

СТОЙКОСТЬ К ОТКАЗУ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Вдовико В.П., канд. техн. наук

Рассмотрена проблема диагностирования электроэнергетического оборудования. На основании анализа результатов эксплуатации оборудования и его срока службы, физических процессов «старения» сложных микрогетерогенных систем и использования комплексов диагностических параметров контролируемого оборудования предложены характеристики стойкости оборудования к отказу в качестве нового параметра технического состояния. Техническое состояние оборудования определяет количественный показатель стойкости к отказу для случаев эксплуатации без образования развивающихся дефектов и с образованием таких дефектов. Предложены аналитические зависимости и параметры этих зависимостей, отражающие вид оборудования и характеристики дефектов. Применение зависимостей стойкости к отказу позволяют прогнозировать время отказа и остаточный ресурс.

Ключевые слова: электрооборудование; высокое напряжение; эксплуатация; диагностирование; стойкость оборудования к отказу; количественные показатели; срок службы

Срок службы высоковольтного оборудования или эксплуатационный ресурс устанавливаются в ГОСТе или ТУ на оборудование. В зависимости от вида оборудования, изученности его «старения», скрытых дефектов, образующихся при производстве оборудования, и эксплуатационных воздействий фактический срок службы может быть меньше или больше установленного значения. Значения, которые устанавливают нормативно-технические документы, основаны на опыте эксплуатации оборудования и знаниях процессов, которые приводят к изменению свойств и стойкости к отказу.

Если известен закон «старения» оборудования и влияние на него эксплуатационных факторов, приводящих к образованию развивающихся дефектов и, соответственно, уменьшению стойкости оборудования к отказу, представляется возможным аналитически определить его срок службы. Реализация такого подхода к определению фактического срока службы оборудования при образовании в нем развивающихся дефектов представляет собой сложную задачу.

Высоковольтное оборудование подвержено высокому риску образования дефектов, неисправностей и отказов (рис.1). Это оборудование, как никакое другое, подвержено комплексному воздействию сильных электрических, электромагнитных и тепловых полей и электродинамических усилий. В связи с этим образо-

Diagnostics of electric power equipment is considered. Based on analysis of equipment operation results and service life period, physical processes of ageing of complex microheterogeneous systems and usage of diagnostic parameter sets for controlled equipment, characteristics of resistance to failure are proposed as a new parameter of technical condition. Technical condition of the equipment is characterized by quantitative index of resistance to failure for cases of operation both without formation of developing defects and with it. Analytical dependences are proposed as well as their parameters that take into account kind of equipment and character of defects. By applying of the dependences for resistance to failure it will be possible to prognosticate intervals between failures and remaining service life.

Keywords: electric equipment; high voltage; operation; diagnostics; resistance to failure; quantitative indexes; service life period

вание дефектов и их развитие приводит к сокращению установленного срока службы (ресурса), и естественным является принятие мер к устранению появившихся дефектов и особенно недопущения их развития. Если бы не применялось диагностирование обо-

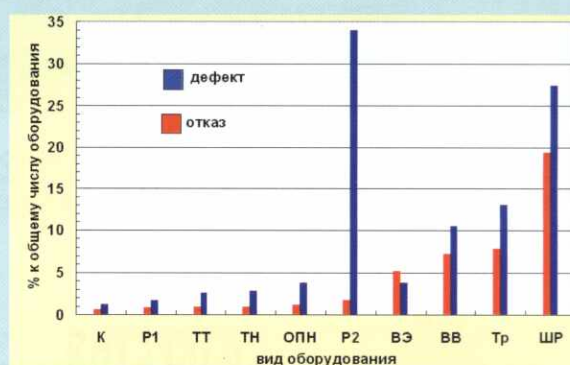


Рис. 1. Распределение отказов и выявленных неисправностей и дефектов у различного вида оборудования

К – конденсаторы связи; P1 – разъединители; TT, TH – трансформаторы тока и напряжения; ОПН – ограничители перенапряжения; P2 – разрядники; ВЭ, ВВ – выключатели элегазовые и воздушные; Тр – силовые трансформаторы; ШР – шунтирующие реакторы.

