



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Министерство энергетики Российской Федерации
ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический
институт повышения квалификации» (ПЭИПК)



1918 – 2018
100 лет ПЭИПК

100 –лет в энергетике России

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ИНДЕКСА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Назарычев Александр Николаевич
Ректор, д.т.н., профессор

Андреев Д.А., к.т.н. главный специалист

Москва 06.12.2018



Основные причины отказов и аварий электрооборудования



- **физический износ;**
- **низкое качество технического обслуживания и ремонта;**
- **несоблюдение периодичности и объема выполнения профилактических мероприятий;**
- **недостаточный уровень использования средств оценки технического состояния и диагностики;**
- **ошибки и недостаточный уровень подготовки персонала;**
- **природно-климатические воздействия;**
- **действия посторонних лиц;**
- **недостатки эксплуатации;**
- **недостатки проектных решений, монтажных и строительных работ;**
- **недостатки конструкции, изготовления.**



Законодательная база по управлению надежностью энергетического оборудования



1. Постановлением Правительства Российской Федерации от 19.12.2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и порядка осуществления мониторинга таких показателей» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2016, N 52, ст. 7665).

2. Приказ Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

3. Приказ Минэнерго России от 25 октября 2017 г. № 1013 «Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики»

4. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Воропай Н.И., Ковалёв Г.Ф. и др. – М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. – 304 с.



Разработка нормативно-методического обеспечения в части развития СУПА



- **Методика оценки интегрального показателя технического состояния (ИПТС).**
- Методика определения последствий отказа электрооборудования (ЭО).
- **Методика определения вероятности отказа оборудования с учетом ИПТС.**
- **Методика расчета ресурса ЭО с учетом ИПТС.**
- Методика оценки уровня риска с учетом ИПТС электрооборудования.
- Методика приоритизации ЭО для целей организации ТОиР и ТПиР.
- Методика оценки стоимости жизненного цикла (ЖЦ) ЭО.
- Методика планирования сроков ТОиР с учетом ИПТС, оценки последствий отказов, рисков и приоритизации ЭО.
- Методика планирования объемов ТОиР с учетом ИПТС, оценки последствий отказов, рисков и приоритизации ЭО.
- Методика расчета затрат на ТОиР.
- **Методика оценки предельных сроков эксплуатации ЭО с учетом ИПТС.**
- Методика планирования объемов ТПиР в части замены ЭО с учетом рисков и стоимости ЖЦ.
- Методика расчета затрат на ТПиР в части замены ЭО.



Существующая методика расчета ИС оборудования



Индекс состояния (ИС) - безразмерная числовая величина, нормируемая к 100 (0 - наихудшее состояние, 100 - наилучшее), характеризующая ТС единицы оборудования.

Значение ИС рассчитывается как взвешенная сумма оценок критериев состояния, которые формируются на основе текстовых алгоритмов индексов ТС.

$$ИС = \frac{\sum_{ij=1}^{ij=n} (V_{ij} * W_{ij} * S_{ij}) * 100}{\left(\left(\sum_{ij=1}^{ij=n} (S_{ij} * W_{ij}) \right) * 4 \right)},$$

где:

ИС – индекс состояния;

V_{ij} – результат оценки критерия;

W_{ij} – весовой коэффициент критерия;

S_{ij} – состоятельность критерия;

n – количество критериев.

1. Процесс оценки параметра заключается в переводе всех числовых и качественных значений параметров, с помощью математических и логических формул, к единой дискретной числовой шкале (от 0 до 4, где 0 - наихудшее состояние параметра, 4 - наилучшее).
2. Выбор параметров, которые участвуют в расчете ИС, осуществляется экспертным образом на основании опыта эксплуатации, обслуживания, ремонта и диагностики конкретных видов и типов оборудования.
3. **ИС - это численный результат оценки ТС оборудования, рассчитанный на основании анализа разницы текущих значений параметров и нормативных.**



Показатели надежности оборудования





Технический ресурс. Нарботка. Продолжительность работы



Техническое состояние (ТС) -

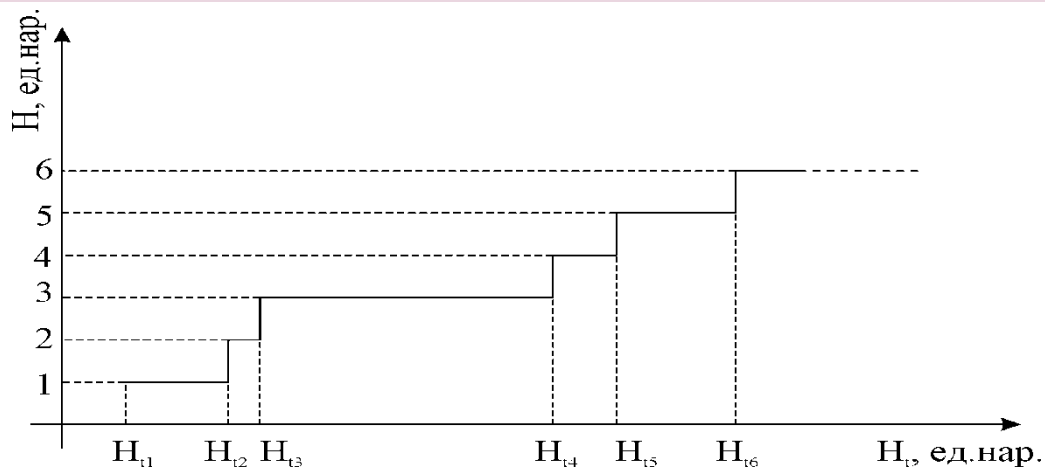
совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией на этот объект.

