

**О. В. Абрамов, Б. Д. Борисов, Н. В. Киншт,  
Н. Н. Петрунько, Г. М. Собстель**

*(Владивосток – Новосибирск)*

### **ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ МОЩНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПО ПОЛЯМ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Исследована возможность комплексного использования различных видов собственных излучений высоковольтного электроэнергетического оборудования в качестве диагностических сигналов при оценке и прогнозировании технического состояния высоковольтного оборудования (ВВО) под рабочим напряжением. Рассмотрена задача индивидуального прогнозирования состояния электроэнергетического оборудования. Исследованы методы и алгоритмы ее решения в условиях дефицита информации о статистических свойствах возможных состояний. Сформулированы требования к многоканальной системе сбора, ввода и обработки в ПК сигналов сенсоров собственных излучений ВВО.

**Введение.** Одной из основных задач электроэнергетики является поддержание работоспособности электрооборудования после расчетного срока службы (25–30 лет). Высоковольтное оборудование (ВВО) (автотрансформаторы, трансформаторы напряжения и тока, выключатели класса напряжения 110 кВ и выше) является основным элементом в системах силового преобразования энергии. Как показывает опыт, существующие методы профилактического контроля и диагностики элементов оборудования (ЭО), такие, как измерение температуры масла, давления в герметичных вводах, интенсивности газовыделения, определение уровня и степени увлажнения масла в измерительных трансформаторах, не могут с полной достоверностью определять и прогнозировать состояние объектов контроля. Требуется создание новых или улучшение существующих технологий профилактического контроля производительности, безопасности и качества. При этом основными являются методы диагностики, которые обеспечивают контроль текущего состояния оборудования на месте его установки под рабочим напряжением и в процессе нормальной эксплуатации, т. е. функциональное диагностирование [1]. Одним из эффективных методов диагностирования является дистанционный мониторинг полей (электромагнитных, акустических и тепловых), излучаемых мощными энергетическими установками, а также параметров выделяемых ими газовых сред. Современное состояние такого подхода характеризуется освоением новых областей спектрального диапазона, использованием дистанционного контроля и автоматизацией мониторинга в целом [2, 3].

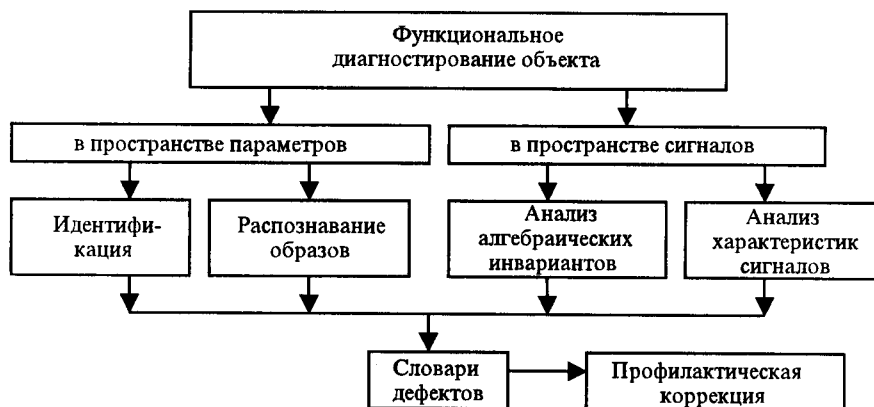


Рис. 1

На рис. 1 представлена схема классификации методов функционального диагностирования. В работе [4] детально рассмотрены методики диагностирования в пространстве сигналов, однако можно отметить, что практический интерес вызывают методики диагностирования в пространстве параметров полей, излучаемых объектом, которые можно использовать при создании систем технической диагностики ВВО.

