

## ОТ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ – К МОНИТОРИНГУ СОСТОЯНИЙ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

*Розглядається моделювання станів силового трансформатора за результатами моніторингу його параметрів. Запропоновані автоматна модель динаміки станів силового трансформатора, умов його використання та діагностуючої системи.*

*Рассматривается моделирование состояний силовых трансформаторов по результатам мониторинга его параметров. Предложены автоматная модель динамики состояний силового трансформатора, условий его применения и диагностирующей системы.*

### ВВЕДЕНИЕ

Силовой трансформатор (СТ), как важный элемент систем энергоснабжения, в ходе эксплуатации подвергается действию многочисленных внешних факторов, которые изменяют его свойства и являются причиной аварий и повреждений трансформатора. Поэтому, СТ оснащаются системами мониторинга параметров, которые измеряют и архивируют в памяти компьютера значения многих параметров СТ и внешних факторов, воздействующих на СТ в процессе эксплуатации [1].

При этом существует проблема интеллектуального анализа данных мониторинга [2, 3]. Одним из перспективных направлений такого анализа является диагностирование технического состояния СТ. В известной автору литературе, например в [4], состояние СТ определяется как результат оценки в определенный момент времени значений некоторой совокупности параметров, полученных в ходе измерений. Это состояние характеризуют исправность СТ или наличие в нем повреждений определенных видов на момент диагностирования.

Вместе с тем, в известной литературе не исследованы взаимосвязи и динамика состояний СТ, которые также представляют интерес для прогнозирования поведения СТ в будущем. Отсутствие моделей для описания динамики состояний СТ в процессе его эксплуатации является нерешенной научной проблемой.

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предмет настоящего исследования – динамика состояний СТ в процессе его эксплуатации.

Исследование выполнено с использованием методов теории автоматов. Для специфицирования и документирования, предложенных в работе автоматов использована нотация языка UML.

Задачи исследования: определить информационный базис для диагностирования динамики состояний СТ, разработать модели для описания взаимосвязи состояний и прогнозирования будущих состояний.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Под мониторингом состояний СТ будем понимать постоянное диагностирование в процессе эксплуатации СТ состояний системы включающей собственно СТ, внешнюю среду определяющую условия его использования и саму систему диагностирования (СД). Диагностирование проводится как в целом, так и по отдель-

ным частям СТ, например высоковольтным вводам, изоляции обмоток, трансформаторному маслу, блоку РПН и т. д. Условия использования СТ характеризуют степень соответствия СТ внешним факторам (ВФ) – воздействиям внешней среды, например таким как, текущая температура окружающей среды, ток нагрузки СТ и др. Состояние самой системы СД также влияет на результат диагностирования, поэтому ее надо рассматривать как объект диагностирования (ОД).

Состояние ОД характеризуется наименованием и параметрами. Наличие повреждений некоторого вида устанавливается путем сравнения результатов измерений и (или) моделирования параметров ОД с диапазонами допустимых значений этих параметров. Моменты времени проявления или фиксации повреждений это время в прошлом, текущий момент или будущее. Состояния в прошлом используются, как правило, для выявления причин повреждений, текущий момент – для принятия управляющих решений. Будущие состояния СТ устанавливаются путем прогнозирования. Динамика изменения параметров и состояний ОД устанавливается путем сравнения их значений в различные моменты времени. Результаты сравнения используются для прогнозирования будущих состояний ОД. Достоверность оценки состояния характеризует степень уверенности в результате диагностирования при определенной неполноте и погрешностях измерения и (или) моделирования исходных данных.

Структура диагностируемых состояний определяется отображением  $ОД \times МД \rightarrow РД$ , где ОД – объект диагностирования; МД – модель диагностирования; РД – результат диагностирования.

Сигнатура ОД включает наименование ОД и исходные данные для диагностирования – результаты измерений и (или) моделирования параметров ОД.

Сигнатура МД включает наименование модели, вид/виды повреждений, параметры модели и состояния ОД. К параметрам модели отнесем требования к исходным данным, которые определяют исполнимость диагностирования, условия идентификации состояния, временной горизонт и метод оценки достоверности диагностирования.

Сигнатура РД включает оценку исполнимости, время, дату диагностирования, наименование ОД и МД, наименование, параметры состояния ОД. Параметры состояния ОД – вид, временные рамки активности, достоверность диагностирования.

Будем полагать, что диагностирование состояний

СТ выполняется блоком диагностики (БД), который реализован программно в среде приложения визуализации компьютера системы мониторинга. Информационный базис для диагностирования динамики состояний СТ определим путем анализа взаимосвязей БД с другими элементами системы управления, мониторинга, моделирования и диагностирования СТ, которые приведены на рис. 1.

Основными элементами системы рис. 1 являются: СТ – силовой трансформатор; СУ – система управления; СМ – система мониторинга; БД – блок диагностирования; БОП – блок обработки параметров; АМН – архив на машинном носителе; М СТ и ВФ – блок моделирования параметров СТ и внешних факторов; ОП – оператор системы.

