

Интегрированная система мониторинга состояний высоковольтного оборудования в рабочих режимах

В. В. Гаркуша, Г. М. Собстель, Б. Д. Борисов*, Н. В. Киншт**, Н. Н. Петрунко**

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

*Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

**Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, Владивосток, Россия

Рассматривается метод мониторинга состояния высоковольтного оборудования на примере силовых трансформаторов. В качестве основных диагностических параметров используются спектры собственных электромагнитных излучений. Приводятся результаты экспериментальных исследований состояний трансформаторов и структурная схема сбора и обработки данных.

Ключевые слова: диагностика высоковольтного оборудования, частичные разряды, спектры электромагнитного излучения, автоматизированная система сбора и обработки данных мониторинга.

Classification of the states of a high voltage equipment using own electromagnetic radiation and diagnosis methods are discussed. Practical example which used EMR - monitoring and data processing of the power transformers are considered. The structure of the monitoring system are proposed.

Key words: diagnosis of a high voltage equipment, partial discharges, own electromagnetic radiation (EMR), classification of the states of high voltage units.

Введение. Либерализация рынка электроэнергии существенно изменила стратегию эксплуатации и диагностики высоковольтного оборудования (ВВО). На современном этапе в диагностике ВВО можно выделить следующие тенденции:

- комплексное использование диагностических параметров различных сред (масляных, газовых) и полей излучения (акустических, температурных и электромагнитных) контролируемых объектов на базе новейших информационных технологий и автоматизированных систем контроля [1–4];
- переход от планово-предупредительной диагностики к диагностике "по состоянию", что позволяет внедрить новую стратегию эксплуатации и значительно снизить эксплуатационные затраты [5];
- использование методов искусственного интеллекта – нейронных сетей, распознавания образов, генетических алгоритмов и алгоритмов нечеткой логики для раннего выявления скрытых зависимостей и связей между текущим состоянием объекта контроля и его параметрами [2, 6].

Высоковольтные трансформаторы (ВВТ) относятся к классу ответственного ВВО и требуют непрерывного мониторинга и контроля состояний по экологическим и эксплуатационным критериям. Поэтому стали актуальными методы дистанционного диагностического контроля состояний ВВТ под напряжением. В настоящее время помимо электрических параметров текущему контролю с различной периодичностью подвергаются состав и концентрация газов, растворенных в трансформаторном масле (ХАРГ-методы), температура и вибрация узлов и элементов систем ВВТ. Поиск новых информативных носителей о состояниях ВВО привел к исследованиям возможностей использования собственного электромагнитного излучения (ЭМИ) ВВТ [7–14]. Рассмотрим новый подход в этом направлении – дистанционный мониторинг на основе регистрации и анализа спектров ЭМИ ВВО. Данный диагностический метод, отличающийся оперативностью и низкой стоимостью, позволяет обследовать ВВО без отключений, под рабочим напряжением и естественной нагрузкой и оценивать техническое состояние ВВО при низких температурах.

1. Частичные разряды – источник диагностической информации. Собственные высокочастотные ЭМИ ВВТ – это первичный электрофизический процесс, несущий информацию об изменении качества изоляции при эксплуатации оборудования под рабочим напряжением. Источником ЭМИ являются электрические разряды, возникающие как при нормальной работе ВВТ, так и при деградации изоляции и других конструктивных элементов. В наибольшей степени техническое состояние изоляции ВВТ определяется наличием, интенсивностью и распределением так называемых частичных разрядов (ЧР). ЧР возникают в малоразмерных включениях, диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность которых отличаются от характеристик основной изоляции. В каждом элементарном включении происходит серия ЧР, детерминированно связанных с напряженностью первичного электрического поля в ее окрестности $E_l(x, y, z)$ и параметрами изоляции. С ЧР связан элементарный разрядный ток, образующий практически идеальный элементарный диполь Герца. Время протекания тока ЧР составляет порядка 10^{-8} – 10^{-9} с, следовательно, диапазон частот ЭМИ простирается вплоть до сантиметровых волн (порядка 10^{10} Гц). Элемент тока ЧР $i_0(t)$ является функцией времени, координат (x, y, z) , размера (диаметра) включения, стационарной составляющей $E_l(x, y, z)$ и электрофизических характеристик включения (диэлектрической проницаемости ϵ и пробивной напряженности E_{np}). Преобразование Фурье функции $i_0(t)$ есть $I_0(j\omega)$. Для некоторого дефектного включения с координатами (x, y, z) суммарный спектр тока ЧР образуется пакетом единичных ЧР числом $N(E_l(x, y, z))$ на множестве моментов времени $\{\tau_k\}$:

