н., Дубовицкий О.О., Бурьков Д.В. Расчет вероятностных показателей надежности и безопасности изоляции. Информационные технологии, системный анализ и управление // сборник трудов XII Всероссийской научной конференции молодых ученых аспирантов и студентов. Таганрог: ЮФУ, 2014. С.230-237.
  4. Власов Д.А., Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Оценка износа и остаточного срока службы изоляции кабелей. Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2018) // сборник трудов XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, (Таганрог, 5-7 декабря 2018 г.): в 3 т. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2018. Т.2 С. 18-25.
  5. Дубяго М.Н. Полуянович Н.К. Термофлуктуационные процессы в многослойных электроизоляционных структурах кабельных изделий электроэнергетических систем. Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий // сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., почётного профессора ДГТУ Бабичева А.П. (Ростов-на-Дону, 27-28 февраля 2018г.). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. С. 185-189.
  6. Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K., Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015), September 26-27, 2015 in Changsha, China. Published by Atlantis Press. pp. 49-54.
  7. Dubyago M.N. Poluyanovich N.K., Burkov D.V. Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory. Applied Mechanics and Materials. V. 2016. p. 205.
-

8. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем. // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4360/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4360/).
9. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Буланович Д.И. Прогнозирование состояния изоляции и выявление дефектов в кабельных линиях. Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике // Материалы 11-й Всероссийской Научно-технической конференции Чебоксары. Чуваш.: Ун-та, 2018. С. 164-167.
10. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Алгоритм оценивания воздействующих факторов на изоляционные материалы СКЛ. Инновационные технологии и дидактика в обучении // сборник статей международной научно-практической конференции. Том-1. Таганрог: ЮФУ, С. 63-68.
11. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод неразрушающего контроля деструкции и прогнозирования старения изоляционных материалов. // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2017. Таганрог: ЮФУ, 2017. С. 133-140.
12. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges. Applied Mechanics and Materials Vols. 752-753 (2015). pp. 928-933.
13. Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. 2–5 August 2017, Phuket, Thailand IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 229. 2017 URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/229/1/012036/](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/229/1/012036/).
14. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Бурьков Д.В. Разработка метода прогнозирования процесса старения изоляции на основе

термофлуктуационной теории частичных разрядов. Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4377/.

### References

1. Savinov N.V., Stepanov O.S. Vestnik AmGU. 2008. №41. pp. 50-55.
2. Borovikov S.M., Cyrel'chuk I.N., Trojan F.D. pod red. S. M. Borovikova. Raschjot pokazatelej nadjozhnosti radioelektronnyh sredstv. [Calculation of reliability indicators of electronic equipment.] Minsk: BGUIR, 2010. p.68.
3. Dubjago M.N, Dubovickij O.O., Bur'kov D.V. Raschet verojatnostnyh pokazatelej nadezhnosti i bezopasnosti izoljicii. Informacionnye tehnologii, sistemnyj analiz i upravlenie [Calculation of probabilistic indicators of reliability and safety of isolation. Information technology, system analysis and management]. Taganrog: JuFU, 2015. pp. 230-237.
4. Vlasov D.A., Dubjago M.N., Polujanovich N.K. Ocenka iznosa i ostatochnogo sroka sluzhby izoljicii kabelej. Informacionnye tehnologii, sistemnyj analiz i upravlenie (ITSAU 2018) [Assessment of wear and residual service life of cable insulation. Information technology, system analysis and management (IT SAU 2018)] v 3 t. Rostov-na-Donu: JuFU, 2018. T2. pp. 18-25.
5. Dubjago M.N. Polujanovich N.K. Termofluktuacionnye processy v mnogoslojnyh jelektroizoljacionnyh strukturah kabel'nyh izdelij jelektrojenergeticheskikh sistem. Perspektivnye napravlenija razvitija otdelchno-uprochnjajushhej tehnologii i vibrovolnovykh tehnologij [Thermal fluctuation processes in multilayer electrically insulating structures of cable products of electric power systems. Perspective directions of development of finishing and strengthening technology and vibration wave technologies]. Rostov-na-Donu: DGTU, 2018. pp. 185-189.
6. Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K., Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration.

International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015), September 26-27, 2015 in Changsha, China. Published by Atlantis Press.

7. Dubyago M.N. Poluyanovich N.K. and Burkov D.V. Prediction deterioration of insulation process on the basis of partial discharge thermal fluctuation theory. Applied Mechanics and Materials. V. 2016. p. 205.

8. Dubjago M.N., Polujanovich N.K. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4360/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4360/).

9. Dubjago M.N., Polujanovich N.K., Bulanovich D.I. Prognozirovanie sostojanija izoljacji i vyjavlenie defektov v kabel'nyh linijah. Informacionnye tehnologii v jelektrotehnike i jelektrojenergetike [Prediction of the state of isolation and detection of defects in cable lines. Information technology in electrical engineering and electric power]. Chuvash: Un-ta, 2018, pp. 164-167.

10. Dubjago M.N, Polujanovich N.K. Algoritm ocenivanija vozdejstvujushhih faktorov na izoljacionnye materialy SKL. Innovacionnye tehnologii i didaktika v obuchenii [Algorithm for estimating the influencing factors on the insulation materials of power cable lines. Innovative technologies and didactics in training] Tom-1. Taganrog: JuFU, pp. 63-68.

11. Dubjago M.N., Polujanovich N.K. Metod nerazrushajushhego kontrolja destrukcii i prognozirovanija starenija izoljacionnyh materialov [Method of non-destructive testing of destruction and prediction of aging of insulating materials]. Taganrog: JuFU, 2017, pp. 133-140.

12. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges. Applied Mechanics and Materials Vols. 752-753 (2015), pp. 928-933.

13. Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. 2–5

---



August 2017, Phuket, Thailand IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 229. 2017. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/229/1/012036/](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/229/1/012036/).

14. Dubjago M.N., Polujanovich N.K., Bur'kov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017. №3. 2017. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4377/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4377/).