

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.82

О. А. Белов

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ РАЗВИТИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ

Рассматривается процесс формирования постепенного отказа в технических системах. Описана модель для вероятностной оценки возможности появления инициирующего аварийного события или условия, исходной причиной которых становится данное явление. Раскрываются понятия «опасное состояние» и синонимичное с ним (при определенных условиях) «предельное состояние». Исследуются возможные причины наступления предельного состояния, следствием которого является полный вывод изделия из эксплуатации. В частности, изучаются критические параметры, граничащие с предельным состоянием изделия. Установлено, что в процессе функционирования оборудования предельное значение критического параметра может изменяться. Приводится модель формирования постепенного отказа изделия, в которой учитываются возможные причины негативного воздействия на процесс работы оборудования. Отмечается, что вероятность безопасного функционирования объекта по мере износа и старения изделия снижается, в результате чего предельное значение постоянно меняется. Исследование проведено на примере старения изоляции кабелей марок КНРП и НРШМ, наиболее распространенных на кораблях. Приведен расчет вероятности пробоя изоляции кабеля. Доказано, что вероятность изменения критического параметра в сторону предельного состояния наблюдается при условии износа изделия во всех исследуемых вариантах. Все расчеты произведены с учетом требований ГОСТ. Даны рекомендации по обеспечению стабильной работы кабеля и предупреждению его возможного преждевременного износа.

Ключевые слова: опасное состояние, предельное состояние, постепенный отказ, эксплуатация, критический параметр, вероятность, старение изоляции.

Процесс развития параметрических отказов

Фундаментальным понятием теории безопасности является понятие «опасное состояние», переход в которое может нанести объекту ущерб большого масштаба. Одна из причин попадания объекта в опасное состояние – превышение критическим параметром его предельного значения. В этом случае термин «опасное состояние» является синонимом термина «предельное состояние». В ГОСТ 20911-89 [1] оно определяется как «состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы...». Предельное состояние наступает при постепенных отказах.

Постепенные отказы иногда называют параметрическими [2]. Они связаны с износом деталей, узлов, старением изоляционных материалов и другими причинами, при которых характерные параметры постепенно изменяются в сторону предельного значения. С точки зрения безопасности происходит постепенное изменение критического параметра вследствие старения и износа, нарушения процедур ведения технологического процесса, отказа автоматики, контрольно-измерительной аппаратуры, вследствие неготовности средств противопожарной защиты и т. д.

Рассмотрим в общем плане область изменения критического параметра, ограниченную его предельными значениями, в которой объект работоспособен, а его функционирование безопасно (рис. 1).

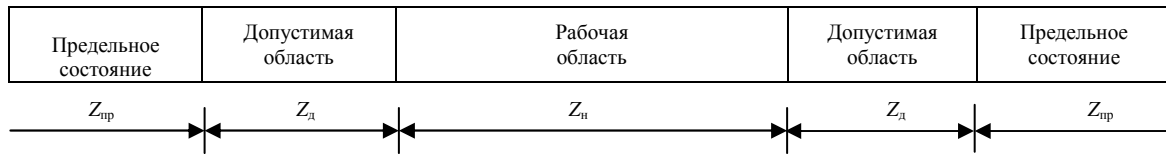


Рис. 1. Область изменения критического параметра

Область изменения параметра включает в себя две допустимые зоны в том случае, если на параметр накладываются двусторонние ограничения. При одностороннем ограничении имеем одну допустимую область. В дальнейшем для краткости рассматривается случай, когда рабочее значение всегда меньше допустимого, а последнее всегда меньше предельного, т. е. $Z_n < Z < Z_{пр}$.