**1. Диагностические поля и их сенсоры. 1.1. Электромагнитные излучения.** Собственное электромагнитное излучение высоковольтного оборудования (ЭМИ ВВО) является отражением электромагнитных процессов в электроэнергетическом оборудовании. Эти процессы в основе своей имеют несколько составляющих. Первая из них, ведущая, составляет 50 Гц. Вторая, релаксационная, утверждает некоторую периодичность в процессах заряда и разряда. Третья, стохастическая, с собственным высокочастотным ЭМИ ВВО, которое генерируется в естественных режимах его работы, непосредственно связана с первичным электрофизическим процессом, характеризующим изменение качества изоляции при эксплуатации оборудования под рабочим напряжением. Источником высокочастотных ЭМИ являются электрические разряды, возникающие как при нормальной работе оборудования, так и при деградации изоляции и других конструктивных элементов [5]. В частности, время протекания тока частичного разряда (ЧР) оценивается порядком  $10^{-8} - 10^{-9}$  с, и, следовательно, верхняя часть диапазона частот собственных ЭМИ ВВО простирается до сантиметровых волн (порядка  $10^{10}$  Гц). Учитывая, что наиболее быстропротекающим процессом является искрообразование ЧР, его спектр можно условно считать несущим, а остальные процессы – модулирующими. Основные свойства сигналов ЭМИ как функций времени исследованы в [5].

Зона излучения спектра ЧР находится в области высоких частот. Если импульсы имеют различные амплитуды и постоянные времени, то спектр ЭМИ, порожденный серией импульсов ЧР, имеет полимодальный характер. Период релаксационного процесса ЧР может составлять величину порядка единиц или десятка секунд. Ясно, что при этом и спектр ЭМИ будет обладать периодичностью того же порядка. Можно констатировать, что некоторые из свойств спектров собственных ЭМИ, предсказанных на основе анализа физических процессов в оборудовании, явно наблюдаются на практике, а именно спектры обладают периодичностью с частотами порядка нескольких се-

кунд и элементами полимодальности, свидетельствующими о закономерностях следования серий импульсов ЧР.

Экспериментальные исследования собственных ЭМИ ВВО в реальных производственных условиях под рабочим напряжением проводились в течение 1997–2002 гг. на различных подстанциях (ПС) сетей ОАО «Дальэнергосбыт» РАО «ЕЭС России».

Полевой измерительно-вычислительный комплекс включал в себя направленную антенну, спектромонитор PROMAX и ПЭВМ. Спектромонитор позволяет обозревать спектр сигнала в двух диапазонах 40–170 и 160–460 МГц с частотой смены кадров 50 Гц, производить аналоговую обработку высокочастотного сигнала и с частотой 50 Гц выдавать спектр наблюдаемого сигнала на экран и аналоговый выход. Полученный аналоговый сигнал передается на ПЭВМ, где он воспринимается как звуковой, обрабатывается программой SOUND-FORGE и хранится в формате wav-файла. Запись информации производится с частотой 44 кГц. Одновременно ПЭВМ служит устройством для оперативного хранения информации. Запись 1 мин сигнала в формате wav занимает около 3 Мбайт памяти. После сбора информации на реальном объекте ПЭВМ подключается к стационарной ПЭВМ, где эта информация может пополнять базу данных и обрабатываться.

На рис. 2 приведено трехмерное изображение зависимости зарегистрированного спектра ЭМИ шунтирующего реактора (500 кВ) от времени (съемка одного кадра спектра в течение 30 с). На рисунке по оси  $Y$  отмечена интенсивность спектра (в безразмерных логарифмических единицах), по оси  $X$  показаны номера точек в диапазоне частот 40–170 МГц, по оси  $Z$  расположены номера кадров, использованных при построении рисунка. Первые же эксперименты позволили выявить некоторые явно выраженные характерные свойства спектров ЭМИ ВВО, в частности предполагаемую периодичность спектра порядка нескольких секунд, его сильную полимодальность и дисперсионность (рис. 3). На основе анализа экспериментов в реальных производственных условиях можно выделить следующие группы диагностических параметров:

а) интегральные характеристики спектра или его фрагментов (средняя энергия спектра, частотный диапазон, амплитуды, полимодальность, изменчивость спектра во времени (тренд));

б) свойства детектированного сигнала (диапазоны или частоты наблюдения характерных сигналов (огигающих), в том числе в инфранизком частотном диапазоне, уровень детектированного сигнала, глубина модуляции, характер сигнала в акустическом поддиапазоне).

Предложенные классификационные признаки закладываются в методику регистрации и оценки собственных ЭМИ ВВО.