Технический ресурс – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или после последнего капитального ремонта до перехода в предельное состояние.

Нарботка – продолжительность или объем работы объекта.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, или неустранимого снижения уровня работоспособности, или недопустимого снижения уровня эксплуатации.

Единицы измерения наработки должны:



- учитывать назначение электрооборудования;
- учитывать монотонный характер изменения технического состояния;
- учитывать характер режима работы электрооборудования;
- временные единицы измерения являются универсальными, и переход к ним может быть осуществлен по выражению:

$$H_t = \chi H$$

где H_t , H – наработка во временных и отличных от временных единицах измерения; χ – коэффициент перехода.



Технический ресурс во временных единицах измерения наработки



Технический ресурс трансформатора – это срок работы трансформатора от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние.

Нормативный срок службы трансформатора T_0 – срок службы трансформатора при его работе в нормативных (расчетных, проектных) условиях (известная величина, определяемая из паспорта или технических условий на эксплуатацию).

Нормативный остаточный срок службы трансформатора $T_{0,ост}$ – срок службы трансформатора в нормативных условиях эксплуатации с момента расчета до перехода в предельное состояние.

Фактический срок службы трансформатора T – срок службы трансформатора при его работе в конкретных условиях эксплуатации.

Фактический остаточный срок службы трансформатора $T_{ост}$ – срок службы трансформатора в конкретных условиях эксплуатации с момента расчета до перехода в предельное состояние.

Примечания:

- Нормативный срок службы, Нормативный остаточный срок службы, Фактический срок службы, Фактический остаточный срок службы не следует отождествлять со временем и календарным сроком службы.
- Время является независимой переменной, а указанные величины определяются по выражениям для расчета технического ресурса при использовании временных единиц измерения наработки, т.е. являются расчетными величинами.



Определение технического ресурса, вероятности отказа и предельного срока эксплуатации оборудования на основе оценки ИС

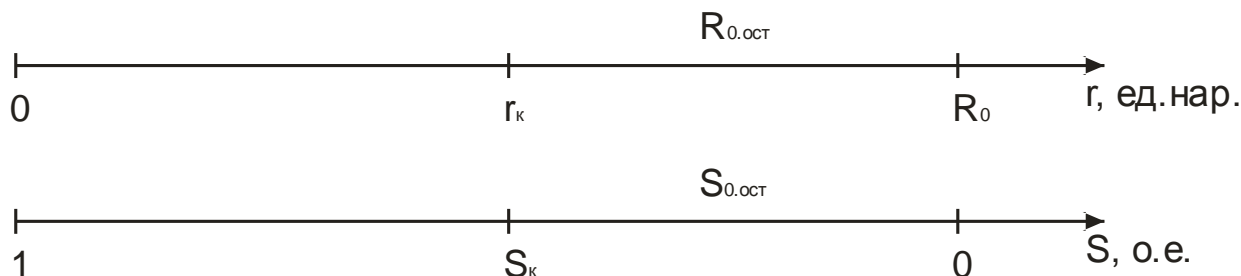




Технический ресурс R и Индекс состояния S



Диаграмма сработки ресурса и соответствующего изменения ИС оборудования для случая эксплуатации в нормативных условиях



- Момент R_0 на оси наработки r , соответствует переходу оборудования в предельное состояние (ИС оборудования S равен 0).
- Интервал наработки равен по объему нормативному ресурсу оборудования R_0 при условии, что оно всегда работало в нормативных условиях, установленных паспортными данными.
- Если оборудование работало в нормативных условиях на интервале от 0 (ИС оборудования S равен 1) до некоторой точки контроля r_k (ИС оборудования равен некоторому промежуточному значению S_k) и соответственно сработало ресурс в объеме r_k .
- Остаточный нормативный ресурс определяется как $R_{0.ост} = R_0 - r_k$ при условии, что после момента r_k на оси наработки r оборудование будет эксплуатироваться также в нормативных условиях (у оборудования имеется некоторый запас по ИС $S_{0.ост}$ до достижения им значения 0 (переход в предельное состояние)).

Нормативный ресурс R_0 – ресурс оборудования при его работе в нормативных (расчетных, проектных) условиях (известная величина).