В практике эксплуатации различных объектов, в том числе и корабельных технических средств, для того чтобы не допускать состояние объекта до предельного (опасного) состояния, обычно назначают некоторое промежуточное (допустимое) значение параметра $Z_д$, достижение которого дает информацию о близости предельного значения. Для любого критического параметра можно выделить три области его значений: рабочую, допустимую и опасную. В рабочей области значение параметра всегда меньше допустимого, т. е. $Z < Z_д$. В ней находятся номинальное и текущее значения. Допустимая область расположена между допустимым и предельным значениями, для нее справедливо условие $Z_д < Z < Z_{пр}$. В допустимой области функционирование объекта возможно, но резко повышается вероятность возникновения аварии. В опасной области значение параметра превышает предельное значение. При переходе параметра за значение $Z_{пр}$ всегда наступает предельное, опасное состояние.

Модель формирования параметрического отказа

Рассмотрим модель формирования постепенного отказа в фиксированный момент времени, предполагая, что изменение параметра происходит очень медленно. Значения параметров анализируемого объекта изменяются в пределах рабочей области $Z_n < Z < Z_д$ под воздействием каких-либо из перечисленных выше причин и случайных воздействий. Для определенности предположим, что вероятностное распределение значений параметра подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием m_z и среднеквадратичным отклонением σ_z . В свою очередь, под воздействием детерминированной составляющей m_z и σ_z могут принимать определенные значения в различных условиях эксплуатации, на различных этапах старения и износа и при управляющих и возмущающих воздействиях.

На рис. 2 изображена плотность распределения значений критического параметра в области его возможного изменения. Пунктиром показан закон распределения при математическом ожидании равном номинальному значению параметра ($m_z = Z$), сплошной линией – при $m_z = Z_д$. Для законов, изображенных на рис. 2, $\sigma_1 < \sigma_z$.

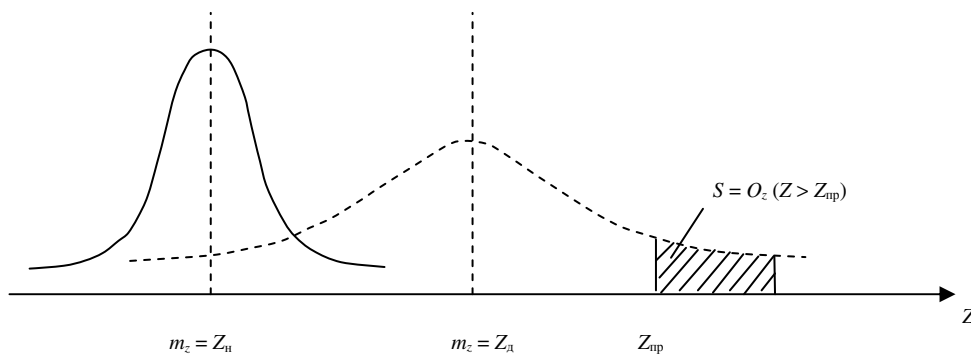


Рис. 2. Плотность распределения значений критического параметра

Из рис. 2 видно, что вероятность выхода значения параметра O_z за пределы $Z_{пр}$ зависит как от m_z , так и от σ_1 . Для законов распределения, изображенных на рис. 2, в первом случае она практически равна нулю, во втором – заштрихованной площади S . Для нормального закона распределения [3], чаще всего используемого при измерениях, вероятность равна:

$$O_z(Z \geq Z_{пр}) = 1 - \Phi\left(\frac{Z_{пр} - m_z}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где $\Phi\left(\frac{Z_{пр} - m_z}{\sigma}\right)$ – функция Лапласа.

Выражение (1) позволяет определить вероятность нахождения параметра в безопасной области $P_z = 1 - O_z$ при любом смещении среднего значения в пределах анализируемой области $Z_n < Z < Z_d$. При изменении среднего значения $m_z = Z_k$ от Z_n до $Z_{пр}$ (Z_k – конкретное значение случайной величины в интервале от Z_n до $Z_{пр}$) значение искомой вероятности уменьшается от 1 до 0,5 (рис. 3).