Имея в виду создание базы данных ЭМИ ВВО, ориентированной на сравнительный анализ как ЭМИ, так и технического состояния элементов оборудования, необходимо выделить особенности и проблемы такого подхода. Основная особенность методики диагностирования заключена в том, что шумы ЭМИ используются и классифицируются как информационный «сигнал» о состояниях ЭО на фоне других шумов-помех с помощью изложенной в разд. 3 методик обработки зарегистрированных параметров. Главной проблемой при этом является практическое накопление представительной статистики параметров, отражающих состояния ВВО, особенно предаварийных, и составление словаря дефектов.

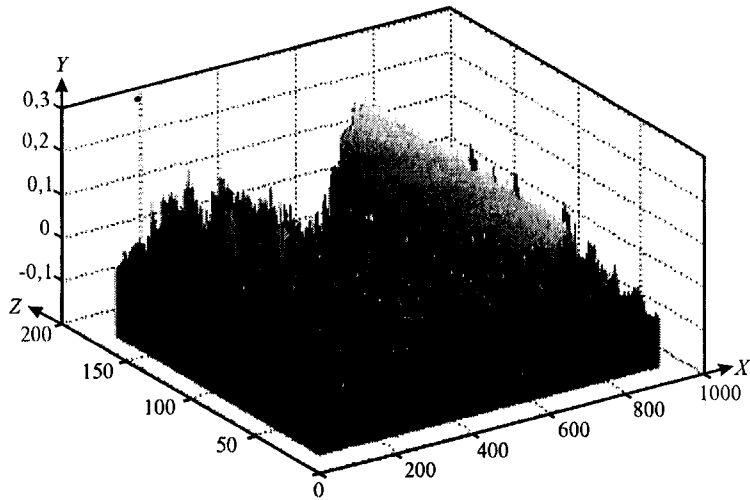


Рис. 2

1.2. *Акустические поля* генерируются и как интерференция вибраций элементов высоковольтных установок на промышленных частотах и их гармониках, и как суперпозиция шумов акустического диапазона частот. Из полученных спектрограмм видно, что детектирование огибающей спектра ЭМИ и выделение периодов инфранизких колебаний в инфразвуковом диапазоне также являются потенциальными диагностическими параметрами. Кроме того, механические дефекты, в частности ослабление креплений и деформации обмоток, могут вызывать вибрации в акустическом диапазоне частот.

1.3. *Свойства газов*, которые являются продуктом химических реакций при больших термических градиентах и электрических пробоях в таких средах, как трансформаторные масла и материалы изоляций, также могут служить диагностическим признаком. Современная техника дистанционного

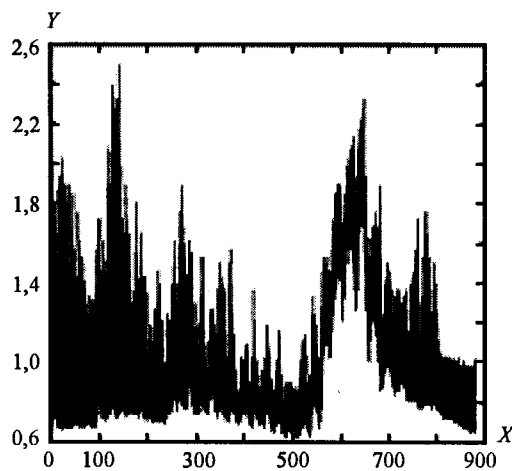


Рис. 3

контроля признаков (концентрации, газового состава) в замкнутых объемах через оптически прозрачные окна или световоды с помощью лидаров хорошо развита [6]. Регистрация превышения локальной ПДК по каждой контролируемой газовой компоненте может служить либо бинарным, либо метрическим диагностическим признаком.

1.4. *Температурное поле* отдельных ЭО может служить диагностическим параметром в ИК-диапазоне и дистанционно контролироваться тепловизорами.

1.5. *Размерный контроль и измерение перемещений ЭО* также можно использовать для получения таких диагностических параметров, как изменение диаметров и профилей силовых кабелей или перемещение шин и других конструктивных элементов ВВО в критических точках контроля. Дистанционные оптические, в том числе прецизионные лазерные [6], устройства могут интегрироваться в сенсорные системы мониторинга ВВО, которые, в свою очередь, связаны с многоканальной системой сбора данных.

