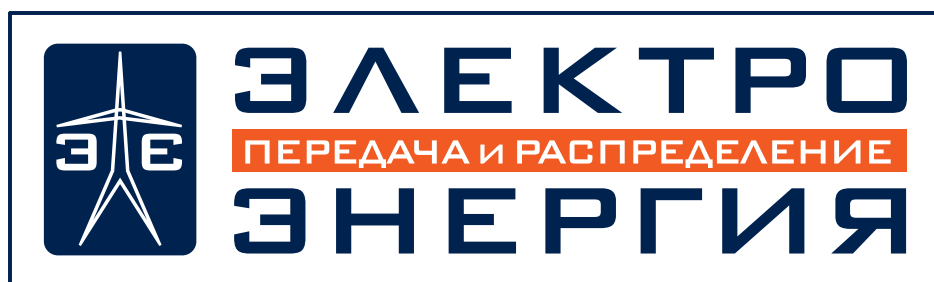


WWW.EEPiR.RU



ЖУРНАЛ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА



Методика оценки вероятности отказов основного электро- сетевого оборудования с учетом его технического состояния

Бердников Р.Н., Гвоздев Д.Б., к.т.н., ПАО «Россети»,
Кузьмин И.А., ПАО «МРСК Северо-Запада»,
Назарычев А.Н., д.т.н., Андреев Д.А., к.т.н., Таджикиев А.И., д.т.н.,
ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»

Аннотация

В статье рассмотрены результаты разработки методики оценки вероятности отказов основного электросетевого оборудования (ЭО) и возможности ее практического внедрения в ДЗО ПАО «Россети» для использования в процессе планирования производственной программы. Методика основана на общих принципах теории надежности в электроэнергетике и на расчете технического ресурса по значению индекса состояния (ИС) оборудования. Предложены математические модели, позволяющие рассчитывать значения вероятностей безотказной работы и отказа для любых вариантов изменения значений ИС ЭО в зависимости от наработки и для любых законов распределения вероятностей. Методика описывает правила и процедуры ее использования персоналом филиалов ДЗО в условиях автоматизации процесса планирования производственной программы.

Ключевые слова:

электросетевое оборудование, техническое состояние, индекс состояния, вероятность безотказной работы, вероятность отказа, система управления производственными активами

В ПАО «Россети» с учетом требований [1] разработана и внедрена методика оценки технического состояния (ТС) оборудования на основе определения интегрального показателя — индекса состояния (ИС) [2]. В 2016 году в результате проведенной в ПАО «МРСК Северо-Запада» научно-исследовательской работы (далее — НИР) «Разработка методологии и технических требований к системам автоматизации прогнозирования вероятности отказа производственных активов» была создана методика оценки вероятности отказов основного электросетевого оборудования с учетом его ТС (далее — Методика). Детальное научно-техническое

обоснование принципов оценки вероятностей отказа и безотказной работы оборудования приведено в вышеуказанной НИР. В настоящей статье приводятся основные положения разработанной Методики, которые определяют порядок и принципы оценки вероятностей отказа и безотказной работы основного электросетевого оборудования в группе компаний ПАО «Россети».

Базовые положения Методики

Основной целью создания Методики является установление единых для всей группы компаний ПАО «Россети» (далее Общество) принципов и методов оценки вероятностей безотказной работы и отказа единиц оборудования (ЕО). Единые методы оценки вероятностей позволяют решать задачи, связанные с проведения бенчмаркинга ДЗО и выявления лучших практик в части реализации системы управления производственными активами (СУПА). Разработанная Методика будет являться одним из инструментов для принятия решения о необходимости воздействия на актив в перспективном, годовом и оперативном горизонтах планирования.

Методика оценки вероятности отказов основного электросетевого оборудования базируется на уже разработанных, внедренных и утвержденных в Обществе алгоритмах, моделях, автоматизированных системах и прочих элементах СУПА, которые должны позволять получить:

- ретроспективную достоверную интегральную оценку ТС оборудования (ИС оборудования);
- усредненные по отрасли и группам оборудования нормированные показатели безотказности, а именно интенсивность отказа ЕО.

Единицей приложения Методики оценки вероятности отказов является группа оборудования (силовые трансформаторы / автотрансформаторы, высоковольтные выключатели, разъединители, воздушные ЛЭП, измерительные трансформаторы и др.). Для всех групп оборудования в Обществе сформированы единые текстовые алгоритмы расчетов индексов технического состояния (ТИС), позволяющие на основании всей совокупности диагностируемых параметров через логические и математические формулы:

- рассчитывать ИС ЕО и многокомпонентных объектов, учитывающий условия эксплуатации оборудования и воздействия на ТС при проведении мероприятия по ТОиР посредством технических параметров, определяемых по результатам диагностики;
- устанавливать рекомендуемые виды необходимых воздействий на ЕО, для обеспечения их нормального функционирования.