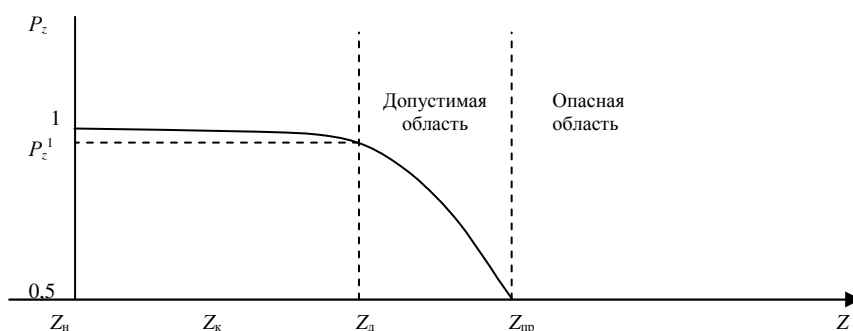


Рис. 3. Определение вероятности нахождения параметра в безопасной области

Метод среднеквадратичного отклонения

Назовем функцию $P_z = f(Z_d)$ функцией параметрической безопасности объекта. Характер изменения функции позволяет оценить вероятность нахождения параметра в безопасной зоне при любом выбранном допустимом значении Z_d параметра. За пределами допустимого значения вероятность безопасного функционирования объекта резко уменьшается, возрастает опасность.

Кроме того, в процессе эксплуатации с течением времени или по другим причинам может изменяться и предельное значение параметра. Этот процесс также может иметь случайную составляющую.

Таким образом, для оценки вероятности появления иницирующего события или условия, причиной которых является постепенное изменение параметра, необходимо знать:

- предельное и допустимое значения параметра;
- закон распределения;
- среднеквадратичное отклонение параметра.

Для наиболее важных параметров предельные и допустимые значения указываются в руководящих документах или в инструкциях по эксплуатации. При отсутствии этих сведений можно воспользоваться известными методами оценки предельного состояния:

- методом испытаний;
- прочностным методом;
- физико-химическим методом.

Закон распределения измеренных величин может быть нормальным, равномерным, треугольным или другим, и точное определение вида закона распределения проблематично.

Однако методическая ошибка в расчетах от неправильного выбора закона распределения лежит в пределах 10–30 %, что вполне допустимо в расчетах безопасности. Учитывая, что использование нормального закона распределения дает наибольший запас в сторону обеспечения достоверности расчетов, примем допущение о приемлемости нормального закона распределения при оценке вероятности возникновения иницирующих условий.

Среднеквадратичное отклонение является параметром закона распределения [4]. Его можно приближенно оценить двумя способами, в зависимости от характера случайных воздействий на значения анализируемого параметра Z .

Сущность первого способа заключается в использовании «правила 3σ » [3]. В этом случае при известных максимальных Z_{\max} и минимальных Z_{\min} значениях случайной величины Z_k среднеквадратичное отклонение равно

$$\sigma = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{6}. \quad (2)$$

Метод интервала неопределенности

Второй способ заключается в использовании интервала неопределенности значения параметра при его измерении с помощью прибора, имеющего класс точности Δ [5]. Если класс точности выражен в процентах от верхнего предела шкалы, интервал неопределенности равен

$$\Delta Z = \pm \frac{\Delta \cdot Z_{\max}}{100}$$

и связан со среднеквадратичным отклонением соотношением

$$\Delta Z = K \cdot \sigma, \quad (3)$$

где $K = 2,066$ – для нормального закона распределения; $K = 2,02$ – для треугольного закона распределения; $K = 1,73$ – для равномерного закона распределения.

Использование второго способа для оценки среднеквадратичного отклонения правомерно в том случае, когда влияние случайных факторов на технологический процесс практически исключено и «точное» знание значения параметра зависит только от погрешности контрольно-измерительного устройства.

Методика оценки технического состояния электрооборудования

Иллюстрацию предложенного подхода к оценке вероятности рассмотрим на примере старения изоляции кабеля.