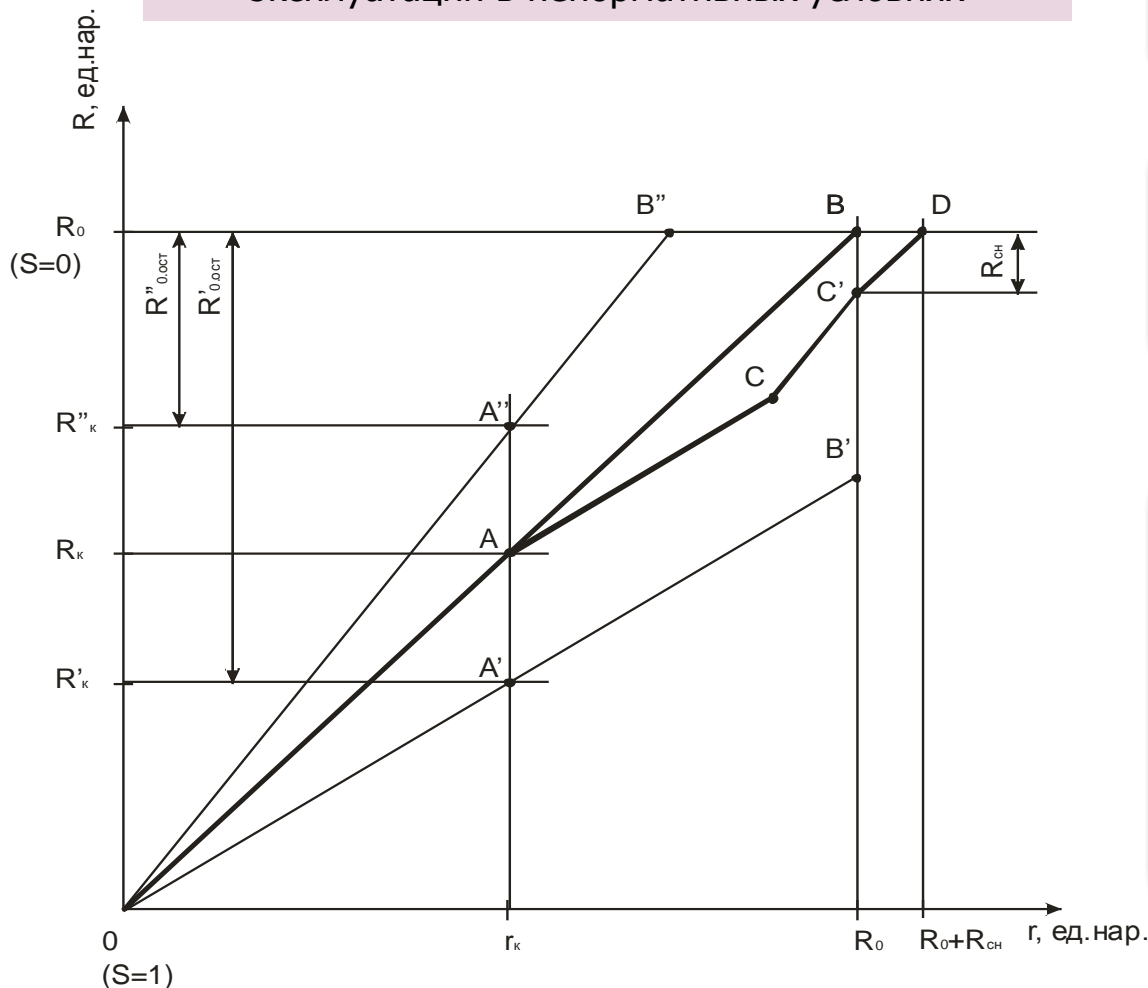
Нормативный остаточный ресурс $R_{0.ост}$ – ресурс оборудования, который оно сможет сработать в нормативных условиях эксплуатации с момента расчета до перехода в предельное состояние



Технический ресурс R и Индекс состояния S



Диаграмма сработки ресурса и соответствующего изменения ИС оборудования для случая эксплуатации в ненормативных условиях



Фактический сработанный ресурс R – ресурс, срабатываемый эл. оборудованием (ЭО) при его работе в конкретных условиях эксплуатации

Фактический остаточный ресурс $R_{ост}$ – ресурс ЭО, который оно сможет работать в конкретных условиях эксплуатации с момента расчета до перехода в предельное состояние

- Фактический технический ресурс ЭО зависит от ТС ЭО.
- Динамика изменения ТС определяется условиями и режимами эксплуатации ЭО.
- Количественно влияние условий и режимов эксплуатации на ТС ЭО определяется значением ИС, определяемого на основании ТИСов по значениям эксплуатационных параметров.



Определение зависимости изменения ИС S и фактически сработанного ресурса R



Общий вид функции ИС в зависимости от наработки и условий эксплуатации:

$$S = f(r, \{X_i(r)\})$$

где r – наработка, $\{X_i(r)\}$ – множество параметров, от которых зависит ИС.