2. **Многоканальная система сбора и ввода** в ПК сигналов сенсоров [7]. Характер задач диагностирования требует хорошо структурированной системы сбора и обработки данных контроля полей излучения. На нижнем уровне сбор данных с объекта производится системой стационарных и передвижных комплектов сенсорного оборудования, снабженных устройствами дистанционного считывания, кодирования и буферизации. Ядром системы сбора является рабочая станция, интегрированная в общую систему мониторинга ПС. На основе станции может формироваться автоматизированное рабочее место, программное обеспечение (ПО) которого осуществляет ввод данных по контролируемым каналам, предварительную обработку этих данных для формирования вектора контролируемых параметров, обмен с сервером базы данных, который архивирует как первичные данные, так и результаты вторичной обработки, в частности параметры эталонных (известных) режимов функционирования объекта или словаря дефектов. Станция обеспечивает периодическое сравнение текущих результатов контроля с заданными границами, областями и ПДК контролируемых параметров. Сервисное ПО, в частности графический интерфейс, в заданном формате генерирует необходимый объем текущей и диагностической документации.

### 3. Математическое обеспечение системы диагностирования.

3.1. *Принципы логического анализа подстанции* как объекта диагностирования [8]. ПС рассматривается как совокупность элементов оборудования, являющихся источниками ЭМИ и связанных между собой электрическими соединениями и общим электромагнитным полем. Под ЭО будем понимать, например, трансформаторы, выключатели целиком либо их элементы (вводы).

Построим модель свойств источников ЭМИ и наблюдаемого сигнала. Пусть  $e_1(t), \dots, e_n(t)$  – э.д.с.  $n$  эквивалентных источников ЭМИ;  $E_1(j\omega), \dots, E_n(j\omega)$  – их спектры;  $U_1(j\omega), \dots, U_m(j\omega)$  – спектры напряжений ЭМИ, измеряемые в  $m$  точках территории ПС. При использовании непрерывной модели формальная связь между спектрами источников ЭМИ и измерениями запишется в матричной форме:

$$U(j\omega) = K(j\omega)E(j\omega), \quad (1)$$

где  $U(j\omega)$  и  $E(j\omega)$  – векторы спектров сигналов и источников, а  $K(j\omega)$  – матрица комплексных коэффициентов передачи размера  $n \times m$ . Коэффициент пе-

передачи  $\mathbf{K}(j\omega)$  отражает частотные свойства приемной антенны и реальных условий распространения сигнала, в том числе взаимное геометрическое расположение источника, точки наблюдения и окружающих конструкций. Его можно считать достаточно гладкой функцией частоты.

Если задать некоторый порог чувствительности измерения информативной части спектра  $E_{\text{п}}$ , тогда спектр удобно характеризовать наличием либо отсутствием спектральных линий в некотором частотном поддиапазоне  $\Delta\omega$ , что является в общем случае локальным свойством (признаком) сигнала. В этом смысле можно ввести множество рассматриваемых свойств спектра  $\{x_j\}$ ,  $j=1, \dots, r$ , и матрицу свойств источников  $\mathbf{E} = \{E_{sj}\}$ , столбцы которой соответствуют источникам, а строки – их свойствам. Проведем учет характеристик ЭМИ по следующему критерию:

$$E_s(\Delta\omega_j) = \begin{cases} 1, & E_s(\omega) \geq E_{s, \text{п}}; \\ 0, & E_s(\omega) < E_{s, \text{п}}. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда, зафиксировав априори множество поддиапазонов  $\{\Delta\omega_j\}$ , получим логическое описание спектра  $\mathbf{E}(\omega)$ . Аналогично матрице свойств источников вводится в рассмотрение матрица свойств наблюдаемых сигналов  $\mathbf{U} = \{U_{jr}\}$ , столбцы которой соответствуют точкам наблюдения, а строки – их свойствам. Логическое описание позволяет подняться на более высокий уровень обобщения и единообразным способом описывать разнородную семантическую информацию, отражающую реальные свойства сигнала. Матрицу коэффициентов передачи  $\mathbf{K}(j\omega)$  также можно представить в виде логической матрицы с элементами 0 и 1 и записать (1) в виде  $\mathbf{U} = \mathbf{KE}$ . Матрица  $\mathbf{K}$  из матрицы комплексных коэффициентов передачи фактически превратилась в логическую матрицу коэффициентов передачи. Ясно, что она зависит от топологии распространения ЭМИ и от некоторого обобщенного расстояния между источником и точкой наблюдения.