Кабельные трассы представляют большую опасность для корабля, возрастающую в связи со старением изоляции кабеля. В соответствии с ГОСТ 7866 для нового кабеля сопротивление изоляции должно составлять 100 МОм/км, а предельное значение, при котором допускается эксплуатация электрооборудования, равно 5 МОм/км. В процессе эксплуатации происходит интенсивное старение изоляции кабеля, приводящее к значительному снижению сопротивления изоляции, которое может достигать предельного значения и даже может быть меньше этого значения. При уменьшении сопротивления изоляции возрастают токи утечки, снижающие безопасность личного состава и увеличивающие вероятность пробоя изоляции и образования дуги.

На основе модели формирования постепенного отказа [2] проведем расчет вероятности пробоя изоляции. Для определенности возьмем наиболее распространенные на кораблях кабели марок КНРП и НРШМ и примем следующие условия:

- длина участка кабельной трассы $L = 50$ м;
- начальное значение сопротивления изоляции участка $R = 2000$ МОм;
- предельное значение $R_{\text{пр}} = 100$ МОм;
- срок службы кабеля КНРП по ГОСТ $T_p = 25$ лет;
- срок службы кабеля НРШМ по ГОСТ $T_p = 12,5$ года.

Старение изоляции кабеля как физический процесс описывается выражением

$$R = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где R – сопротивление изоляции кабеля; t – время; A , τ – постоянные.

Пользуясь исходными данными по сроку службы кабеля [6], его начальным и предельным сопротивлением изоляции, находим значения постоянных величин:

- для КНРП – $A = 20 \cdot 10^8$ Ом; $\tau = 8,34$ года;
- для НРШМ – $A = 20 \cdot 10^8$ Ом; $\tau = 5,0$ года.

Отсюда можно определить сопротивление изоляции кабеля с течением времени (табл. 1).

Температурная характеристика изоляции кабеля

Марка кабеля	t					
	0	5	10	15	20	25
	$R, \text{МОм}$					
КНРП	2000	1100	603	331	182	100
НРШМ	2000	737	271	100	–	–

Произведем оценку среднеквадратичного отклонения при измерениях сопротивления изоляции кабеля. Рассмотрим три случая.

1. По требованиям ГОСТ сопротивление изоляции должно измеряться с относительной погрешностью не более 10 %. Тогда, в соответствии с выражением (3), при нормальном законе распределения среднеквадратичное отклонение равно

$$\sigma = 0,05R_{\text{изм}},$$

где $R_{\text{изм}}$ – измеренное значение сопротивления изоляции.

2. Используем интервал неопределенности значения параметра при измерениях с помощью корабельного мегомметра. По паспортным данным класс точности прибора равен 1 % от диапазона измерения. В качестве интервала неопределенности возьмем половину цены деления шкалы. Из-за неравномерности шкалы у прибора изменяется цена его деления и, следовательно, значения среднеквадратичного отклонения будут также изменяться в соответствии с выражением (3).

3. Используем «правило 3 σ » [6]. Принимая в качестве максимального и минимального значений начальное и предельное значения сопротивления изоляции, с помощью выражения (2) получим

$$\sigma = 330 \text{ МОм}.$$

Для расчета вероятности пробоя изоляции и образования дуги на корпус из-за старения кабеля воспользуемся выражением (1), в котором в качестве математического ожидания примем прогнозируемые значения сопротивления изоляции при старении (табл. 2).

Таблица 2

Соотношение параметрических значений

Параметр	Значение		
Значение сопротивления	500–100	100–50	50–25
Цена деления	400	50	5,0
Среднеквадратичное отклонение	100	12,5	1,25

На рис. 4 представлены результаты расчета для трех рассмотренных случаев оценки среднеквадратичного отклонения [7].