Алгоритмы расчета ИС базируются на использовании справочников групп оборудования и других справочников, регламентированных в единой централизованной системе НСИ ПАО «Россети». При этом для реализации Методики отсутствует необходимость в пересмотре и корректировке справочников и классификаторов групп оборудования (например, КОРИС), используемых в единой централизованной системе НСИ для реализации задач, поставленных перед применяемыми в ПАО «Россети» методиками, алгоритмами, моделями, автоматизированными системами и прочими элементами СУПА по оценке ИС и интенсивности отказов основного электросетевого оборудования. При пересмотре алгоритмов расчета ИС и интенсивности отказов оценивается возможность использования существующих справочников НСИ, при необходимости в установленном порядке проводится корректировка НСИ.

Предполагается, что для использования Методики по всем элементам СУПА, предназначенным для расчета по ТИС значений ИС, а также для анализа, хранения и предоставления по нему ретроспективных данных, к ИС должны предъявляться следующие требования:

- *показательность*: ИС должен давать точное представление об общем ТС актива, в том числе в ретроспективе, и возможности продолжения эксплуатации актива;

- **объективность:** ИС должен базироваться на объективных, инструментальных измерениях диагностических параметров, вычислениях, а не на субъективных наблюдениях и предположениях;
- **простота:** ИС должен быть понятным и легко интерпретируемым.

Таким образом, ИС должен достоверно отражать уровень ТС оборудования и его изменение в рамках установленных пределов, а также иметь понятный техни-

ческий смысл и однозначную интерпретацию во всех ДЗО Общества. При этом ТС оборудования является предельным, когда ИС равен 0. Предельному состоянию также соответствует момент полной сработки своего ресурса ЕО, т.е. фактический сработанный ресурс равен нормативному. Состояние ЕО, при котором значение ИС равно 1, соответствует состоянию нового оборудования, эксплуатация которого еще не началась. Для этого оборудования фактический сработанный ресурс равен 0. В процессе эксплуатации ТС ЕО непрерывно ухудшается. При проведении каких-либо воздействий в рамках действующей системы ТОиР происходит улучшение ТС оборудования. Тем не менее, общий тренд изменения ТС ЕО за весь срок его эксплуатации имеет убывающий характер. В некоторых базовых (нормативных) условиях эксплуатации ТС ЕО ухудшается, как запланировано в соответствии с технической документацией заводов-изготовителей на оборудование. В облегченных условиях эксплуатации ТС ЕО ухудшается менее интенсивно, в утяжеленных – более интенсивно, по сравнению с базовыми условиями.

В НИР установлена функциональная взаимосвязь между техническим ресурсом (фактической наработкой), календарной наработкой и уровнем ТС (величиной ИС) для ЕО, а также взаимосвязь между техническим ресурсом и показателями безотказности (вероятности безотказной работы и отказа) [3]. Блок-схема определения вероятностей безотказной работы и отказа оборудования представлена на рисунке 1.

Практически все отказы ЕО можно подразделить на внезапные и износные.

Внезапные отказы происходят под действием различных внезапных факторов, например, таких как: природные воздействия (нерасчетные ветровые нагрузки, ледяной дождь, гололедообразование и др.); вандализм; отказы, вызванные нарушением работы установленных вблизи ЕО и т.п.

Износные отказы обусловлены недопустимым снижением уровня ТС (ИС) ЕО. Износные отказы происходят, как правило, на основе накопления и развития дефектов в процессе эксплуатации, то есть они развиваются постепенно.



* Являются промежуточной расчетной величиной и в данной Методике как самостоятельные показатели надежности не используются.

Рис. 1. Блок-схема определения вероятностей безотказной работы и отказа оборудования

В НИР на основании классической теории надежности в электроэнергетике обоснована оценка вероятностей безотказной работы и отказа ЕО по причине воздействия (или не воздействия) внезапных факторов на основе применения экспоненциального закона распределения вероятностей, где за нормативную интенсивность отказов принята интенсивность отказов оборудования определенного типа и группы, эксплуатируемого в нормативных условиях эксплуатации.

Учет износных отказов обеспечивается приведением фактических условий эксплуатации ЕО к нормативным посредством использования в расчетных выражениях фактической наработки каждой ЕО (фактического сработанного ресурса) вместо календарной наработки.