Дифференциальное уравнение для определения взаимосвязи ИС и Технического ресурса

$$\frac{dR}{dr} = \frac{1 - S(r)}{1 - S_0(r)}$$

где $S_0(r)$ – функция изменения ИС оборудования в нормативных условиях эксплуатации; $S(r)$ – функция изменения ИС оборудования в фактических условиях эксплуатации.

Одно из наиболее общих выражений для фактического сработанного технического ресурса на интервале наработки от r_1 до r_2 с учетом оценки ТС оборудования по значению ИС:

$$R_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1 - S(r)}{1 - S_0(r)} dr$$

где R_{12} – фактический сработанный ресурс на интервале наработки $[r_1; r_2]$ в зависимости от значения ИС $S(r)$.



Определение функциональной зависимости изменения ИС S и фактически сработанного ресурса R_k за календарную наработку r_k



На данном этапе, с учетом наличия исходных данных целесообразно использовать линейную аппроксимацию изменения ИС в зависимости от наработки r

$S(r) = m \cdot r + b$ где m, b – коэффициенты линейной аппроксимации

Коэффициент m представляет собой усредненный показатель сработки ресурса за единицу времени, коэффициент b – уровень начальной сработки ресурса оборудования.

Фактический сработанный ресурс R_k за календарную наработку r_k :

$$R_k = \int_0^{r_k} \frac{1 - S(r)}{1 - S_0(r)} dr = \int_0^{r_k} \frac{m}{m_0} dr = A r_k$$

где r_k – календарная наработка в точке контроля; R_k – фактический сработанный ресурс в точке контроля.

Коэффициент A выражает отношение значения ИС оборудования работающего в **фактических условиях** к значению ИС этого же оборудования, работающего в **нормативных условиях**, для наработки в объеме r_k .

Если $A > 1$, то ТС оборудования ухудшается быстрее (утяжеленные условия эксплуатации), если $A < 1$ (облегченные условия эксплуатации), то – ТС оборудования ухудшается медленнее. Если $A = 1$, то оборудование работает в нормативных условиях и его ТС изменяется соответствующим образом (согласно НТД).



Определение функциональной зависимости изменения ИС в зависимости от наработки



Экспоненциальная функция распределения вероятностей при стремлении наработки к бесконечности выходит на некоторую асимптоту. Принимая во внимание, что срок эксплуатации оборудования в любом случае ограничен. Целесообразно определить максимальный фактический сработанный ресурс, до которого возможна эксплуатация оборудования:

$$R_0 = \frac{m}{m_0} R_{\max} \Rightarrow R_{\max} = \frac{-m_0 R_0}{-m} = \frac{1}{m}$$

Выражение актуально, если оборудование эксплуатируется на последующем периоде в точно таких же условиях, как и на предыдущем. После того как значение наработки оборудования достигло R_{\max} , оборудование должно быть выведено из эксплуатации и подвержено комплексному технико-экономическому обследованию для принятия решения о возможных вариантах его дальнейшей эксплуатации или замены.



Значения коэффициентов аппроксимации функции изменения ИС ЭО



Вид ЭО	Тип ЭО	m	m_0
Трансформатор	ТМН-6300/110/10	-0.02670	-0.04
Трансформатор собств. нужд	ТМГСУ11-160/10	-0.02280	-0.04
Выключатель 10 кВ	ВМП-10П-630-20	-0.01850	-0.04
Выключатель 10 кВ	VD-4	-0.14570	-0.04
Выключатель 110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250	-0.02230	-0.04
Выключатель 110 кВ	ВМТ-110Б-25/1250УХЛ1	-0.01170	-0.0357
Разъединитель 10 кВ	РВЗ-10/400 I	-0.01350	-0.0333
Разъединитель 10 кВ	РЛНД-10/630	-0.01010	-0.04
Разъединитель 35 кВ	РНТА-35/125	-0.0081	-0.04
Трансформатор тока	ТФНД-110М-II	-0.02300	-0.0333
Трансформатор напряжения	ЗНОЛП-10 У2 10000/100	-0.16670	-0.04
Трансформатор напряжения	НАМИТ-10-2УХЛ2	-0.05880	-0.04