дования, используя, например, [1], то следовало бы ожидать увеличение числа отказов до (10-20)%.

В электроустановках всегда имеется группа оборудования, в каждом из которых может образоваться и развиваться характерные для него дефекты. Наиболее критичными видами дефектов в элементах оборудования, которые могут приводить в конечном итоге к отказу, являются электрические разряды в изоляции вводов, загрязнение или увлажнение масла или газа, нарушение кинематики устройств РПН, истирание листов стали в отдельных участках пакетов магнитопроводов, нарушение и отсутствие питания вентиляторов и маслососов систем охлаждения и др.

Возможность оценки технического состояния и прогнозирования срока службы рассматриваются многими авторами с использованием методов математической статистики [2-4]. Если обратиться к экспериментальным данным распределения плотности отказов высоковольтного оборудования, например, рис. 2 и 3, то нетрудно увидеть, что функции распределения времени отказов (или срок службы) высоковольтного оборудования не обладают статистической устойчивостью и однородностью. Плотности распределения времени отказов и функции отказов $f(t)$ показывают, что они не являются отражением одной генеральной совокупности явлений «старения» и их использование не представляется возможным для прогнозирования технического состояния и срока службы или приводит к низкой надежности прогнозирования.



Рис. 2. Плотность распределения отказов ШР 500 кВ



Рис. 3. Плотность распределения отказов ТТ и ТН 330 кВ

Когда в электроустановках находится много единиц оборудования и каждая или многие из них имеют свои дефекты, то в условиях эксплуатации задача выделения объекта, имеющего наиболее опасный дефект, является важной задачей как для оценки технического состояния, так и для его контроля. В связи с этим эффективным является применение показателя стойкости к отказу.

Понятие стойкости к отказу $C_{отк}$ включает в себе оценку обеспечения работоспособности объекта в пределах установленного ресурса [5]. При этом такая оценка производится в каждый момент диагностирования объекта с использованием комплекса его диагностических параметров.

Если при вводе в эксплуатацию объекта принять количественное значение показателя стойкости к отказу за 1, то при завершении принятого в НТД эксплуатационного ресурса показатель стойкости к отказу будет равен 0. Следовательно, в период эксплуатации по мере воздействия различных факторов, зная закономерности старения контролируемого объекта, можно определить относительную стойкость к отказу в виде количественного показателя. Показатель относительной стойкости к отказу позволяет определить количественную характеристику снижения свойств контролируемого объекта с выявленным дефектом по сравнению со свойствами объекта без дефекта и прогнозировать время отказа.

Важным обстоятельством в определении количественного показателя относительной стойкости к отказу является определение закона «старения» (или кривой «жизни») объекта в результате внешних воздействий, приводящих к возникновению дефекта в объекте.

В самом общем виде срок службы или время жизни t сложных многокомпонентных систем, испытывающих комплекс различных воздействий, может быть описан следующей зависимостью

$$t = A \cdot b^a, \quad (1)$$

где A – постоянная, определяющая исходное состояние системы,

b – основание показательной функции,

a – степень показательной функции, описывающая характер изменения функции во времени.

Наиболее близкой к описанию функции срока службы высоковольтного оборудования может быть зависимость следующего вида

$$t = A(1 - b^a). \quad (2)$$

Характер изменения функции, описанной формулой (2), зависит от значения a .

Если принять характеристику стойкости объекта к отказу в виде параметра $C_{отк}$, то рассматриваемую функцию (2) можно представить в виде

$$C_{отк}(t) = C_{отк,н} [1 - (t/t_n)^a] \quad (3)$$

где $C_{отк,н}$ – стойкость к отказу в исходном состоянии,

t – текущее времени;

t_n – время наработки до отказа объекта.

При этом под t_n понимается статистический срок службы в области максимальных значений, взятое из данных эксплуатации определенных видов оборудования.

При вводе в эксплуатацию объекта, когда $t = 0$, значение $C_{отк}$ будет равным 1. При завершении эксплуатации, когда $t = t_H$, значение $C_{отк}$ будет равным 0. Таким образом, $C_{отк}(t)$ по существу является функцией времени наработки до отказа и описывает стойкость объекта к отказу. Показатель $C_{отк}$ может быть представлен в виде показателя относительной стойкости к отказу, который указывает на отношение стойкости к отказу в момент t к начальному значению при $t = 0$.