Для приведения условий эксплуатации применяются разработанные в НИР расчетные выражения, связывающие календарную наработку, фактический сработанный ресурс и значения ИС оборудования. Нормативные значения интенсивности отказов ЕО в первом приближении также определены в рамках НИР для различных групп оборудования. В случае дальнейшего расширения статистических данных по аварийности ЕО на основе наполнения данными ПК «Аварийность», значения интенсивностей отказов подлежат корректировке. При этом в дальнейшем целесообразно сформировать нормативные значения интенсивностей отказов для различных групп оборудования, эксплуатируемого в различных ДЗО с учетом фактических условий и режимов эксплуатации. Рассмотрим далее математические модели оценки вероятностей отказа и безотказной ЕО с учетом различной полноты и состава исходных данных, учетом исследований, проведенных в [4].

Общая модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы оборудования

Нижеприведенная модель является наиболее общей и учитывает все возможные причины и варианты развития отказов ЕО. Вероятность безотказной работы ЕО $P(r)$ в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$, и определяется функциональной зависимостью вида:

$$P(r) = \exp \left(- \int_0^r \frac{1 - S(r)}{1 - S_0(r)} \lambda_0(r) dr \right), \quad (1)$$

где r — календарная наработка (независимая переменная);

$S(r)$ — функция изменения ИС рассматриваемой ЕО в фактических условиях эксплуатации;

$S_0(r)$ — базовая функция изменения ИС рассматриваемого типа ЕО из рассматриваемой группы оборудования в базовых нормативных условиях эксплуатации;

$\lambda_0(r)$ — интенсивность отказов ЕО рассматриваемого типа из рассматриваемой группы оборудования в базовых нормативных условиях.

Вероятность отказа ЕО $Q(r)$ в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$, и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$Q(r) = 1 - \exp \left(- \int_0^r \frac{1 - S(r)}{1 - S_0(r)} \lambda_0(r) dr \right). \quad (2)$$

Вероятность отказа ЕО $Q(r)$ на интервале наработки Δr в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$ и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$Q(r, \Delta r) = \left(1 - \exp \left(- \int_0^{\frac{r+\Delta r}{1-S(r)}} \lambda_0 dr \right) \right) \cdot \exp \left(- \int_0^{\frac{r}{1-S_0(r)}} \lambda_0 dr \right), \quad (3)$$

где Δr — небольшой интервал календарной наработки (независимая переменная) после наработки в объеме r .

Величина $Q(r, \Delta r)$ является дополнительным вспомогательным показателем, который следует использовать при равенстве всех значений остальных показателей, применяемых в СУПА и используемых для принятия решений по поставленному вопросу определения ТС и формирования технологических воздействий на оборудование.

Модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы оборудования при известных постоянных значениях интенсивности отказов (параметра потока отказов)

Существующие системы сбора статистических данных по аварийности в электроэнергетической отрасли, в том числе в ПАО «Россети», позволяют определить численное значение наработки на отказ (параметр потока отказов) для различных типов и групп оборудования.

Согласно теории надежности для стационарного и ординарного потока событий можно принять:

$$\lambda_0 = \omega, \quad (4)$$

где ω — средний параметр потока отказов.

Постоянство интенсивности отказов определяет использование экспоненциального закона распределения вероятностей безотказной работы и отказа. В НИР обосновано применение экспоненциального закона в данной Методике для учета внезапных отказов оборудования.

Вероятность безотказной работы ЕО $P(r)$ в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$ и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$P(r) = \exp \left(- \lambda_0 \int_0^{\frac{r}{1-S_0(r)}} \frac{1-S(r)}{1-S_0(r)} dr \right), \quad (5)$$

где r — календарная наработка (независимая переменная);

$S(r)$ — функция изменения ИС рассматриваемой ЕО в фактических условиях эксплуатации;

$S_0(r)$ — базовая функция изменения ИС рассматриваемого типа из рассматриваемой группы оборудования в базовых нормативных условиях эксплуатации;

$\lambda_0 = \text{const}$ — интенсивность отказов ЕО рассматриваемого типа из рассматриваемой группы оборудования в базовых нормативных условиях.

Если функции $S(r)$ и $S_0(r)$ не известны, то они определяются путем аппроксимации данных по значениям ИС за всю историю эксплуатации ЕО, как это будет показано ниже. Данные должны быть полноценны, то есть соответствовать предъявленным требованиям к расчету ИС.

Вероятность отказа ЕО $Q(r)$ в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$ и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$Q(r) = 1 - \exp \left(- \lambda_0 \int_0^{\frac{r}{1-S_0(r)}} \frac{1-S(r)}{1-S_0(r)} dr \right). \quad (6)$$

Вероятность отказа ЕО $Q(r)$ на интервале наработки Δr в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$ и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$Q(r, \Delta r) = \left(1 - \exp \left(-\lambda_0 \int_0^{r+\Delta r} \frac{1-S(r)}{1-S_0(r)} dr \right) \right) \cdot \exp \left(-\lambda_0 \int_0^r \frac{1-S(r)}{1-S_0(r)} dr \right), \quad (7)$$

где Δr — небольшой интервал календарной наработки (независимая переменная) после наработки в объеме r .