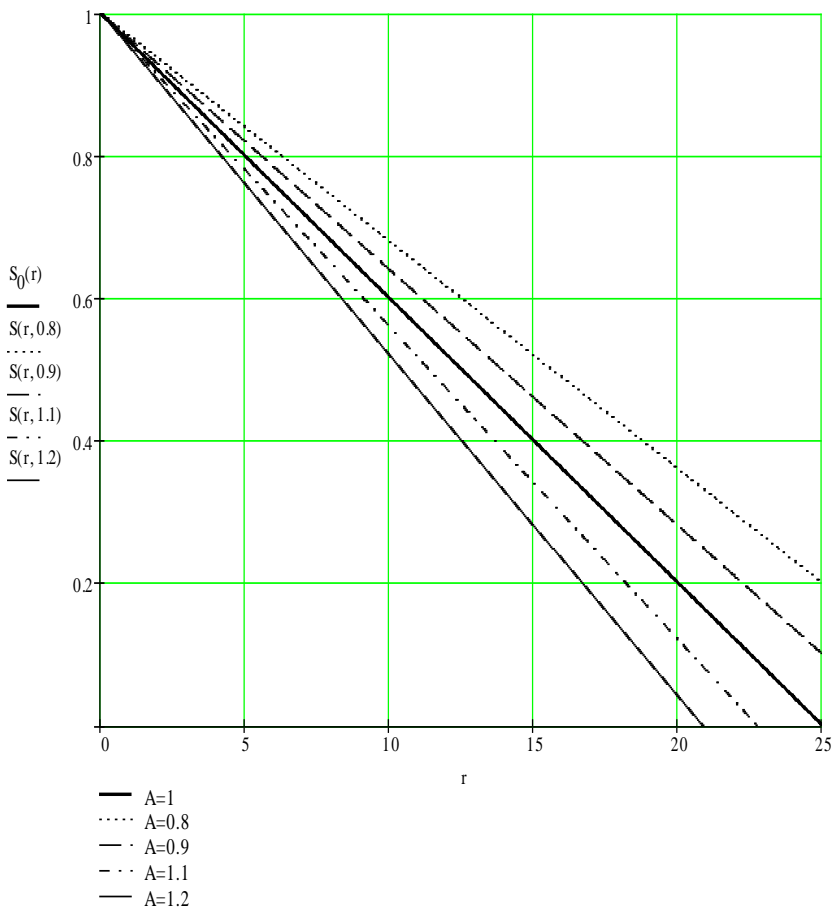
Состав исходных данных, необходимых для определения технического ресурса электрооборудования



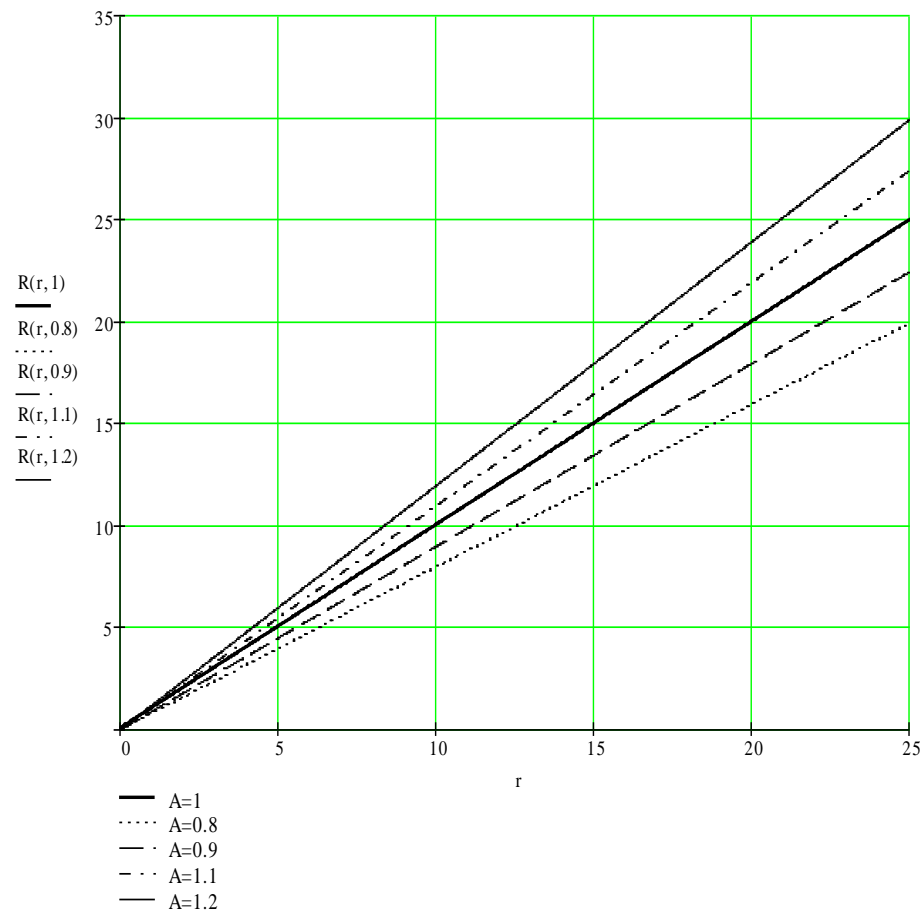
- Паспортные данные электрооборудования;
- Общее количество групп электрооборудования и количества единиц оборудования данного типа в каждой группе;
- **Функция изменения ИС в зависимости от наработки (времени) для нормативных (базовых), утяжеленных и облегченных условий эксплуатации, а также до и после мероприятий по ТОиР;**
- **Технические параметры оборудования, характеризующие его техническое состояние (заполненные ТИС);**
- Даты отказов и восстановлений оборудования;
- Сведения о датах и объемах ТОиР;
- Краткую характеристику режимов и внешних условий эксплуатации (режимные карты);
- Усредненные значения наработки на отказ (интенсивности отказов, параметра потока отказа) по группам и типам оборудования для нормативных (базовых условий) работы.