Для описания и анализа процессов распространения ЭМИ на подстанции как объекте диагностирования рассмотрим модель, построенную на основе частично ориентированного графа. Множество узлов, соединенных ветвями, образуют граф диагностической модели. Узлы графа ассоциированы с активными элементами оборудования – источниками ЭМИ, пассивными ЭО и с точками измерений (регистрации) ЭМИ. С ветвями графа ассоциируются пути распространения ЭМИ как за счет непосредственных электрических связей, так и за счет излучения электромагнитных волн элементами оборудования. В этом случае основой для построения ветвей графа служит анализ пространственно-геометрического расположения ЭО. Анализ графа диагностической модели выявляет пути распространения сигналов ЭМИ от источников к точкам наблюдения, т. е. построение матрицы влияния  $\mathbf{K}$ . Индивидуальные сигналы ЭМИ, генерируемые ЭО, при распространении на подстанции затухают. В качестве меры расстояния принимается длина пути между узлами графа и считается, что сам сигнал проявляется на расстоянии от источника, не большем некоторой заданной величины  $l$ . Общие свойства модели представлены в таблице.

Теперь, имея матрицу свойств источников ЭМИ, нетрудно решить задачу анализа распространения ЭМИ по ПС при различных гипотезах о дальности распространения сигналов. Ясно, что значение  $l=0$  соответствует измерению ЭМИ только в непосредственной близости от источников. Если же

Реальный объект (ПС)	Модель
ЭО – источники ЭМИ	Узлы графа
Пассивные ЭО	Узлы графа
Электрические связи между ЭО	Неориентированные ветви
Электромагнитные связи между ЭО	Неориентированные ветви
Точки регистрации ЭМИ	Тупиковые узлы графа
Путь передачи ЭМИ от ЭО к прибору	Ориентированная ветвь
Распространение ЭМИ по ПС	Распространение сигнала по графу
Затухание ЭМИ по пути распределения	Конечное расстояние распространения сигнала по графу
Временные и частотные свойства ЭМИ	Логические свойства (наличие некоторых физических свойств)
Суперпозиция ЭМИ от разных ЭО	Логическая сумма свойств сигналов

$l = d$  – расстояние распространения ЭМИ, эквивалентное диаметру графа, то в любой точке наблюдается сумма ЭМИ всех источников и их индивидуальные свойства неразличимы между собой.

Изложенные принципы обработки данных позволяют организовать первичную паспортизацию ЭО на ПС и построить матрицу  $E$ , которая явится основой обработки результатов мониторинга для дальнейшего анализа изменений технического состояния ЭО.

3.2. *Классификация состояний (образов) ВВО.* Контроль состояний (режимов) ВВО или его элементов можно построить на основе методов классификации (распознавания) образов [9] и контролировать режимы более детально не по бинарной (2), а по метрической шкале признаков. Под «образом» в данном случае будем понимать одно из возможных состояний (режимов) контролируемого объекта, например: нормальное – штатное либо (пред)аварийное – одно из нештатных. Охарактеризуем объект ВВО, который может находиться в одном из  $M$  известных состояний, вектором контролируемых параметров  $\bar{X}$ . В качестве компонент вектора состояния объекта выберем:  $x_1$  – номинальное значение параметра (например, ток, напряжение, мощность);  $x_2$  – систематическое изменение (скорость тренда) параметра;  $x_k$  ( $k = 3, 4, \dots, m$ ) – компоненты  $E_s(\Delta\omega_j)$  спектральной плотности шумов в выбранных для контроля поддиапазонах в полосах инфразвуковых, акустических или СВЧ-частот;  $x_{k+l}$  ( $l = m + 1, \dots, N$ ) – другие параметры, например бинарные (превышение ПДК газовых компонент).

Тогда расширенный вектор параметров запишем в виде

$$\bar{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_l, \dots, x_N)^T.$$

Каждому состоянию  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) в многомерном пространстве выделенных параметров соответствуют (в общем случае пересекающиеся) области  $G_j$ , размер которых определяется флуктуациями изображающей точки – конца вектора  $\bar{X}$ , т. е. дисперсией всех его компонент (например, «толщиной» линии в поддиапазонах  $\Delta\omega$  спектра на рис. 3). Единственная возможность

оценить состояние объекта – определить область нахождения текущего значения наблюдаемого вектора  $\bar{X}_n$ . В такой постановке задача автоматического контроля сводится к объективной классификации состояний объекта контроля или распознаванию ситуаций (режимов), а синтез классифицирующей процедуры включает:

- измерение вектора параметров (признаков), отображающих состояние системы,
- определение правила принятия решения,
- синтез алгоритма обучения, формирующего границы областей  $G_j$  по обучающим выборкам сигналов известных режимов или состояний.