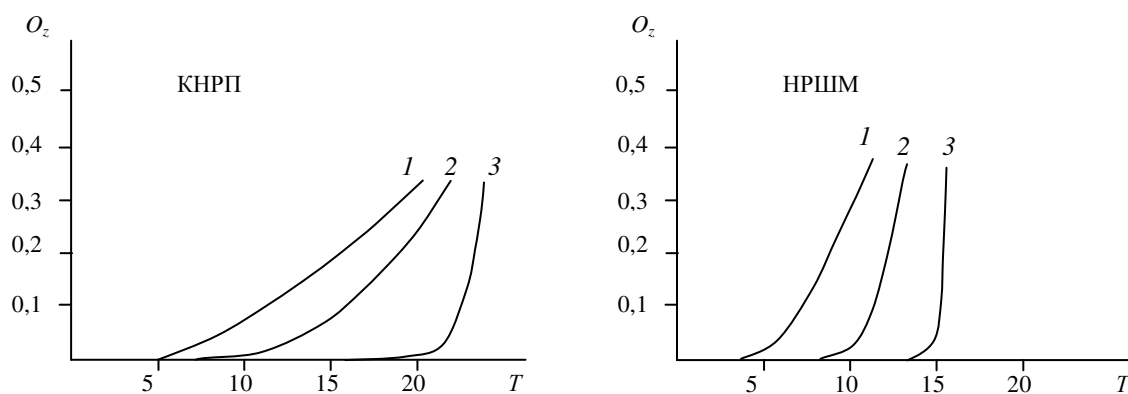


Рис. 4. Оценка среднеквадратичного отклонения

Из рис. 4 следует, что вероятность возникновения короткого замыкания имеет место во всех случаях оценки среднеквадратичного отклонения. Она лежит в интервале между кривыми, обозначенными цифрами 1 и 3.

В первом случае вероятность соответствует требованиям ГОСТ по точности измерения. Однако при использовании корабельных мегомметров эти требования по точности измерения сопротивления изоляции невыполнимы. В третьем случае дана наиболее приближенная оценка среднеквадратичного отклонения в предположении, что под воздействием случайных факторов (нагрев кабеля по каким-либо причинам, повышение влажности в отсеке и т. д.) сопротивление изоляции может колебаться в пределах от начального до предельного значения, а личный состав не предпринимает соответствующих мер (например, по подсушке).

Наиболее реальным следует считать второй случай, который предполагает регулярное измерение сопротивления изоляции с помощью корабельного мегомметра и других средств измерения, контроль изоляции кабеля и его техническое обслуживание.

Заключение

Предложенный подход к оценке состояния технического оборудования был проиллюстрирован на примере старения изоляции кабелей марок КНРП и НРШМ, наиболее распространенных на кораблях. Представлены результаты расчета для трех случаев оценки среднеквадратичного отклонения. Показано, что вероятность возникновения короткого замыкания имеет место во всех рассмотренных случаях.

В первом случае вероятность соответствует требованиям ГОСТ по точности измерения. Однако при использовании корабельных мегомметров эти требования по точности измерения сопротивления изоляции невыполнимы. В третьем случае дана наиболее приближенная оценка среднеквадратичного отклонения в предположении, что под воздействием случайных факторов (нагрев кабеля по каким-либо причинам, повышение влажности в отсеке и т. д.) сопротивление изоляции может колебаться в пределах от начального до предельного значения, а личный состав не предпринимает соответствующих мер (например, по подсушке).

Наиболее реальным следует считать второй случай, который предполагает регулярное измерение сопротивления изоляции с помощью корабельного мегомметра и других средств измерения, контроль изоляции кабеля и его техническое обслуживание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ 20911-89*. Техническая диагностика и контроль технического состояния изделия. Основные термины и определения.
2. *Рябинин И. А.* Надежность, живучесть и безопасность корабельных электроэнергетических систем // И. А. Рябинин, Ю. М. Парфенов. СПб.: ВМА, 1997. 430 с.
3. *Можжаев А. С.* Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем / А. С. Можжаев. Л.: ВМА, 1988. 67 с.
4. *Хенли Э. Д.* Надежность технических систем и оценка риска / Э. Д. Хенли, Х. Кумамото. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
5. *Новицкий П. В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 247 с.
6. *Северцев П. А.* Надежность сложных систем в эксплуатации при наработке / П. А. Северцев. М.: Высш. шк., 1989. 428 с.
7. *Половко А. М.* Надежность технических систем и техногенный риск / А. М. Половко, С. В. Гуров. СПб.: Санкт-Петербург. лесотехн. акад., 1998. 119 с.