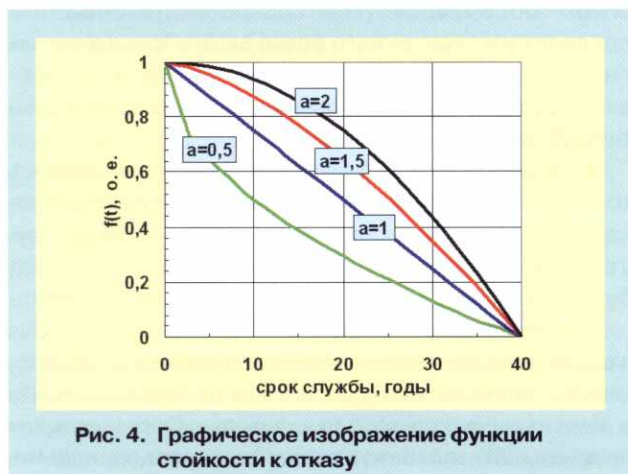


Рис. 4. Графическое изображение функции стойкости к отказу

На рис. 4 показано графическое изображение этой функции при различных значениях показателя a . Многие явления, связанные со скоростью изменения свойств физических объектов, т. е. с временным фактором при воздействии различных условий, описываются подобными функциями.

Зависимости, имеющие показатели $a > 1$, относятся к процессу старения объекта, протекающему медленно в начальный период своей «жизни» и более ускоренно по мере приближения к эксплуатационному ресурсу. Зависимость, имеющая показатель $a < 0,5$, относится к процессу старения объекта, протекающему во времени быстрее в начальный период своей «жизни» и более медленно по мере приближения к времени наработки до отказа или эксплуатационному ресурсу.

Изучая эксплуатационный опыт высоковольтного оборудования, можно утверждать, что ближе всего описывают время жизни показательные функции вида $t = A(1-b^a)$ при $a = 1,3-1,6$. Оптимальным значением (с точки зрения расчетов) следует принять $a = 1,5$. В первоначальный период времени эксплуатации, за исключением «приработочного» периода, не наблюдается быстрый износ оборудования в отличие от зависимости, имеющей показатель $a < 1$. Материалы, срок службы которых описываются зависимостями, имеющими показатели $a > 1$ и $a < 1$, могут иметь в конечном итоге одно и то же время ресурса, $t_{рес}$, если не будет ускоренного старения при возникновении опасных дефектов. Если рассматривать один и тот же объект, представляемый зависимостями при $a = 1,5$ и $a = 0,5$ (рис. 5), то при одновременном образовании дефекта в момент t_d , который приводит к одинаковому ухудшению свойств в виде уменьшения параметра $C_{отк}$ на $dC_{отк}$ и различным значениям прогнозируемых времен

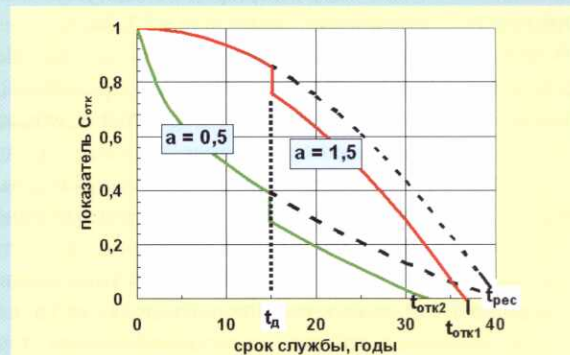


Рис. 5. Графическое изображение функции стойкости к отказу с различными показателями «а» при образовании дефекта

отказа $t_{отк1}$ и $t_{отк2}$. При этом допускается, что после момента t_d сохраняются закономерности старения.