Специфика классификации состояний ВВО состоит в том, что, как правило, доступна статистика только одного, нормального, режима функционирования. В то время как информация о числе, типе и статистике (пред)аварийных режимов крайне ограничена. Ситуация оказывается еще более неопределенной, если на входе распознающей системы кроме интересующих сигналов, статистические свойства которых оцениваются при обучении, возможно появление реализаций других классов (шумового фона), не участвовавших в обучении. Очевидно, классификация в этом случае должна осуществляться на основе абсолютного описания образа (состояния объекта), сжатое представление которого содержится в параметрах (признаках). Поскольку речь идет о распознавании случайного процесса, изображающие точки реализаций группируются в некоторой размытой области  $N$ -мерного пространства признаков  $\bar{X}$ . В случае нормального распределения эта область бесконечна. Для решения задачи пространство признаков необходимо соответствующим образом ограничить. При этом попадание вектора параметров в указанную (известную) область отождествляет принятую реализацию процесса с распознаваемым состоянием (режимом работы).

Собственную область пространства признаков контролируемого класса (режима)  $A$  можно определить из условия максимума вероятности правильной классификации

$$P_k = \int_G P(\bar{X}/A) d\bar{X} \quad (3)$$

при фиксированном объеме области признаков  $V_A = \int_G d\bar{X}$ . Это вариационная задача с подвижными границами, решение которой

$$P(\bar{X}/A) = \lambda, \quad \bar{X} \in G, \quad (4)$$

определяет искомую границу области  $G$ . Очевидно, решающее правило можно сформулировать тогда в виде

$$\bar{X} \in A, \text{ если } P(\bar{X}/A) \geq \lambda. \quad (5)$$

При уменьшении порогового значения  $\lambda$  вероятность правильного распознавания возрастает, однако это приводит к увеличению собственной области классифицируемого процесса и ошибкам, обусловленным попаданием признаков от реализаций фона в заданную область. Поэтому значение  $\lambda$  принимается на основе анализа конкретной ситуации с учетом цены ошибок типа «ложная тревога».



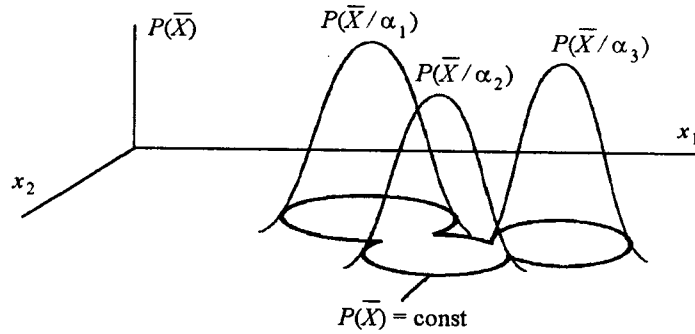


Рис. 4

На рис. 4 в плоскости параметров  $x_1, x_2$  изображен контур равновероятной плотности (4) для одной области (состояния)  $G_j$  и трех значений параметров распределения  $\alpha_i$ .

Для выделения неизвестного контура (4), т. е. формирования в режиме обучения по известным реализациям сигналов неизвестной разделяющей поверхности, используем аппроксимирующую функцию вида

$$P(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N a_i u_i(\bar{x}), \quad (6)$$

где  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_N)^T$  – вектор настраиваемых при обучении параметров разделяющей поверхности;  $u_i(\bar{x})$  – выбранная система линейно независимых функций для функционального (нелинейного) преобразования параметров  $x_i$ .