$$F(j\omega) = \sum_{k=1}^N I_{0k}(x, y, z, E_l(x, y, z), j\omega).$$

В точке наблюдения (x_0, y_0, z_0) электрическую составляющую спектра ЭМИ получаем либо суммированием по всем включениям с учетом весовой функции комплексного пространственного коэффициента передачи, отражающей граничные условия, $h(x_0, y_0, z_0, x_l, y_l, z_l, j\omega)$:

$$\mathbf{E}_{\text{ЭМИ}}(x_0, y_0, z_0, j\omega) = \sum_{l=1}^{N_B} h(x_0, y_0, z_0, x_l, y_l, z_l, j\omega) F_l(j\omega),$$

либо интегрированием по всему объему с учетом объемной концентрации включений $C(x, y, z)$.

В процессе старения изоляции в ней появляются новые газовые включения, а также изменяются ее электрофизические характеристики. Возникающие во включениях ЧР ускоряют процесс старения, и этот процесс может развиваться как цепная реакция. Данные явления, накладываясь друг на друга, сопровождаются местными температурными перегревами, приводящими к повышению интенсивности ЧР. При этом общая мощность излучения и полимодальность спектра излучения увеличиваются. Исследование связей между собственными ЭМИ ВВТ и их техническим состоянием началось только в последние годы [8–14]. Заметим, что ЭМИ генерируются и излучаются в естественных режимах работы оборудования. Поэтому причинно-следственная цепочка имеющая вид: дефекты в изоляции – частичные разряды – собственные ЭМИ – анализатор спектра – математическая обработка – рекомендации персоналу, позволяет осуществлять мониторинг и выявлять предаварийные состояния объекта контроля.

2. Информационная обработка данных мониторинга. Принятие оптимальных решений о состоянии системы с учетом помех, ошибок измерений, флуктуаций параметров имеет статистическую основу и, как известно [15], включает следующие этапы:

– восстановление по наблюдаемому вектору параметров системы $\mathbf{X} = (f_1, f_2, \dots, f_N)^T$, (f_i – компоненты вектора параметров, $i = 1, 2, \dots, N$) апостериорной многомерной совместной функции плотности распределе-

ния (ФПР) этих параметров по каждому состоянию A_s , ($\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s)$), A – область состояний в пространстве параметров, $s = 1, 2, \dots, S$, S – число (алфавит) состояний);

– разрешение многоальтернативной гипотезы о нахождении системы в одном из состояний, например по критерию максимума апостериорной ФПР $\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s) = \max$ или набору попарных классификаций – дихотомий (коэффициенту правдоподобия)..

В рассматриваемом случае данный классический подход трудно реализовать не только из-за вычислительных трудностей восстановления многомерной ФПР, но и, в первую очередь, из-за отсутствия статистики по предаварийным и аварийным состояниям. Учитывая эту специфику диагностирования ВВТ и требования непрерывности контроля, можно восстанавливать ФПР по доступной статистике одного известного состояния – нормального, штатного режима работы контролируемого объекта. Однако это также связано с техническими трудностями, поэтому для целей диагностики проще восстановить границы R замкнутой области известного состояния A_s – контур равновероятной ФПР [16]

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s) = \text{const}. \quad (1)$$

Тогда решение о состоянии системы сводится к введению метрики – "расстояния d " – в пространстве параметров и контролю нахождения текущего вектора параметров \mathbf{X}^T внутри границ этой области:

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{m}_A) \leq R_A, \quad \mathbf{X} \in A, \quad (2)$$

где \mathbf{m}_A – вектор "центра" области A ; R_A – характерный объем области, граница.

Для более тонкой оценки внутри области (кластера) можно использовать детализацию, например функции "конкурентного сходства" (FRiS-функции) [17].