Функцию (3) после момента образования дефекта можно представить в виде

$$C_{отк}(t) = C_{отк.H} [1 - (t/t_H)^a] - dC_{отк} \quad (4)$$

При $C_{отк} = 0$ текущее время будет временем отказа, т. е. $t = t_{отк}$. Следовательно,

$$C_{отк}(t) = C_{отк.H} [1 - (t_{отк}/t_H)^a] - dC_{отк} = 0 \quad (5)$$

и значение $t_{отк}$ будет равно

$$t_{отк} = t_H \cdot (1 - dC_{отк})^{1/a} \quad (6)$$

и остаточный ресурс соответственно

$$t_{ост} = t_{отк} - t_d = t_H \cdot (1 - dC_{отк})^{1/a} - t_d \quad (7)$$

На рис. 6 показаны зависимости срока службы при образовании дефектов в момент времени t_1 и t_2 . Образование дефекта приводит к уменьшению стойкости к отказу, что выразится в снижении значения $C_{отк}$ на $dC_{отк}$. Устранение части дефектов в период t_3 приводит к увеличению относительной стойкости к отказу. Образование дефектов в момент t_4 приводит к уменьшению стойкости к отказу и при неизменности закономерности старения – к определению прогнозируемого времени отказа.

Для определения $t_{отк}$ и $t_{ост}$ требуется знание значений $dC_{отк}$, являющихся функцией измеряемых и нормированных значений диагностических параметров.

Показатель $dC_{отк}$, характеризующий значение уменьшения стойкости к отказу, описывается в виде

$$dC_{отк} = 0,1 \cdot (X_i/X_H)^m, \quad (8)$$

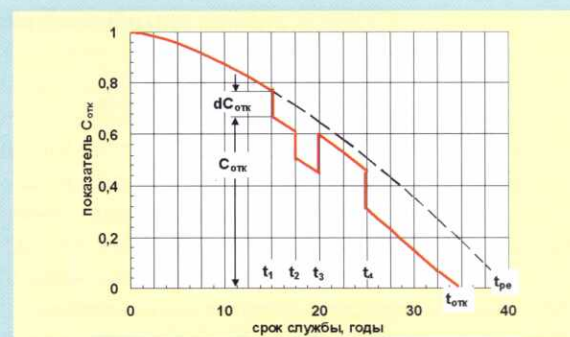


Рис. 6. Графическое изображение функции стойкости к отказу при образовании дефектов и их частичном устранении

где X_i – значение измеряемого диагностического параметра,
 X_H – нормированное значение диагностического параметра,
 m – показатель, определяемый видом физического процесса в контролируемом объекте.

При образовании нескольких дефектов, значения диагностических параметров которых равны или превышают нормированный уровень, показатель $dC_{отк}$ определяется как сумма показателей $dC_{откi}$ каждого дефекта, т. е.

$$dC_{отк} = dC_{отк1} + dC_{отк2} + \dots + dC_{откk} = \sum dC_{откi}. \quad (9)$$

В табл. 1 представлены в качестве примера значения показателя m при определении стойкости к отказу с использованием измеряемых диагностических параметров и их нормированных значений для некоторых видов маслonaполненного оборудования.

Такой подход может быть приемлемым для основного количества оборудования. Но для совершенно новых типов оборудования и для оборудования, срок службы которого приближается к времени ресурса или принятого времени наработки до отказа t_H , определение $t_{отк}$ может приводить к большим ошибкам.

Представляет определенный интерес нахождение относительной стойкости к отказу при отсутствии значения t_H . В этом случае основным критерием выступает динамическая характеристика K_d в виде роста $dC_{отк}$, определяемых в последовательные моменты при установленных интервалах времени диагностирования.

$$K_d = dC_{откi} / dC_{отк1}, \quad (10)$$

где $dC_{откi}$ – изменение стойкости к отказу, зарегистрированное в последнем интервале времени диагностирования,

$dC_{отк1}$ – изменение стойкости к отказу, зарегистрированное в первом интервале времени диагностирования.

Значения K_d , определяющие степень опасности развивающихся дефектов, представлены в табл. 2.

Измерение диагностических параметров и сопоставление их с нормативными параметрами целесообразно производить системой диагностирования в режиме мониторинга.