Величина $Q(r, \Delta r)$ является дополнительным вспомогательным показателем, который следует использовать при равенстве всех значений остальных показателей, применяемых в СУПА и используемых для принятия решений по поставленному вопросу определения ТС и формирования технологических воздействий на каждую ЕО.

Выражения (5–7) являются основой математической модели, которая должна применяться при работе с настоящей Методикой.

Модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы оборудования при линейной аппроксимации данных по ИС ЕО

Исследования, проведенные в НИР, показали, что отсутствие полноценных ретроспективных данных по значениям ИС оборудования может являться проблемой на пути использования настоящей Методики в СУПА. Для возможности применения методики в период ее внедрения, апробации, а также накопления необходимых исходных данных по ИС возможно использовать модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы оборудования при известных постоянных значениях интенсивности отказов, применяя линейную аппроксимацию данных по значениям функции изменения ИС $S(r)$ для ЕО:

$$\frac{1-S(r)}{1-S_0(r)} = \frac{m}{m_0}, \quad (8)$$

где m, m_0 — коэффициенты линейной аппроксимации набора данных, предназначенных для получения функций изменения ИС для фактических $S(r)$ и для базовых нормативных $S_0(r)$ условий эксплуатации соответственно.

Вероятность безотказной работы ЕО $P(r)$ в общем случае зависит от наработки r и фактической функции изменения ИС $S(r)$ и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$P(r) = \exp \left(-\lambda_0 \frac{m}{m_0} r \right), \quad (9)$$

где r — календарная наработка (независимая переменная);

$\lambda_0 = \text{const}$ — интенсивность отказов ЕО рассматриваемого типа из рассматриваемой группы оборудования в базовых нормативных условиях эксплуатации.

Вероятность отказа ЕО $Q(r)$ в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$ и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$Q(r) = 1 - \exp \left(-\lambda_0 \frac{m}{m_0} r \right). \quad (10)$$

Вероятность отказа ЕО $Q(r)$ на интервале наработки Δr в общем случае зависит от наработки r и изменения значения ИС по функции $S(r)$ и определяется следующей функциональной зависимостью:

$$Q(r, \Delta r) = \left(1 - \exp \left(-\lambda_0 \frac{m}{m_0} \Delta r \right) \right) \cdot \exp \left(-\lambda_0 \frac{m}{m_0} r \right), \quad (11)$$

где Δr — небольшой интервал календарной наработки (независимая переменная) после наработки в объеме r .

Величина $Q(r, \Delta r)$ является дополнительным вспомогательным показателем, который следует использовать при равенстве всех значений остальных показателей, применяемых в СУПА и используемых для принятия решений по поставленному вопросу определения ТС и формирования технологических воздействий на оборудование.

В первом приближении, в случае отсутствия данных для получения коэффициента m_0 , следует пользоваться соотношением:

$$m_0 = 1/R_0, \quad (12)$$

где R_0 — нормативный ресурс (наработка) ЕО рассматриваемого типа из рассматриваемой группы оборудования.

Принципы определения функциональной зависимости значений ИС от наработки на основе результатов расчета по ТИС

Для определения функциональных зависимостей значений ИС для фактических условий эксплуатации $S(r)$ и для базовых нормативных условий эксплуатации $S_0(r)$ от наработки r по результатам расчетов по ТИС следует использовать методы аппроксимации наборов данных. Перед выполнением аппроксимации данные по ИС следует представить в виде таблицы 1.

Для аппроксимации используются строки 2 и 3 таблицы 1. Аппроксимация выполняется стандартными средствами программного обеспечения общего или специального назначения. К такому программному обеспечению относятся, например, MS Excel, MathCAD, MathLAB и т.п.

В результате аппроксимации должны быть получены функции изменения ИС для фактических $S(r)$ и базовых (нормативных) $S_0(r)$ условий эксплуатации, обладающие определенной достоверностью. Достоверность аппроксимации определяется путем расчета коэффициентов достоверности аппроксимации. Расчет коэффициентов достоверности аппроксимации также осуществляется посредством использования стандартных функций применяемого программного обеспечения. В частности, в случае использования модели оценки вероятностей отказа и безотказной работы ЕО при линейной аппроксимации данных по ИС ЕО, приведенной выше, применяется линейная аппроксимация с расчетом коэффициентов аппроксимации m или m_0 стандартными функциями MS Excel. Коэффициент достоверности аппроксимации при использовании MS Excel получается также автоматически.

Табл. 1. Пример занесения исходных данных для определения функциональной зависимости ИС от наработки

1	Дата	ДД-ММ-ГГГГ	...	ДД-ММ-ГГГГ
2	$S(S_0)$, о.е.	1	...	0
3	r , лет	0	...	...