На рис. 1 приведен пример формирования контура равновероятной плотности $\mathbf{P}(\mathbf{X}) = \text{const} = 0$ как графическое решение уравнения (1) в форме сечения двумерной ФПР $\mathbf{P}(\mathbf{X})/\alpha$ плоскостью $x_1 - o - x_2$ (α – параметр ФПР, x_1 и x_2 – компоненты вектора), в котором осуществляется гауссова аппроксимация неизвестного контура равновероятной плотности.

Требование замкнутости областей гарантирует надежность контроля известного состояния в условиях неизвестного числа (алфавита) состояний. Априорную неопределенность – неизвестность границ искомой области – можно исключить, восстанавливая границы по доступным выборкам известного состояния, например с помощью рекуррентных алгоритмов стохастической аппроксимации, хорошо подходящих для реализации непрерывного контроля, определяя и сохраняя в памяти параметры области (областей) [18]. Аналогичным образом по известной обучающей выборке любого предаварийного или аварийного состояния можно построить границы его области в пространстве выбранных параметров. Такой подход позволяет в режиме обучения по выборкам спектров известных состояний восстанавливать неизвестные границы областей этих состояний, а в режиме контроля осуществлять принятие решений по (2). Если условию (2) удовлетворяют несколько пересекающихся областей – состояний, решение принимается по $\min d$. Данный подход положен в основу разработки диагностических алгоритмов [19].

3. Экспериментальные исследования. В течение 2006–2008 гг. на п/с "Научная" (Новосибирск) в рамках Интеграционного проекта СО РАН "Обеспечение живучести электроэнергетических систем" осуществлялся мониторинг ЭМИ высоковольтного автотрансформатора АТ220/110 и трансформатора тока ТФЗМ. На примере данных реального мониторинга ЭМИ ВВТ рассмотрим реализацию предложенного диагностического подхода. Задача решалась методом online-наблюдения ЭМИ с использованием антенны, направленной на ввод ВВТ, Фурье-анализа и обработки получаемых спектров излучения методом распознавания образов.

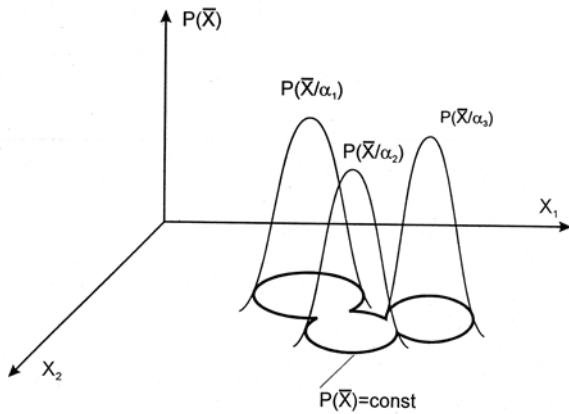


Рис. 1. Контур равновероятной плотности $\mathbf{P}(\mathbf{X}/A_s) = 0$

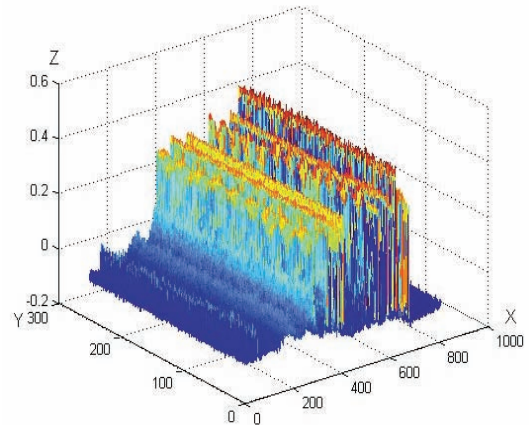


Рис. 2. Частотно-временной спектр ЭМИ автотрансформатора АТ220/110 (п/с "Научная", Новосибирск, 2006 г.)