Техническое состояние любого объекта в виде показателя стойкости к отказу можно установить при разовом и многократном диагностировании. При однократном диагностировании вероятность объективной оценки технического состояния по ряду параметров мала. Это относится прежде всего к выявлению дефектов, развитие которых имеет прерывистый характер. При однократном диагностировании только случайно можно обнаружить дефект. Вероятность надежной и объективной оценки технического состояния повышается по мере увеличения кратности контроля. Это обстоятельство является основанием для введения многократного диагностирования с определенной периодичностью, т. е. мониторинга диагностических параметров. Кроме того, многократное диагностирование с определенной периодичностью позволяет выявлять динамику диагностических параметров и соответственно физических процессов.

Таблица 1
**Измеряемые диагностические параметры X_i
и показатель m**

Измеряемый диагностический параметр, X_i	значение m
Силовой трансформатор и шунтирующий реактор	
Перенапряжение, кратность перенапряжения	1
Ток нагрузки	0,8
Температура верхних слоев масла	0,8
Температура наиболее нагретой точки обмотки	0,8
Влагосодержание масла	1
Концентрация растворенных в масле газов	0,8
Старение твердой изоляции	1,25
Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции Тр или ШР	0,5
Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов	0,5
Ёмкость основной изоляции вводов	1,25
Небаланс токов проводимости трёхфазной системы вводов	1
Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции ввода	1,25
Разность температур на входе и выходе охладителей	0,8
Количество пусков электродвигателей маслonaсосов	1,25
Количество пусков электродвигателей вентиляторов	1,25
Отработанный ресурс электродвигателей маслonaсосов	1,25
Отработанный ресурс электродвигателей вентиляторов	1,25
Количество переключений РПН	1,5
Ток двигателя привода РПН	1,25
Температура масла в баке РПН	0,8
Потери холостого хода, $P_{хх}$	0,25
Полное сопротивление короткого замыкания обмоток, Z_k	0,25
Уровень масла в баке маслорасширителя	0,8
Измерительный трансформатор и конденсатор связи	
Перенапряжение, кратность перенапряжения	1
Влагосодержание масла	1,25
Концентрация растворенных в масле газов	1
Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции	0,8
Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции	0,8
Ёмкость основной изоляции вводов	0,8
Небаланс токов проводимости трёхфазной системы вводов	1
Уровень масла	1
Масляный выключатель	
Температура контактов	0,5
Ток при отключениях	0,8
Влагосодержание масла	0,4
Ёмкость основной изоляции вводов	0,8
Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов	0,8
Небаланс токов проводимости трёхфазной системы вводов	1
Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции вводов	0,8
Количество переключений	1

Таблица 2

**Измеряемые диагностические параметры X_i и динамическая характеристика K_d
для некоторых видов маслonaполненного оборудования**