Принципы определения интенсивности отказов оборудования

Данные по интенсивности отказов собираются классическим способом на основании данных об аварийности в филиалах ДЗО. Определяются средняя наработка на отказ и параметр потока отказов. В НИР обосновано применение экспоненциального закона распределения вероятностей, при котором интенсивность отказов, определяемая для нормативных условий эксплуатации, постоянна $\lambda_0 = \text{const}$. Для стационарного и ординарного потока событий справедливо соотношение (4), когда интенсивность отказов λ_0 и средний параметр потока отказов ω_0 равны. Значения интенсивности отказов для оборудования различных групп сведены в таблицу 2. В том случае,

Табл. 2. Численные значения интенсивности отказов λ_0 для оборудования различных групп напряжением 6–220 кВ

Наименование оборудования	Обозначение и ед. измерения	Значения параметра потока отказов, для оборудования с $U_{\text{ном}}$, кВ					
		6	10	20	35	110 (154)	220
Силовые трансформаторы							
До 2,5 МВА	$\lambda_{\text{т}}$ 1/год	0,016	0,016	0,016	0,010	-	-
2,5–7,5 МВА	$\lambda_{\text{т}}$ 1/год	0,008	0,008	0,008	0,007	0,018	-
10–80 МВА	$\lambda_{\text{т}}$ 1/год	0,012	0,012	0,012	0,012	0,014	0,035
Более 80 МВА	$\lambda_{\text{т}}$ 1/год	-	-	-	-	0,075	0,025
Высоковольтные выключатели*							
Электроматитные	$\lambda_{\text{в}}$ 1/год	0,01 / 0,01	0,01 / 0,01	-	-	-	-
Маломасляные	$\lambda_{\text{в}}$ 1/год	0,003 / 0,007	0,003 / 0,007	0,002 / 0,008	0,014 / 0,016	0,02 / 0,04	-
Масляные баковые	$\lambda_{\text{в}}$ 1/год	-	-	-	0,002 / 0,007	0,005 / 0,011	0,015 / 0,040
Вакуумные**	$\lambda_{\text{в}}$ 1/год	0,001	0,001	0,001	0,001	-	-
Воздушные	$\lambda_{\text{в}}$ 1/год	-	-	0,015 / 0,025	0,004 / 0,016	0,003 / 0,017	0,004 / 0,003
Элегазовые	$\lambda_{\text{в}}$ 1/год	-	-	-	(0,0025 / 0,001)	0,0022 / 0,001	0,0017 / 0,0035
Разъединители	$\lambda_{\text{р}}$ 1/год	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Измерительные трансформаторы							
Трансформаторы тока	$\lambda_{\text{тт}}$ 1/год	-	-	-	-	0,00104	0,00144
Трансформаторы напряжения	$\lambda_{\text{тн}}$ 1/год	-	-	-	-	0,00002	0,00006
Воздушные ЛЭП							
Одноцепные	М $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	-	-	-	0,9	1,3	0,5
	Ж $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	7,6	7,6	(1,40)	0,71	0,7	0,4
	Д $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	7,6	7,6	-	1,5	1,5	0,6
Две одноцепные, проходящие по одной трассе	М $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	-	-	-	(0,61–1,0)	(0,66–0,75)	(0,58–0,68)
	Ж $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	(0,072)	(0,072)	(1,0)	-	-	-
Двухцепные с откл. 1 цепи	М $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	-	-	-	1,1	1,7	0,6
	Ж $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	-	-	-	0,8	1,0	0,5
Двухцепные с откл. 2 цепей	М $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	-	-	-	0,3	0,2	0,1
	Ж $\lambda_{\text{лэп}}$ 1/100 км/год	-	-	-	0,1	0,2	0,1

Примечания
 Обозначение опор: М — металлические; Ж — железобетонные; Д — деревянные.
 * числитель — короткое замыкание, знаменатель — разрыв цепи.
 ** экспертная оценка.

когда численные значения интенсивности отказов λ_0 для рассматриваемой группы оборудования отсутствуют, можно оценить их для конкретного филиала ДЗО на основе экспертного подхода с учетом статистических данных по аварийности ЕО, входящего в рассматриваемую группу. В дальнейшем, в ходе расширения системы и условий сбора статистических данных об отказах, а также в случае разработки иных подходов к определению интенсивностей отказов ЕО, данные, приведенные в таблице 2 о значениях интенсивности отказов для оборудования различных групп, подлежат корректировке.