Статья поступила в редакцию 22.05.2015

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Белов Олег Александрович – Россия, 683003, Петропавловск-Камчатский; Камчатский государственный технический университет; канд. техн. наук; зав. кафедрой «Электрооборудование и радиооборудование судов»; belof.oa@gmail.com.



O. A. Belov

METHODS OF ESTIMATION OF THE TECHNICAL STATE OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT UNDER THE CONDITIONS OF PARAMETRIC FAILURES

Abstract. The article deals with the process of the gradual failure formation in the technical systems. A model for the probabilistic assessment of the possibility of occurrence of the triggering alarm events or conditions, which are the original cause of this phenomenon, is described. The notions of "dangerous state" and synonymous with it (under certain conditions) "limit state" are explained. The paper studies the possible causes of the limit state, resulting in the complete withdrawal of the product from the exploitation. In particular, it examines the critical parameters, bordering the ultimate state of the product. It is stated that during the operation of the equipment the limit value of the critical parameter may vary. A model of the formation of the gradual phase-out of the product, which takes into account the possible causes of the negative impact on the process of the equipment, is presented. It is noted that the probability of safe operation of the facility as the wear and tear is reduced, whereby the limit value is constantly changing. The study was conducted on the example of the ageing of cable insulation of the brands KNRP and NRSHM, the most common on the ships. The calculation of the probability of breakdown of the cable insulation is given. It is proved that the probability of the change in the critical parameter to the limit state is observed under the condition of wear of the products in all the studied cases. All calculations are made to meet the requirements of State Standard. The recommendations to ensure the stable operation of the cable and prevent its possible premature wear are given.

Key words: unsafe state, limit state, gradual failure, operation, critical parameter, probability, ageing of insulation.

REFERENCES

1. GOST 20911-89. *Tekhnicheskaja diagnostika i kontrol' tekhnicheskogo sostoianiia izdeliia. Osnovnye terminy i opredeleniia* [Technical diagnosis and control of technical state of the product. The basic terms and definitions].
2. Riabinin I. A., Parfenov Iu. M. *Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' korabel'nykh elektroenergeticheskikh sistem* [Reliability, durability and safety of ship electric power systems]. Saint-Petersburg, VMA Publ., 1997. 430 p.
3. Mozhaev A. S. *Obshchii logiko-veroiatnostnyi metod analiza nadezhnosti slozhnykh sistem* [General logical-probabilistic method of the analysis of the complex system reliability]. Leningrad, VMA Publ., 1988. 67 p.
4. Khenli E. D., Kumamoto Kh. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i otsenka riska* [Reliability of the technical systems and risk assessment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 528 p.
5. Novitskii P. V., Zograf I. A. *Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii* [Assessment of the errors of the measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat, 1985. 247 p.
6. Severtsev P. A. *Nadezhnost' slozhnykh sistem v ekspluatatsii pri narabotke* [Reliability of the complex systems in use at life length]. Moscow, Vysshaia shkola, 1989. 428 p.
7. Polovko A. M., Gurov S. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk* [Reliability of the technical systems and anthropogenic risk]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskaia lesotekhnicheskaja akademiia, 1998. 119 p.

The article submitted to the editors 22.05.2015

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Belov Oleg Aleksandrovich – Russia, 683003, Petropavlovsk-Kamchatsky; Kamchatka State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Head of the Department "Electrical and Radio Equipment of Vessels"; belof.oa@gmail.com.