№ п/п	Измеряемый диагностический параметр, X_i	максимальные значения K_d , соответствующие уровню опасности			
		повы- шенный	высокий	опасный	критиче- ский
Силовой трансформатор и шунтирующий реактор					
1	Перенапряжение, кратность перенапряжения	1,5	2	2	3
2	Ток нагрузки	1,2	1,5	1,5	2
3	Температура верхних слоев масла	1,1	1,2	1,4	1,5
4	Температура наиболее нагретой точки обмотки	1,1	1,2	1,4	1,5
5	Влагосодержание масла	1,5	3,5	4	5
6	Концентрация растворенных в масле газов	1,5	3,5	4	5
7	Старение твердой изоляции	1,1	1,2	1,4	1,5
8	Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции Тр или ШР	1,5	4	8	10
9	Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов	1,2	1,5	1,5	2
10	Ёмкость основной изоляции вводов	1,2	1,5	1,5	2
11	Небаланс токов проводимости трёхфазной системы вводов	1,5	2	2	3
12	Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции ввода	1,5	2,5	3	5
13	Разность температур на входе и выходе охладителей	1,1	1,5	2	3
14	Количество пусков электродвигателей маслonaсосов	1,1	1,5	2	3
15	Количество пусков электродвигателей вентиляторов	1,1	1,5	2	3
16	Отработанный ресурс электродвигателей маслonaсосов	1,1	1,2	2	2,5
17	Отработанный ресурс электродвигателей вентиляторов	1,1	1,2	2	2,5
18	Количество переключений РПН	1	1,1	1,2	1,3
19	Ток двигателя привода РПН	1,1	1,2	2	2,5
20	Температура масла в баке РПН	1,1	1,2	1,4	1,5
21	Потери холостого хода, P_{xx}	1,5	2	2	3
22	Полное сопротивление короткого замыкания обмоток, Z_k	1,5	2	2	3
23	Уровень масла в баке маслорасширителя	1,5	2	2	3
Измерительный трансформатор и конденсатор связи					
1	Перенапряжение, кратность перенапряжения	1,5	2	2	3
2	Влагосодержание масла	1,5	2	2,5	3
3	Концентрация растворенных в масле газов	1,5	2	2,5	3
4	Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции	1,5	2	3	4
5	Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции	1,2	1,5	1,5	2
6	Ёмкость основной изоляции вводов	1,2	1,5	2	2,5
7	Небаланс токов проводимости трёхфазной системы	1,5	2	2	3
8	Уровень масла	1,1	1,2	1,4	1,5
Масляный выключатель					
1	Температура контактов	1,5	2	2,5	3
2	Ток при отключениях	2	3	4	5
3	Влагосодержание масла	1,5	3,5	4	5
4	Ёмкость основной изоляции вводов	1,2	1,5	1,5	2
5	Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции вводов	1,2	1,5	1,5	2
6	Небаланс токов проводимости трёхфазной системы вводов	1,2	1,5	1,5	2
7	Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции вводов	1,5	2	3	4
8	Количество переключений	1,1	1,3	1,5	1,7

Мировая тенденция в области технической диагностики ориентирована на определение технического состояния оборудования с использованием систем автоматического диагностирования оборудования в режиме мониторинга (режим «on-line»), что позволяет добиться следующего эффекта:

- исключение аварийных ситуаций;
- получение значений диагностических параме-

тров, описывающих реально техническое состояние оборудования;

- продление срока службы оборудования в результате своевременного выявления дефектов и их устранения;
- оптимизация режимов эксплуатации оборудования в соответствии с техническим состоянием;
- изменение структуры и уменьшение объема ре-

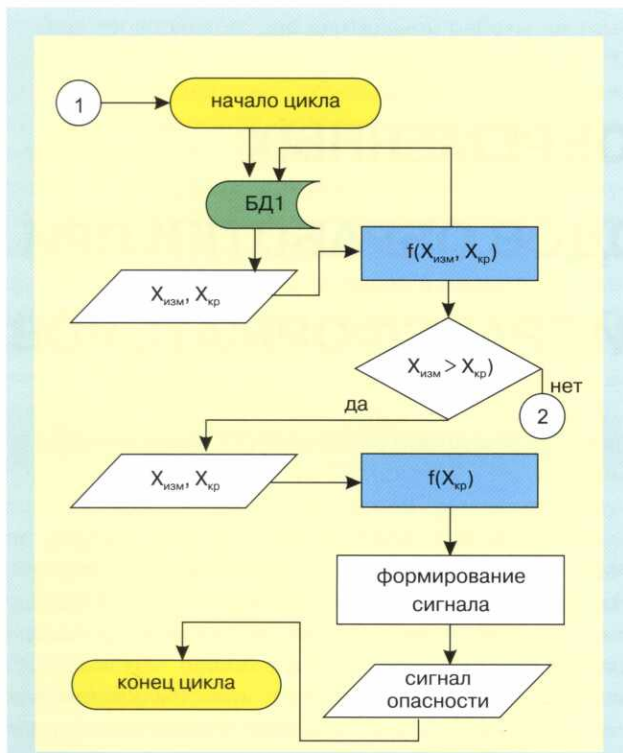


Рис. 7. Структурная схема алгоритма СД 1-го уровня

$f(X_{кр}, X_{изм})$ – блок модели анализа и преобразования параметров;
 $f(X_{кр})$ – блок модели технического состояния;
 БД1 – база данных диагностических параметров