Требования к периодичности расчетов вероятностей безотказной работы и отказа оборудования

Перерасчет вероятностей отказа и безотказной работы ЕО должен осуществляться в филиалах ДЗО при каждом существенном изменении значений ИС ЕО (или при получении нового значения ИС), включая расчеты до и после проведения каждого текущего, среднего и капитального ремонта. Таким образом, периодичность расчета вероятностей отказа и безотказной работы соответствует периодичности расчета ИС ЕО. Аппроксимация данных по значениям ИС с целью получения функции изменения ИС от наработки, соответственно, также должна выполняться после каждого обновления данных по ИС (получения новых значений, уточнения старых и т.п.). Дополнительно значения вероятностей отказа и безотказной работы следует пересчитывать при изменении остальных данных, в том числе нормативных, входящих в модели определения вероятностей.

Использование результатов оценки вероятностей отказа и безотказной работы для определения воздействия на ЕО

Значения вероятностей отказа и безотказной работы рассчитываются для макроэкономического и укрупненного планирования технического воздействия на производственные активы. Методика позволяет дополнить существующие возможности СУПА введением показателей (вероятностей безотказной работы и отказа) с целью дополнительной оптимизации при планировании воздействий и ранжирования очередности воздействия на производственные активы Общества. Объективные данные о технических параметрах, характеризующих ТС ЕО, получаемые от средств диагностики оборудования, не должны никаким образом противопоставляться расчетным данным по вероятностям отказа и безотказной работы. Разработанная Методика не отменяет и не противопоставляется действующим Методикам оценки ТС и результатам технической диагностики ЕО, а также не отменяет использование и введение каких-либо флагов, показывающих необходимость воздействия на актив.

Порядок оценки вероятности отказов электрооборудования

1. Подготовка исходных данных для каждой ЕО

Основными исходными данными для выполнения расчета вероятностей безотказной работы и отказа ЕО являются сведения о значениях ИС S , S_0 , рассматриваемых ЕО и интенсивности отказов λ_0 для рассматриваемой группы оборудования.

Если известны функции $S(r)$, $S_0(r)$, $\lambda_0(r)$, то дополнительной подготовки исходных данных не требуется. Если какая-либо из указанных функций не известна, то ее следует определить.

Если не известна функция $\lambda_0(r)$, то принимается $\lambda_0(r) = \lambda_0 = \text{const}$ в соответствии со значениями интенсивности отказов λ_0 для различных групп оборудования, приведенных в таблице 2.

Если не известна какая-либо из функций $S(r)$, $S_0(r)$, то их следует определить посредством аппроксимации данных по значениям ИС в соответствии с описанной выше процедурой.

2. Выбор модели оценки вероятностей отказа и безотказной работы

В зависимости от полноты и качества исходных данных следует выбрать модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы.

В случае наличия известных функций $S(r)$, $S_0(r)$, $\lambda_0(r)$ используется общая модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы оборудования по выражениям (1–3).

В случае наличия известных функций $S(r)$, $S_0(r)$, $\lambda_0(r) = \lambda_0 = \text{const}$ (экспоненциальный закон распределения вероятностей) используется модель расчета по выражениям (4–7). Эта же модель используется, когда известны функции $S(r)$, $S_0(r)$, а функция $\lambda_0(r)$ неизвестна. Тогда она может быть принята постоянной $\lambda_0(r) = \lambda_0 = \text{const}$, а ее значение определяется по таблице 2. Модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы (4–7) при известных постоянных значениях интенсивности отказов является основной и должна использоваться после окончания внедрения Методики в СУПА.

На начальном этапе внедрения Методики в СУПА при отсутствии полноценных ретроспективных данных как по интенсивности отказов ЕО, так и по функциям изменения значений ИС от наработки ЕО следует применять модель оценки вероятностей отказа и безотказной работы оборудования при линейной аппроксимации данных по значениям ИС. Интенсивность отказа принимается $\lambda_0 = \text{const}$ в соответствии с таблицей 2.

3. Порядок расчета вероятностей отказа и безотказной работы ЕО

После подготовки исходных данных и выбора модели расчета вероятностей следует определить дату (далее — «дата расчета»), на которую необходимо выполнить оценку вероятностей отказа и безотказной работы.

Для каждой рассматриваемой ЕО должны быть известны:

- функция $S_0(r) = S_{0,EO}(r)$, где $S_{0,EO}(r)$ — известная базовая функция изменения ИС в зависимости от наработки для ЕО;
- функция $S(r) = S_{EO}(r)$, где $S_{EO}(r)$ — известная фактическая функция изменения ИС в зависимости от наработки для ЕО;
- функция $\lambda_0(r) = \lambda_{0,EO}(r)$, где $\lambda_{0,EO}(r)$ — известная функция изменения интенсивности отказов в зависимости от наработки для ЕО (как правило, постоянная величина, принимающая значения из таблицы 2).

Зная дату ввода в эксплуатацию ЕО, следует определить календарную наработку ЕО между датой ввода в эксплуатацию и датой расчета в годах:

$$r = r_{\text{расч}} \quad (13)$$

Дата расчета не может быть ранее даты ввода в эксплуатацию ЕО.