На рис. 2 приведен пример регистрации спектра сигнала ЭМИ фазы А автотрансформатора АТ220/110 спектральным анализатором (СА) типа "PROMEX". При регистрации через каждые 20 мс в указанной полосе (ось X в МГц) проводится новое измерение (выборка) спектра, по другой горизонтальной оси Y – оси времени t ($0 \div 20$ с) регистрируется динамика изменения спектра ЭМИ объекта и набирается статистика – мониторинг контроля. По вертикальной оси Z отложены амплитуды спектральных составляющих. На рис. 2 видно, что в части спектральных поддиапазонов результат наблюдения искажен мощной местной помехой – телевизионными и радиорелейными сигналами с большой амплитудой, которые необходимо исключать при анализе данных.

В сканируемом диапазоне D при регистрации в СА горизонтальная ось частот разделена на N (как правило, $N = 100 \div 880$) полос (частотных каналов), ширина каждой полосы $\Delta f_i = D / N$ (кГц) ($i = 1, 2, \dots, N$). Значения энергии спектральных составляющих в узкой полосе (спектральная плотность) f_i используются в качестве входных параметров – компонент вектора признаков состояний в классификаторе состояний контролируемого ВВТ.

На рис. 3 представлена структурная схема алгоритма обработки спектров. Здесь $\mathbf{X} = (f_1, f_2 \dots f_k)^T$ – k -мерный вектор измерений со спектральными компонентами f_i ; $i = 1, \dots, k$; $n = 1, 2, \dots$ – номер измерения; \mathbf{M}_j ($j = 1, 2, \dots$) – k -мерный вектор эталонных сфероидов, аппроксимирующих неизвестный объем области известного состояния контролируемого объекта в k -мерном пространстве спектральных параметров; $(k+1)$ -координата – скаляр радиус R_j для j сфероидов; D_i – дисперсия i -й компоненты вектора \mathbf{X} по всем выборкам $n = 1, 2, \dots$; $D_{n \min}$ – ее минимальное значение из всех координат; d_{nj} – евклидово расстояние между векторами \mathbf{X}_n и \mathbf{M}_j ; b – скаляр, приращение радиуса R_j при коррекции.