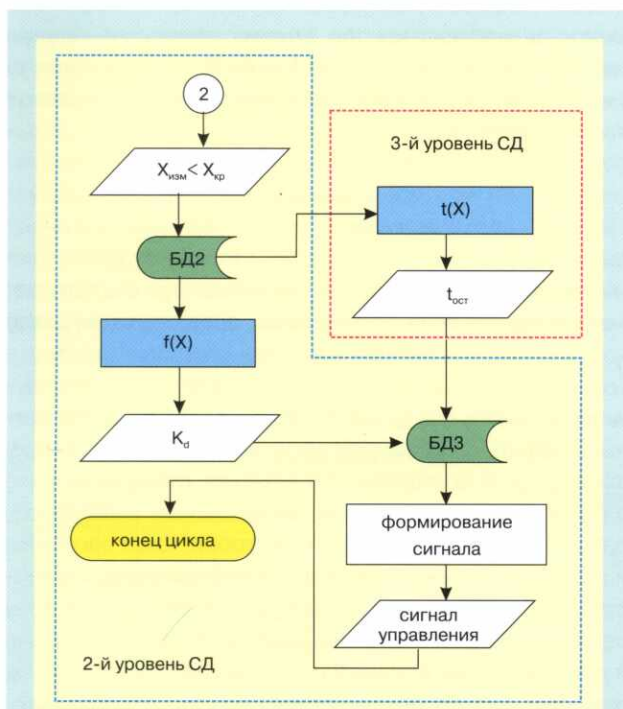


Рис. 8. Структурная схема алгоритма СД 2-го и 3-го уровней

$f(X)$ – блок модели динамических характеристик и развивающихся дефектов;
 $t(X)$ – блок модели параметров старения контролируемого объекта;
 БД2, БД3 – базы данных диагностических параметров

монтажных работ; снижение расходов на проведение ремонтов контролируемого оборудования;

- уменьшение затрат на страхование оборудования;
- сокращение инвестиционных затрат на необоснованное обновление контролируемого оборудования.

Для реализации системы автоматического диагностирования (СД) в режиме мониторинга может быть использован алгоритм диагностирования, представленный на рис. 7 и 8.

Использование зависимостей (3) – (8) и значений m позволяет определить количественную характеристику стойкости объекта к отказу. При этом определяются как снижение свойств контролируемого объекта с выявленным дефектом по сравнению со свойствами объекта без дефекта, так и снижение свойств контролируемого объекта с выявленным дефектом по сравнению со свойствами объекта в начале эксплуатации.

Наиболее эффективным является применение динамической характеристики K_d в виде роста $dC_{отк}$. Во-первых, эта характеристика позволяет определить относительную стойкость к отказу с учетом влияния физических процессов в объекте и эксплуатационных воздействий. Во-вторых, применение этой характеристики позволяет реализовать алгоритм автоматического диагностирования оборудования в системе АСУТП.

Определение количественной характеристики показателя относительной стойкости к отказу позволяет оперативно оценивать техническое состояние контролируемого оборудования не только по отдельному диагностическому параметру, но производить общую оценку технического состояния и прогнозировать время отказа и остаточный ресурс оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования. - РД 34.45-51.300 – 97, 1997.
2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
3. Орлов А.И. Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2006.
4. Ситников В.Ф., Скопинцев В. А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации // Электричество. 2007. № 11.
5. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. - ГОСТ 26883-86, 1986.
6. Техническая диагностика. Термины и определения. - ГОСТ 20911-89, 1989.
7. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. - ГОСТ 27.002-89, 1989.
8. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. М.: Машиностроение, 1987.
9. Афанасьев О. В., Голик Е. С., Первухин Д. А. Теория и практика моделирования сложных систем. С-Пб: Сев.- Зап. ГЗТУ, 2005.
10. Самарский А. А., Михайлов А. П. «Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры». М.: Физматлит, 2005.
11. Меламедов И.М. Физические основы надежности. Л.: Энергия, 1970.
12. Четвергов В. А., Овчаренко С. М. Физические основы надежности. Омск: ОГУПС, 2002.
13. Глушенко П. В. Техническая диагностика. М.: Вузовская книга, 2004.

Вдовико Василий Павлович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий эксперт ООО «Энергетика. Микроэлектроника. Автоматика» +7(383) 2642581 wp@ema.ru