Приведем порядок расчета вероятностей отказа Q и безотказной работы P электросетевого оборудования.

Вероятность безотказной работы $P = P_{\text{расч}}$ для каждой ЕО рассчитывается следующим образом:

1. Выполняется подстановка величин $S_0(r) = S_{0,EO}(r)$; $S(r) = S_{EO}(r)$; $\lambda_0(r) = \lambda_{0,EO}(r)$ в выражения (1) или (5), или (9) в зависимости от выбранной модели оценки вероятностей.
2. Выполняются математические преобразования (интегрирование, упрощения выражений и т.п., в том числе с использованием специализированного математического программного обеспечения).

3. В упрощенное выражение выполняется подстановка в соответствии с выражением (13) и ведется расчет вероятности безотказной работы.
Вероятность отказа $Q = Q_{\text{расч}}$ ЕО рассчитывается так:
4. Выполняется подстановка величин $S_0(r) = S_{0,EO}(r)$; $S(r) = S_{EO}(r)$; $\lambda_0(r) = \lambda_{0,EO}(r)$ в выражения (2) или (6), или (10) в зависимости от выбранной модели оценки вероятностей.
5. Выполняются математические преобразования (интегрирование, упрощения выражений и т.п., в том числе с использованием специализированного математического программного обеспечения).
6. В упрощенное выражение выполняется подстановка согласно выражения (13) и проводится расчет вероятности безотказной работы.
7. Выполнение расчета вероятности отказа $Q = Q_{\text{расч}}$ по п.п. 4–6 следует проводить, если ранее не проводился расчет вероятности безотказной работы $P = P_{\text{расч}}$ по п.п. 1–3. Если расчет проводился и получено расчетное значение вероятности безотказной работы $P_{\text{расч}}$, то выполнять расчет вероятности отказа по п.п. 4–6 не требуется. Вероятность отказа ЕО следует определить по выражению:

$$Q_{\text{расч}} = 1 - P_{\text{расч}}. \quad (14)$$

4. Порядок расчета вероятностей отказа и безотказной работы ЕО на интервале наработки

После подготовки исходных данных и выбора модели оценки вероятностей следует определить дату расчета, после которой необходимо оценить вероятность отказа на заданном интервале наработки:

$$\Delta r = \Delta r_{\text{расч}}. \quad (15)$$

Интервал наработки $\Delta r_{\text{расч}}$ не должен быть слишком большим и не должен превышать 1/10 нормативного ресурса ЕО из рассматриваемой группы.

Для каждой рассматриваемой ЕО должны быть известны:

- функция $S_0(r) = S_{0,EO}(r)$, где $S_{0,EO}(r)$ — известная базовая функция изменения ИС в зависимости от наработки для ЕО;
- функция $S(r) = S_{EO}(r)$, где $S_{EO}(r)$ — известная фактическая функция изменения ИС в зависимости от наработки для ЕО;
- функция $\lambda_0(r) = \lambda_{0,EO}(r)$, где $\lambda_{0,EO}(r)$ — известная функция изменения интенсивности отказов в зависимости от наработки для ЕО (как правило, постоянная величина, принимающая значения из таблицы 2).

Зная дату ввода в эксплуатацию ЕО, следует определить календарную наработку ЕО между датой ввода в эксплуатацию и датой расчета в годах:

$$r = r_{\text{расч}}. \quad (16)$$

Дата расчета не может быть ранее даты ввода в эксплуатацию ЕО.

Вероятность безотказной работы $Q = Q_{\text{расч}}$ для каждой ЕО рассчитывается следующим образом:

1. Выполняется подстановка величин $S_0(r) = S_{0,EO}(r)$; $S(r) = S_{EO}(r)$; $\lambda_0(r) = \lambda_{0,EO}(r)$ в выражения (3) или (7), или (11) в зависимости от выбранной модели оценки вероятностей.
2. Выполняются математические преобразования (интегрирование, упрощения выражений и т.п., в том числе с использованием специализированного математического программного обеспечения).
3. В упрощенное выражение выполняется подстановка в соответствии с выражениями (15) и (16) и ведется расчет вероятности безотказной работы.