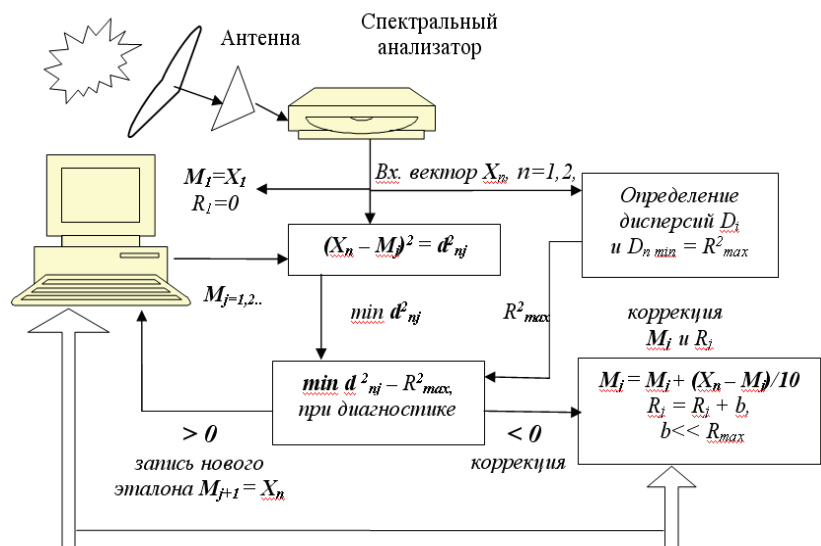


Рис. 3. Структурная схема эксперимента и алгоритм обработки спектральных данных

В режиме обучения системы координаты первого измеренного вектора \mathbf{X}_1 присваиваются первому эталону $\mathbf{M}_1 = \mathbf{X}_1$, $R_1 = 0$ с сохранением его параметров в памяти. Размер R_{\max} выбирается из априорных соображений либо определяется как среднеквадратичное отклонение по координате с минимальной дисперсией D_{\min} . Ограничение на размер сфероида R_{\max} вводится для исключения тривиального решения, при котором один сфероид с неограниченным радиусом может охватывать всю искомую область сложной формы. При поступлении новых реализаций вектора \mathbf{X}_n вычисляется "расстояние" между текущим вектором и всеми эталонами \mathbf{M}_j . Если расстояние d_{nj} меньше R_j (решение уравнения окружности), т. е. точка попала в сферу радиуса R_j , то коррекция не проводится. Если это расстояние больше R_j , но меньше R_{\max} , проводится коррекция вектора математического ожидания (центра сферы) и радиуса по формулам в квадрате "коррекция" (см. рис. 3). Если расстояние больше R_{\max} , формируется новый эталон с координатами текущего вектора измерений $\mathbf{M}_j = \mathbf{X}_n$, $R_j = 0$. Если текущий вектор попадает в несколько сфероидов, то выбирается сфероид с $\min d_{nj}^2$. В режиме мониторинга – диагностики состояний – проверяется лишь попадание текущего вектора в сфероид с индикацией принадлежности этого сфероида к известному состоянию (например, "норма").

На рис. 4 приведена демоверсия (для двухмерного вектора) результатов обработки полученных данных: рассеяние 200 реализаций векторов ЭМИ ВВТ (п/с "Научная", Новосибирск) с компонентами из спектральных полос 208, 209 для автотрансформатора АТ220/110 и трансформатора тока ТФЗМ. Наборы сфер на рис. 4 получены по алгоритму, представленному на рис. 3, только по данным 2006 г., принятым в качестве эталонных, и аппроксимируют объем и границы эталонных областей нормального состояния (реальный аналог рис. 1).

На рис. 4 видно, что практически все данные мониторинга за 2006–2008 гг. для каждого объекта попадают в одну область. Это свидетельствует об отсутствии отклонений от рабочего состояния. Данный вывод подтверждается и тем, что почти все векторы наблюдений за 2007–2008 гг., не участвовавшие в формировании сфер, попадают в область, построенную по отправным данным 2006 г. Реальный контроль должен проводиться по десяткам и сотням спектральных полос в соответствующем многомерном пространстве по числу выбранных спектральных полос.

Таким образом, результатом информационного "обучения" диагностической системы по спектрам ЭМИ известных состояний и режимов является определение и хранение в памяти координат центров и значений радиусов гиперсфер, аппроксимирующих объем и границы областей этих состояний в пространстве выбранных спектральных параметров контролируемого объекта. Этот набор гиперсфер ("ЭМИ-образ" объекта) может легко адаптироваться путем "дообучения" по другим представительным выборкам спектров тех же или других состояний и режимов контролируемых объектов.

Определение текущего состояния объекта – классификация состояний по данным мониторинга состоит в контроле попадания текущего вектора выбранных спектральных компонент в одну из гиперсфер-эталонов и выведе-

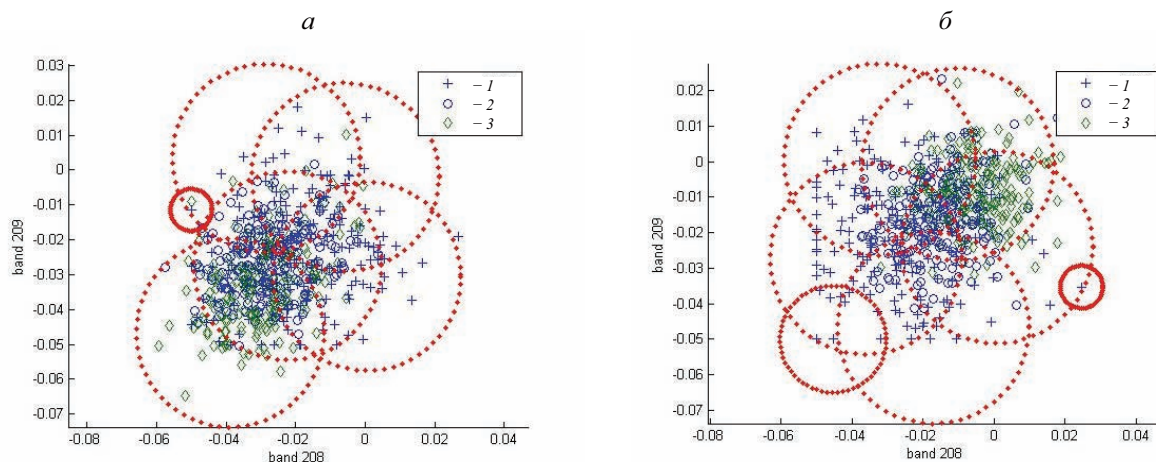


Рис. 4. Рассеяние реализаций вектора ЭМИ с компонентами из спектральных полос 208, 209 для автотрансформатора АТ220/110 (а) и трансформатора тока ТФЗМ (б):

1 – данные 2006 г., 2 – данные 2007 г., 3 – данные 2008 г.