Принимая во внимание стохастический характер контролируемых изменений и простоту реализации, в качестве алгоритмов обучения применим рекуррентные вероятностные алгоритмы [10]. На этой основе был реализован приборный вариант устройства с обучением для классификации акустических шумов по их спектрам [11], где многомерные области  $G_j$  аппроксимировались гиперсферами, а компонентами вектора настраиваемых параметров  $\mathbf{a}$  являлись их центры и радиусы  $R$ . После формирования в памяти ПК или классификатора в режиме обучения вектора  $\mathbf{a}_j$  и  $R$  (границ областей  $G_j$ ) контроль состояния объекта ведется автоматически с индикацией той области (режима)  $G_j$ , куда попадает текущий вектор состояния  $\bar{X}_n$ . Такой способ мониторинга состояний ВВО особенно перспективен для исследований долговременных характеристик и непрерывного контроля объектов, так как позволяет за счет расширения размерности вектора состояний учесть любые условия измерений или типы сенсоров.

**3.3. Интервальный контроль.** Непрерывный контроль ряда объектов ответственного назначения осуществлять сложно или невозможно. В таких случаях особенно важно определять интервалы необходимых контрольных измерений для безотказной работы объектов.

Пусть изменение состояния объекта на интервале эксплуатации  $T$  описывается случайным процессом  $x(t)$ . Реализация  $x(t)$  наблюдается на интервале

$T_p \subset T$  с аддитивной ошибкой  $n(t)$ ,  $y(t) = x(t) + n(t)$ . Вероятностные свойства  $n(t)$  неизвестны, а известно только, что

$$|n(t)| \leq c(t), \quad (7)$$

где  $c(t)$  – заданная функция. Учитывая требования надежности эксплуатации и большую цену ошибки типа «ложный пропуск» для таких объектов, построение искомых оценок моментов контроля целесообразно вести из расчета на «наихудший случай», т. е. на основе принципа минимакса. Тогда с учетом (7) можно записать

$$y(t) - c(t) \leq x(t) \leq y(t) + c(t). \quad (8)$$

Из (8) следует, что на интервале  $T_p$  истинная реализация  $x(t)$  заключена в «трубке», ограниченной функциями  $y(t) \pm c(t)$ . В этой трубке находится множество реализаций  $x(t)$ . Для прогнозирования процесса  $x(t)$  выделим из этого множества «наихудшие», т. е. такие, которые при  $t \in T \setminus T_p$  идут выше или ниже остальных. Можно показать, что при разложении  $x(t)$  в виде (6), когда  $\mathbf{a} = \{a_j\}_{j=0}^k$  – набор случайных коэффициентов,  $\mathbf{u} = \{u_j(t)\}_{j=0}^k$  – непрерывные детерминированные функции времени, и наложении некоторых ограничений на функции  $\mathbf{u}$  (в частности, если они образуют на интервале  $T$  систему Чебышева), то такими наихудшими реализациями будут экстремальные полиномы Карпина  $x(t)^-$  и  $x(t)^+$  [3]. Полиномы  $x(t)^-$  и  $x(t)^+$  выделяют так называемый «конус прогноза», т. е. действительная реализация исследуемого процесса гарантированно находится внутри этого конуса при  $t \in T \setminus T_p$ .

Построим алгоритм нахождения экстремальных реализаций с учетом дискретности контроля. Можно показать [3], что в такой ситуации поиск  $x(t)^-$  и  $x(t)^+$  сводится к решению двух задач линейного программирования:

$$\max \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t) \quad \text{и} \quad \min \mathbf{a}^T \mathbf{u}(t) \quad (9)$$

при ограничениях (8) с учетом разложения  $x(t)$  по системе функций  $\mathbf{u}(t)$ . Такой алгоритм прогнозирования отвечает общим требованиям, предъявляемым к любой прогнозирующей процедуре. Он обладает свойством оптимальности (в минимаксном смысле), однозначности и несмещенности. Используем этот алгоритм прогноза для определения состояния объекта по контролируемому параметру  $x(t)$ . В достаточно общей форме условие работоспособности можно задать в виде  $A(t) \leq x(t) \leq B(t)$ , где  $A(t)$  и  $B(t)$  – нижняя и верхняя границы допустимых изменений параметров соответственно. Задача состоит в назначении таких моментов контроля параметра, при которых гарантируется его нахождение в области допустимых значений (условий работоспособности) в течение времени эксплуатации  $[0, T]$ . Пусть по результатам  $p$  контрольных измерений построены экстремальные реализации  $x(t)^-$  и  $x(t)^+$ ,  $t > t_p$ . Пересечение экстремальных реализаций с границами области допустимых изменений параметров  $A(t)$  и  $B(t)$  определит моменты времени  $\tau_A$  и  $\tau_B$ , минимальный из которых целесообразно принять за момент очеред-