Пример расчета индекса состояния S и технического ресурса R для линейной аппроксимации функции $S(r)$



Зависимости значений ИС оборудования $S(r)$ от календарной наработки r при различных значения коэффициента A .

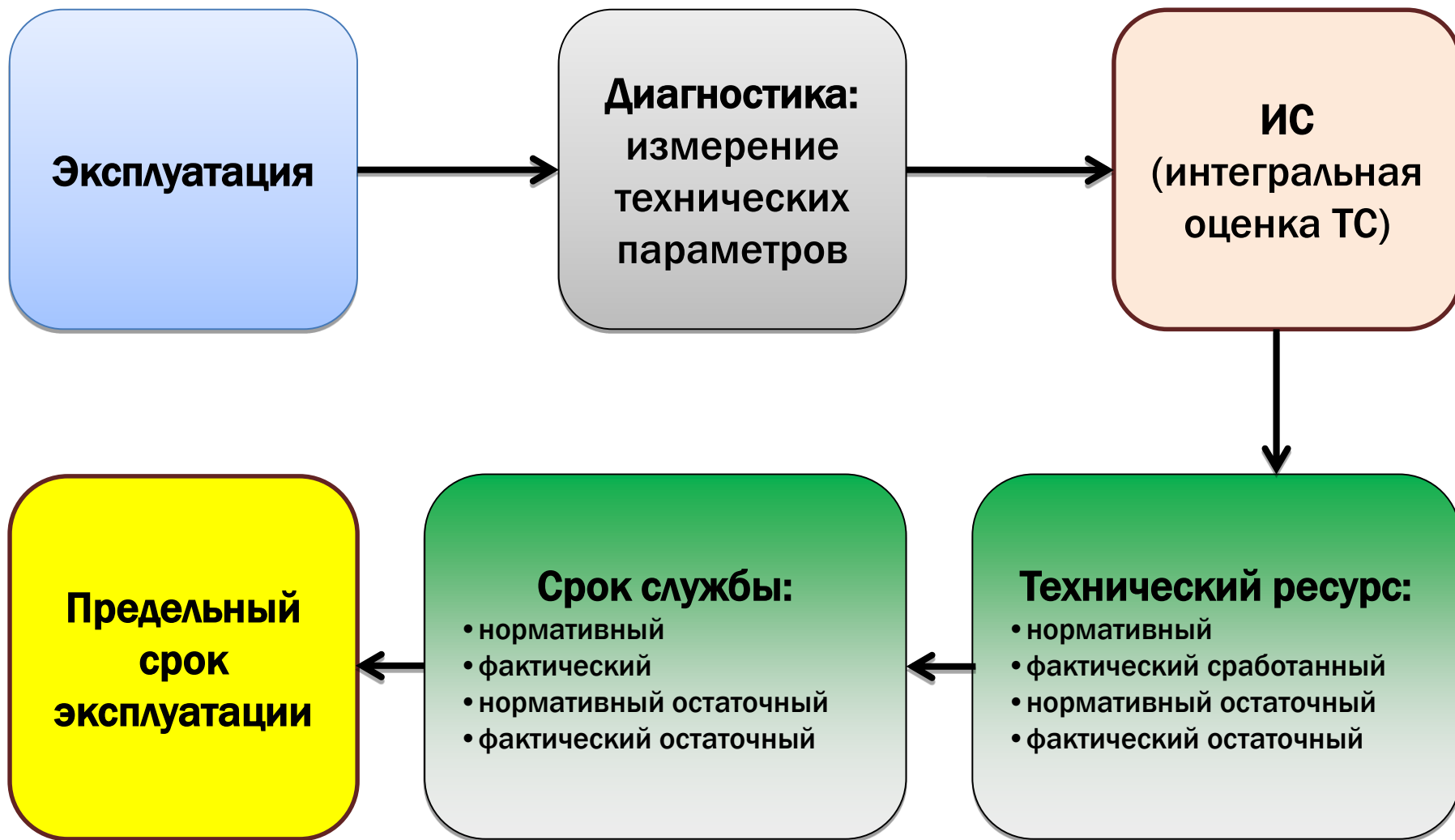


Зависимости фактического сработанного ресурса оборудования R от календарной наработки r при различных значения коэффициента A .

Значение коэффициента $A=1$ соответствует нормативным условиям эксплуатации оборудования



Порядок расчета предельного срока эксплуатации электрооборудования





Определение предельного срока эксплуатации электрооборудования



Предельный срок эксплуатации электрооборудования T_n – это календарный срок службы оборудования от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние с учетом его технического состояния и, соответственно фактических условий эксплуатации.