нии на табло оператора соответствующего "имени" состояния (сферы). Более тонкий, динамический, мониторинг заключается в контроле нахождения (либо дрейфа) текущего вектора в (к) "пограничным сферам" эталонной области того или иного состояния.

Предлагаемый метод, основанный на регистрации ЭМИ, является перспективным при использовании в автоматизированных системах комплексной диагностики ВВО, включающих также другие методы, позволяющие повысить информативность и достоверность мониторинга.

4. Автоматизированные системы сбора и обработки данных мониторинга. В соответствии с Программой комплексного технического перевооружения электрических сетей ОАО ФСК ЕЭС на 2004–2012 гг. "...все оборудование подстанций ОАО ФСК, вошедших в Программу, будет оснащено подсистемами мониторинга с полным набором первичных датчиков, программных и технических средств сбора диагностической информации и интеграции в АСУ ТП ПС". В этом случае средства верхнего уровня будут едиными для всего комплекса оборудования АСУ ТП, поэтому с целью оптимизации оборудования системы необходима разработка программно-аппаратных устройств сбора и обработки информации от комплекса датчиков, установленных на объекте или рядом с объектом контроля.

Исходя из опыта проектирования автоматизированных систем предлагается следующая структурная схема автоматизированной системы сбора и обработки информации в реальном времени, предназначенная для реализации алгоритмов диагностики мощных энергетических установок (рис. 5) [20]. Система имеет три уровня иерархии:

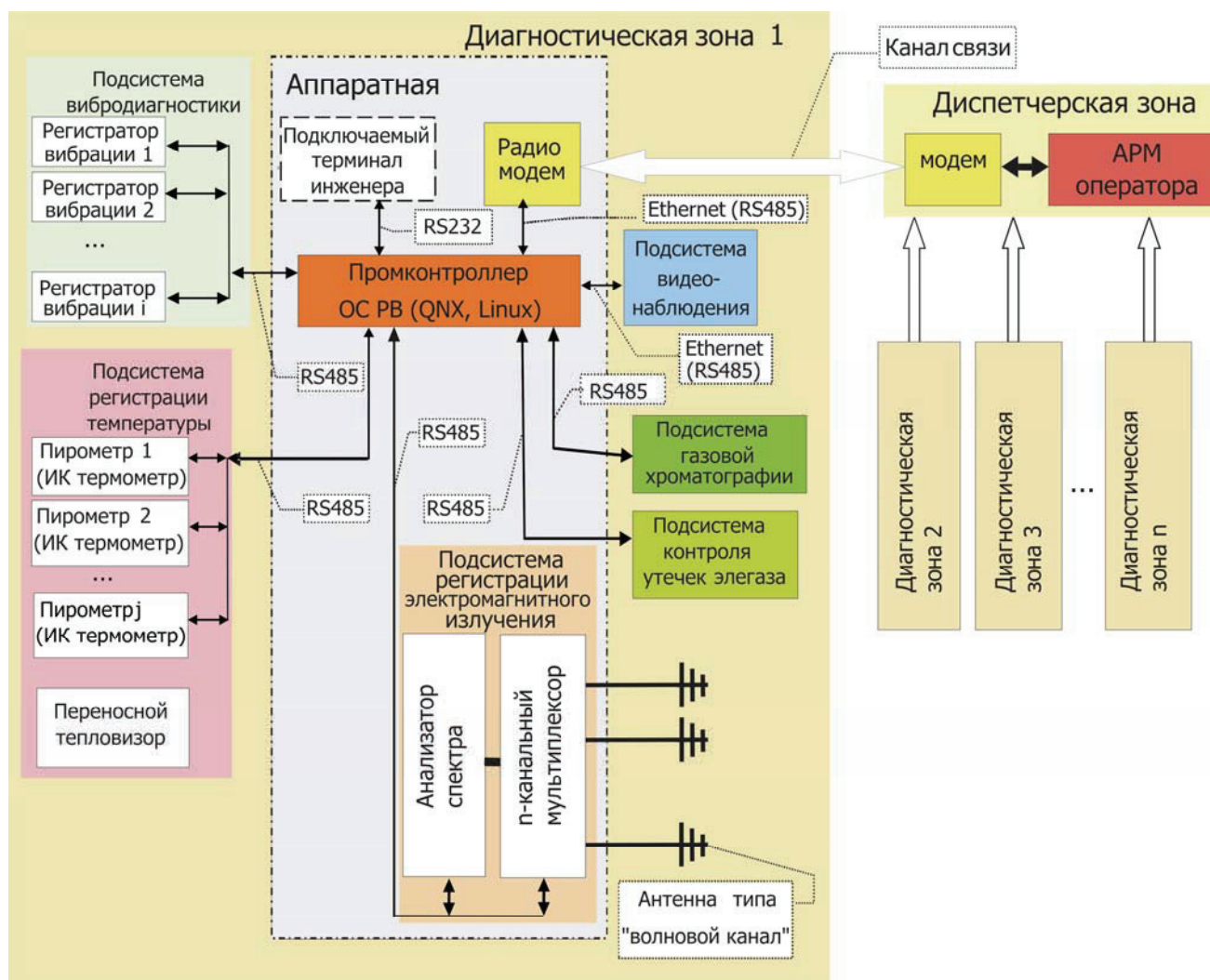


Рис. 5. Структурная схема диагностической системы сбора данных контролируемых объектов

верхний уровень – АРМ главного энергетика (оператора), который находится в здании управления; средний уровень – программируемый(е) контроллер(ы); нижний уровень – датчики, приборы и подсистемы – регистраторы физических величин. Под диагностической зоной понимается подстанция с ВВО для дистанционного контроля трансформаторами тока и напряжения. Для комплексного использования четырех основных методов дистанционной диагностики (анализ электромагнитного излучения вводов трансформаторов; измерение температур в критических точках; анализ концентрации газов, растворенных в трансформаторном масле; вибрационный контроль конструктивных элементов) в структуре предлагаемой системы сбора и обработки данных выделены соответствующие подсистемы: регистрации электромагнитного излучения; газового анализа; регистрации температур и вибродиагностики. Дополнительно введена подсистема видеонаблюдения, которая помимо визуального контроля оборудования (коронных разрядов) может выполнять и охранную функцию.

Заключение. Рассмотренный метод дистанционного контроля состояний ВВО по спектрам собственных электромагнитных излучений соответствует современным требованиям к технологиям дистанционной диагностики и наряду с традиционными методами может быть включен в комплексную систему текущего контроля состояний высоковольтных объектов. Начальная сложность применения метода для классификации видов аварийных и предаварийных состояний вследствие априорной неопределенности преодолевается мониторингом состояний ВВО и созданием соответствующего банка данных (паспортов ЭМИ) для диагностики каждого объекта контроля. Это не ограничивает очевидного достоинства метода – возможности постоянного контроля основного – нормального состояния ВВТ и отклонений от него в режиме текущей эксплуатации без отключений оборудования.