ного  $(p+1)$ -го контроля:  $t_{p+1} = \min \{ \tau_A, \tau_B \}$ . Моменты времени  $\{ \tau_A, \tau_B \}$  являются решениями уравнений

$$x(t)^- = A(t) \text{ и } x(t)^+ = B(t). \quad (10)$$

Очевидно, что в течение времени  $t = t_{p+1} - t_p$  контролируемый параметр будет гарантированно находиться в области допустимых значений, поэтому до момента  $t_{p+1}$  производить измерения или коррекцию параметра нет необходимости. В момент  $t_{p+1}$  выполняется очередное измерение параметра, результат которого  $(y_{p+1}, t_{p+1})$  заносится в файл «Наблюдение» и используется для расчета параметров новых экстремальных реализаций и анализа состояния ЭО. Определяется очередной промежуток времени (интервал гарантированной эксплуатации), в течение которого параметр не выйдет за допустимые пределы.

**Заключение.** Рассмотрены основные этапы системного подхода к автоматизированному техническому мониторингу мощных энергетических объектов, классификации их состояний по измеренным параметрам генерируемых ими полей и сред различной физической природы. Показано, что собственное электромагнитное излучение высоковольтного оборудования может являться основным, но не единственным диагностическим источником, а его регистрация и анализ в широком диапазоне частот – высокоинформативным способом оценки технического состояния ВВО в дополнение к традиционным методам. Выявлен ряд классификационных признаков для описания характерных свойств собственных ЭМИ ЧР, возникающих задолго до полного пробоя изоляции в реальных условиях ПС. Предложена логическая математическая модель распространения собственных ЭМИ элементов ВВО на подстанции. Исследованы различные методики классификации состояний (режимов) ЭО на основе логического анализа и методов распознавания образов. Предложен алгоритм прогнозирования работоспособности ЭО при интервальном контроле. Сформулированы требования к многоканальной системе сбора, ввода и обработки в ПК сигналов сенсоров.

Автоматизированная система технического мониторинга может использоваться для оперативной оценки технического состояния элементов ВВО, а теоретические положения, приведенные в предлагаемой работе, – при интерпретации результатов функциональной диагностики ВВО в реальных условиях под рабочим напряжением. Диагностические системы такого типа могут использоваться и в практике научных исследований, в частности, для контроля состояний крупных установок в ядерной физике, химических исследовательских реакторов, технологических установок и других объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20911-75. Техническая диагностика. Основные термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1975.
2. Gill B. R. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. N. Y.: Publ. Dekker, 1998.
3. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Прогнозирование состояния технических систем. М.: Наука, 1990.
4. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) // АиТ. 1981. № 8. С. 96.

5. **Киншт Н. В., Кац М. А.** Диагностика точечных источников электромагнитных шумов // Электричество. 1999. № 4. С. 40.
6. **Лазерные измерения и диагностика в технике и экологическом контроле** // Каталог-справочник. М.: НТИУЦ ЛАС, 2002.
7. **Собстель Г. М., Чейдо Г. П.** Автоматизированная система контроля и учета энерго-ресурсов СО РАН // Тр. I междунар. науч.-практ. конф. «Теплосиб-2002». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
8. **Киншт Н. В., Преображенская О. В., Петрунько Н. Н.** Логический анализ электрической подстанции как объекта диагностирования // Известия АН. Сер. Энергетика. 2001. № 2.
9. **Сенин А. Г.** Распознавание случайных сигналов. Новосибирск: Наука, 1974.
10. **Цыпкин Я. З.** Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.
11. **Борисов Б. Д., Могильницкий М. И., Сенин А. Г., Хайретдинов М. С.** Вопросы обучения и практической реализации алгоритмов распознавания случайных сигналов // Автометрия. 1976. № 2. С. 44.

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
Институт лазерной физики СО РАН,  
Конструкторско-технологический институт  
вычислительной техники СО РАН,  
E-mail: kin@iacp.dvo.ru  
borisov@laser.nsc.ru  
dir@kti.nsc.ru*

*Поступила в редакцию  
5 мая 2003 г.*