Фактический сработанный ресурс R за наработку t_k (точка контроля) соответствует фактическому сроку службы оборудования T_k за календарное время t_k . Нормативный остаточный срок службы определяется по выражению:

$$T_{\text{ост.0}} = T_0 - T_k$$

где T_0 – нормативный срок службы электрооборудования

Если далее оборудование будет эксплуатироваться в нормативных условия эксплуатации, то предельный срок его эксплуатации T_n определится следующим образом:

$$T_n = t_k + T_{\text{ост.0}} \text{ или } T_n = t_k + T_0 - T_k$$

Если далее оборудование будет эксплуатироваться в условиях отличных от нормативных, то предельный срок его эксплуатации определится следующим образом:

$$T_n = t_k + T_{\text{п.ост}}$$

$T_{\text{п.ост}}$ – предельный остаточный срок (календарное время) службы оборудования, соответствующий нормативному остаточному сроку службы $T_{0.\text{ост}}$, определяется численными методами из равенства:

$$T_{0.\text{ост}} = \int_{T_k}^{T_{\text{п.ост}} + T_k} \frac{1 - S(t)}{1 - S_0(t)} dt \Rightarrow T_{\text{п.ост}} = \dots$$



Определение предельного срока эксплуатации электрооборудования при линейной аппроксимации функции изменения ИС $S(r)$



Фактический сработанный ресурс R за наработку t_k (точка контроля) соответствует фактическому сроку службы электрооборудования за календарное время t_k .

$$T_k = At_k$$

Нормативный остаточный срок службы определяется по выражению:

$$T_{\text{ост.0}} = T_0 - T_k \text{ или } T_{\text{ост.0}} = T_0 - At_k,$$

где T_0 – нормативный срок службы электрооборудования.

Если далее оборудование будет эксплуатироваться в нормативных условиях эксплуатации, то предельный срок его эксплуатации T_n определится следующим образом:

$$T_n = t_k + T_{\text{ост.0}} \text{ или } T_0 - t_k(1-A)$$

Если далее оборудование будет эксплуатироваться в условиях отличных от нормативных, то предельный срок его эксплуатации определится следующим образом:

$$T_n = t_k + T_{\text{п.ост}}$$

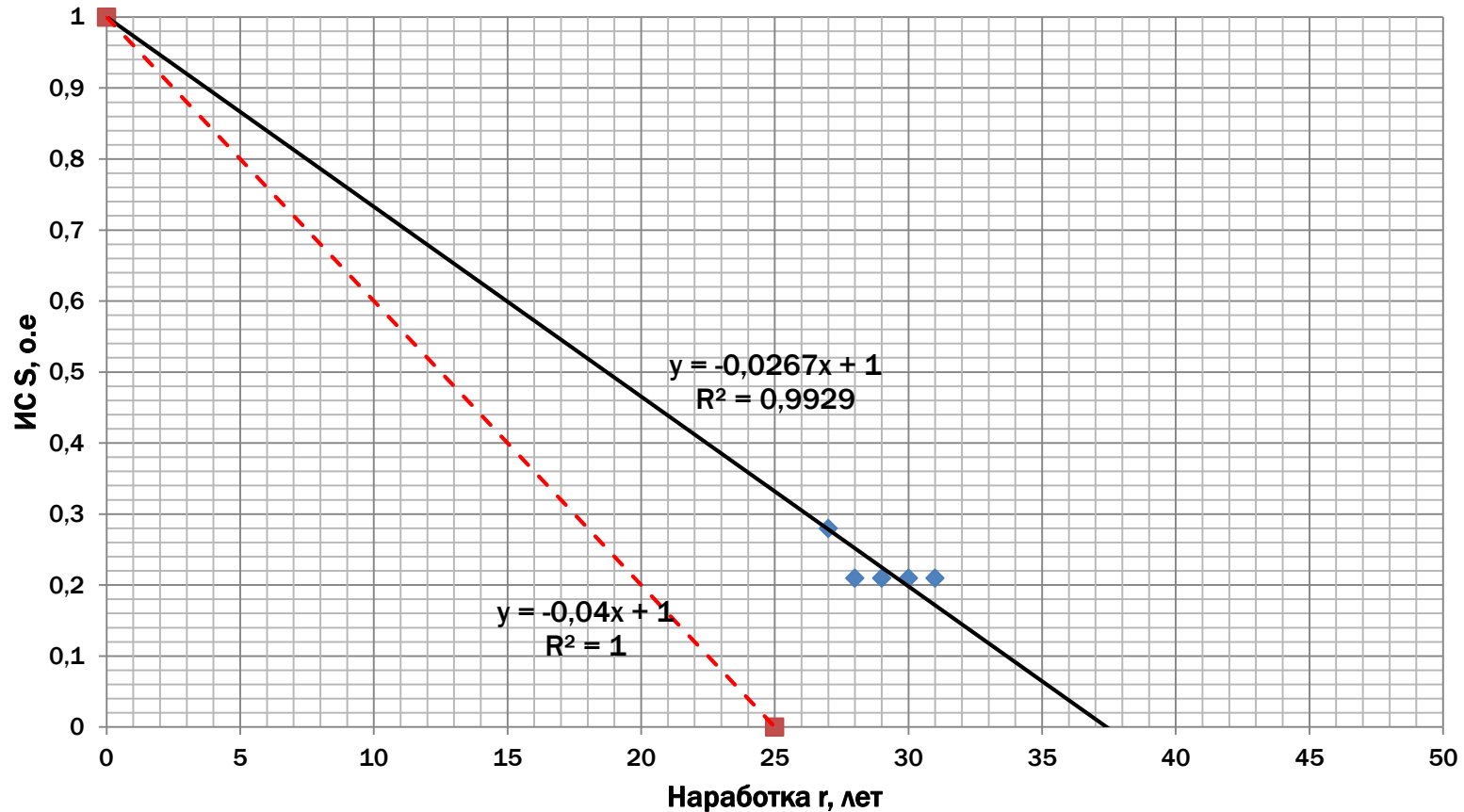
$T_{\text{п.ост}}$ – предельный остаточный срок (календарное время) службы оборудования, соответствующий нормативному остаточному сроку службы $T_{0.\text{ост}}$ определяется:

$$T_{\text{п.ост}} = T_{0.\text{ост}} / A$$

$$T_n = t_k + \frac{T_{0.\text{ост}}}{A}$$



Пример расчета предельного срока эксплуатации трансформатора ТМН – 6300/110/10



Тренд изменения ИС во времени для силового трансформатора ТМН-6300/110/10:

----- нормативный (нормативный срок службы 25 лет);

_____ линейная аппроксимация фактических данных



Пример расчета предельного срока эксплуатации трансформатора



- Допустим, трансформатор отработал 7 лет в нормативных условиях эксплуатации. В этом случае его фактический срок службы равен также 7 лет.
- Если бы трансформатор работал эти 7 лет в утяжеленных условиях эксплуатации при $A=1,1$, то за 7 лет он бы фактически сработал 7,7 года.
- Если бы трансформатор эти 7 лет работал в облегченных условиях эксплуатации при $A=0,8$, то за 7 лет он фактически сработал всего 5,6 года.

Таким образом, **при календарном сроке службы 7 лет для облегченных условий эксплуатации фактический срок службы составляет 5.6 года, для утяжеленных – 7.7 года.**

Если далее трансформатор будет эксплуатироваться в нормативных условиях эксплуатации, то предельный срок службы определится соответственно:

$$T_n = 25 - 5.6 + 7 = 26.4 \text{ года (облегченные условия);}$$

$$T_n = 25 - 7.7 + 7 = 24.3 \text{ года (утяжеленные условия).}$$

Если далее эксплуатация трансформатора будет продолжена в аналогичных облегченных ($A=0.8$) или утяжеленных условиях ($A=1.1$), то необходимо определить предельный остаточный срок службы:

$$T_{n.ост} = (25 - 5.6) / 0.8 = 26.4 \text{ года (облегченные условия);}$$

$$T_{n.ост} = (25 - 7.7) / 1.1 = 15.7 \text{ года (облегченные условия).}$$

Тогда предельный срок службы определится следующим образом:

$$T_n = 24.6 + 7 = 31.6 \text{ лет (облегченные условия);}$$

$$T_n = 15.7 + 7 = 22.7 \text{ года (утяжеленные условия).}$$

Если, например, трансформатор эксплуатировался 7 лет в облегченных условиях ($A=0.8$), а потом будет эксплуатировать в утяжеленных ($A=1.1$), то его предельный остаточный срок службы составит.

$$T_{n.ост} = (25 - 5.6) / 1.1 = 17.6 \text{ лет,}$$

а предельный срок службы соответственно:

$$T_n = 17.6 + 7 = 24.6 \text{ года.}$$



Заключение



Разработана Методика определения предельных сроков эксплуатации электрооборудования на основе использования интегральной оценки фактического состояния – индекса состояния.

Методика объединяет в себе ранее разработанные методики по оценке ресурса и индекса состояния, и позволяет количественно определить предельные сроки эксплуатации электрооборудования в зависимости от фактической наработки с учетом реальных условий и режимов эксплуатации.

Доказано, что на практике для электрооборудования необходимо проводить корректировку нормативного ресурса с учетом реальных условий и режимов эксплуатации, определяя фактические значения сработанного и остаточного технического ресурса.

Расчет предельного срока эксплуатации с учетом изменения индекса состояния позволяет оценить сколько оборудование сможет отработать после окончания нормативного срока службы.

Приведенный пример расчета предельного срока эксплуатации трансформатора подтверждает возможность применения разработанной методики.



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Министерство энергетики Российской Федерации
ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический
институт повышения квалификации» (ПЭИПК)



1918 – 2018
100 лет ПЭИПК

100 –лет в энергетике России

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Назарычев Александр Николаевич

rector@peipk.spb.ru

Тел.: +7(812) 708-48-46

Москва, 06.12.2018