Список литературы

1. АЛЕКСЕЕВ Б. А. Системы непрерывного контроля состояний крупных силовых трансформаторов // Электрические станции. 2000. № 8.
2. АБРАМОВ О. В., БОРИСОВ Б. Д., КИШТ Н. В. и др. Техническая диагностика и мониторинг мощных энергетических установок по полям их излучений // Автометрия. 2003. Т. 39, № 6. С. 86–97.
3. ДЕГТЯРЕВ С. А., ДОЛИН А. П., ПЕРШИНА Н. Ф. Основные концепции комплексного диагностического обследования трансформаторов // Электро. 2003. № 2. С. 17–26.
4. ЛЯПИН А. Г., ПЕВЧЕВ Б. Г., ПИМОШИН А. А. Комплексный подход к диагностике и оценке технического состояния энергетического оборудования // Пром. энергетика. 2005. № 8. С. 5–7.
5. ГРЕЧКО О. Н., КАЛАЧЕВА Н. И. Современные тенденции в развитии системы контроля и диагностики состояния трансформаторов 110–750 кВ // Энергетика. 1996. № 5. С. 28–32.
6. АГАМАЛОВ О. Н. Кластерный анализ частичных разрядов для оценки технического состояния изоляции электрических машин // Электричество. 2006. № 7. С. 56–62.
7. ЛАВРОВ В. Я., ПУХАНОВ А. П. Принципы диагностики на основе идентификации электромагнитных полей // Техн. электродинамика. 1991. № 5. С. 3–6.
8. ВИЛСОН А., ХОЛЛ Л., ЛАПВОРТ ДЖ. Измерение частичных разрядов в силовых трансформаторах под напряжением // Матер. Междунар. семинара "Повышение надежности и эффективности контроля трансформаторов в эксплуатации". Запорожье, 1996. Докл. 3.4.
9. КИШТ Н. В., СИЛИН Н. В., ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Ю. Б. Мониторинг электромагнитного излучения высоковольтного оборудования // Тр. IV Междунар. симп. по ЭМС. СПб.: Б. и., 2001. С. 110–115.
10. ГЛУХОВ О. А., КОРОВКИН Н. В., БАЛАГУЛА Ю. М. Методика оценки параметров частичных разрядов в высоковольтной изоляции при относительных измерениях их импульсных электромагнитных полей // Тр. IV Междунар. симп. по ЭМС. СПб.: Б. и., 2001. С. 30–35.
11. ВДОВИКО В. П. Образование и развитие частичных разрядов в бумажно-масляной изоляции высоковольтного оборудования в условиях эксплуатации // Электрические станции. 2004. № 2. С. 63–65.
12. ГОЛЕНКО О. В. Исследование сигналов частичных разрядов в силовом трансформаторном оборудовании и разработка метода локализации их источников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2003.

13. Киншт Н. В., ПЕТРУНЬКО Н. Н., ПОПОВИЧ А. Б. Представление и моделирование свойств собственных электромагнитных излучений высоковольтного электроэнергетического оборудования // Вычисл. технологии. 2004. Т. 9. Ч. 2.
14. Киншт Н. В. и др. О способе контроля высоковольтного оборудования на основе анализа спектров его собственного электромагнитного излучения // Пром. энергетика. 2007. № 5.
15. ЛЕВИН Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1976. Т. 3.
16. СЕНИН А. Г. Распознавание случайных сигналов. Новосибирск: Наука, 1974.
17. БОГДАНОВ А. Б., БОРИСОВА И. А., ДЮБАНОВ В. В. и др. Интеллектуальный анализ спектральных данных // Автометрия. 2008. Т. 45, № 1. С. 92–100.
18. ЦЫПКИН Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.
19. Пат. № 2351939 РФ. Способ контроля технического состояния электроэнергетического оборудования / Б. Д. Борисов. Оpubл. 02.05.07.
20. Пат. РФ. Диагностическая система контроля состояний высоковольтного энергетического оборудования под напряжением / Б. Д. Борисов, В. В. Гаркуша, Н. В. Киншт, Н. Н. Петрунько, Г. М. Собстель. Оpubл. 27.11.2007. Бюл. № 33.

Гаркуша Владимир Владимирович – зав. лабораторией Конструкторско-технологического ин-та вычисл. техники СО РАН; тел. (383) 330-85-76; e-mail garkusha@mail.ru

Собстель Геннадий Михайлович – канд. техн. наук, исп. обязанности директора Конструкторско-технологического ин-та вычисл. техники СО РАН; тел. (383) 330-93-61; e-mail sobstel@mail.ru

Борисов Борис Дмитриевич – д-р техн. наук, зав. лабораторией Ин-та лазерной физики СО РАН; тел. (383) 333-34-94; e-mail borisov@laser.nsc.ru

Киншт Николай Владимирович – д-р техн. наук, зав. лабораторией Ин-та автоматики и процессов управления ДВО РАН; тел. (4232) 31-06-64; e-mail kin@dvo.ru

Петрунько Наталья Николаевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та автоматики и процессов управления ДВО РАН; тел. (4232) 31-06-64; e-mail pnn@dvo.ru