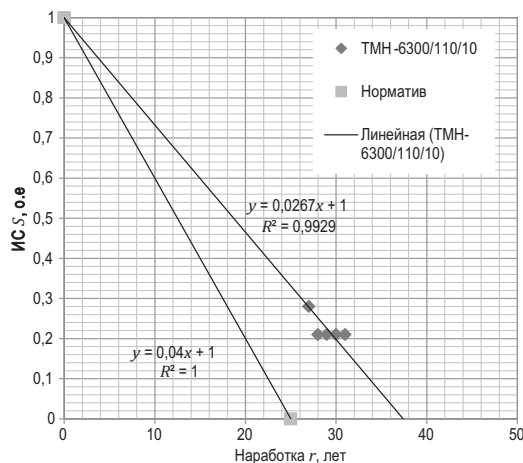


Рис. 2. Формы отображения зависимости функции изменения ИС $S(r)$ от наработки для линейной аппроксимации $S(r)$ для трансформатора ТМН-6300/110/10

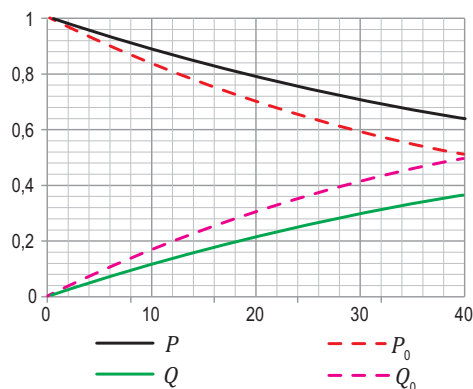


Рис. 3. Формы отображения зависимости функции изменения вероятностей отказа Q и безотказной работы P за календарную наработку r (Q_0 и P_0 для нормативных условий эксплуатации) для трансформатора ТМН-6300/110/10

5. Получение графических зависимостей вероятностей отказа и безотказной работы

Настоящая Методика позволяет получить не только конкретные точечные значения вероятностей, но и построить зависимости вероятностей безотказной работы и отказа от наработки r . Для этих целей в порядке расчетов вероятностей в разделе 3 не следует выполнять п.п. 3, 6, 7, а в разделе 4 — п. 3. В этом случае будут получены функции вероятностей отказа Q и безотказной работы P в зависимости от наработки r или интервала наработки Δr , или от обеих независимых переменных r и Δr .

На рисунках 2 и 3 в качестве примера представлены формы отображения зависимости функции изменения ИС $S(r)$ от наработки, а также вероятностей отказа Q и безотказной работы P для трансформатора ТМН-6300/110/10 за календарную наработку r (для линейной аппроксимации $S(r)$). Подобные зависимости построены в НИР и позволяют расширить применение Методики за счет выполнения не только точечного сравнения значений вероятности, но и на всем рассматриваемом периоде эксплуатации.

С целью внедрения Методики в СУПА и использования ее во всех ДЗО процесс оценки вероятности отказов основного электросетевого оборудования должен быть автоматизирован. Разработаны технические требования к системе автоматизации процессов прогнозирования вероятности отказа ЕО, заложенных в математическую модель разработанной Методики. Средства автоматизации определяются общими требованиями Общества к решению подобных задач.

Выводы

1. Разработана Методология оценки вероятностей безотказной работы и отказа электросетевого оборудования, основанная на общих принципах теории надежности в электроэнергетике и на расчете технического ресурса (фактической наработки) по значению ИС оборудования. Методология содержит подход по определению численных значений вероятностей безотказной работы и отказа для любых вариантов изменения значений ИС оборудования в зависимости от наработки и для любых законов распределения вероятностей.

2. Разработаны математические модели оценки вероятности выхода из строя основного производственного оборудования для использования в процессе планирования производственной программы. Математические модели позволяют рассчитывать вероятности безотказной работы и отказа по каждой единице оборудования для любых значений наработки, а также на некотором интервале наработки при условии, что до него оборудование исправно работало. Частные выражения для определения значений вероятностей безотказной работы и отказа зависят от состава имеющихся исходных данных и принятых при расчете допущений.
3. Разработана Методика оценки вероятности отказов основного электросетевого оборудования для ее передачи во все ДЗО ПАО «Россети» и возможности практического внедрения при совершенствовании реализации СУПА. Методика описывает правила и процедуры использования инструментов разработанной Методологии и математических моделей определения вероятности отказа электросетевого оборудования персоналом филиалов ДЗО в условиях автоматизации процесса планирования производственной программы и формирования приоритизированных списков оборудования, требующего выполнения ремонтных работ в зависимости от фактического уровня его технического состояния.
4. Проведенные исследования позволяют выполнять расчеты вероятностей отказа и безотказной работы для различных групп электросетевого оборудования в зависимости от наработки и технического состояния оборудования, определяемого по значениям ИС, что подтверждает возможность практического применения разработанной Методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Воропай Н.И. и др. М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. 304 с.
2. Бердников Р.Н., Гвоздев Д.Б., Уколов В.В., Новомлинский Э.В. Формализованная оценка технического состояния электросетевого комплекса России / ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 4(37). С. 66–71.
3. Назарычев А.Н., Таджибаев А.И. Управление техническим состоянием электроустановок активно-адаптивных энергетических предприятий. СПб.: ПЭИПК, 2011. 84 с.
4. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2005. 224 с.