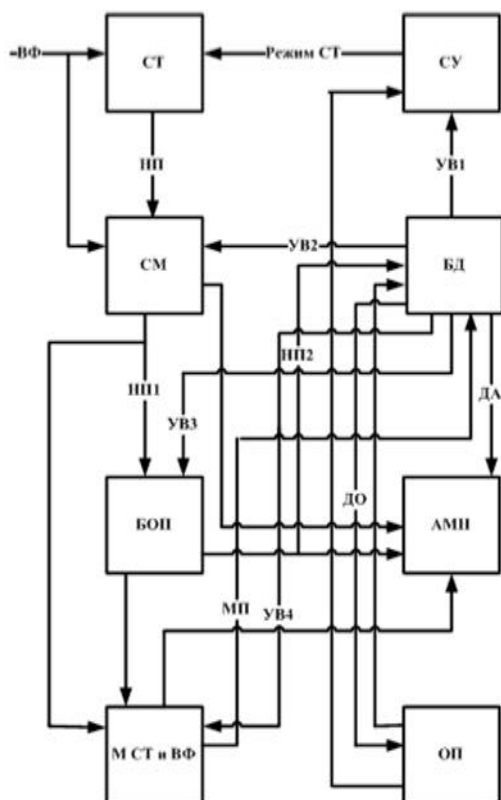


Рис. 1. Взаимосвязи блока диагностирования в системе управления, мониторинга, моделирования и диагностирования СТ

Наблюдаемые параметры (НП) – это подмножество параметров СТ, которые измеряются аппаратными средствами СМ и преобразовываются в цифровую форму. В наблюдаемые параметры на выходе СМ (НП1) включены значения ВФ прошедшие АЦП – преобразование. На выходах БОП формируется массив результатов обработки параметров (НП2), например методами, описанными в [3, 5, 6]. На выходах блока М СТ и ВФ представлены результаты моделирования параметров (МП). Отметим, что системе циркулируют как параметры самого СТ, например тепловое сопротивление "трансформатор – внешняя среда", остаточный ресурс изоляции обмоток, так и параметры использования СТ при определенных значениях ВФ, например температура масла, скорость износа изоляции обмоток.

К выходным связям блока БД относятся управляющие воздействия на системы СУ (УВ1), СМ (УВ2), блоки БОП (УВ3), М СТ и ВФ М (УВ4), результаты работы блока БД, подлежащие архивации (ДА) и диагностические сообщения оператору ОП (ДО). Связи У1 характерны для так называемых активных систем диагностирования, которые изменяют режим работы трансформатора в интересах повышения качества диагностирования. Например, в текущий момент для охлаждения СТ задействовано два насоса и обнаружена недостаточная эффективность охлаждения. В этом случае блок БД по связи УВ1 инициирует поочередную замену этих насосов резервным, выполняет анализ эффективности охлаждения в новых конфигурациях и локализует насос, снижающий эффективность охлаждения. Воздействия УВ2 управляют режимом (параметрами) системы СМ, например интервалом между измерениями параметров, а воздействия УВ3 – режимами обработки данных в блоке БОП, например, изменяют параметры фильтрации данных. Аналогично воздействия УВ4 управляют режимом моделирования.

Для описания поведения блока БД представим его в виде совокупности операционного (ОА) и управляющего (УА) автоматов [7]. Автомат ОА декомпозируем на входной (ОА<sub>IN</sub>) и выходной (ОА<sub>OUT</sub>) ОА. Автомат ОА<sub>IN</sub> трансформирует входные сигналы блока БД в события УА (входной ОА), а автомат ОА<sub>OUT</sub> преобразует управляющие воздействия (выходы) УА в выходные сигналы блока БД. Структура ОА в данной работе не рассматривается, так как она характеризует технологические аспекты обработки информации в блоке БД и не связана с целями исследования. Автомат УА опишем кортежем  $A = \langle S, X, Y, s_0, \delta, \lambda \rangle$ , где  $S$  – множество состояний;  $X$  – множество входных сигналов;  $Y$  – множество выходных сигналов;  $s_0 \in S$  – начальное состояние;  $\delta: S \times X \rightarrow S$  – функция переходов,  $\lambda$  – функция выходов, которая определяется в зависимости от выбранного вида автомата  $A$ , как  $\lambda: S \times X \rightarrow Y$  для автомата Мили или как  $\lambda: S \rightarrow Y$  для автомата Мура.

Автомат  $A$  описывает как технологические аспекты функционирования блока БД, так и динамику состояний объекта диагностирования – СТ. К технологическим аспектам отнесем стадии получения и обработки информации в блоке БД, состояния самого блока БД. Диаграмма состояний автомата  $A$  приведена на рис. 2.

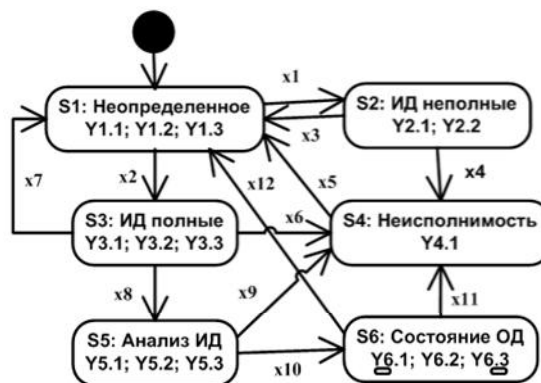


Рис. 2. Диаграмма состояний автомата  $A$

Диаграмма рис. 2 графически задает множество  $S$ , и функции  $\lambda$ ,  $\delta$  автомата  $A$  в виде автомата Мура. Множества входных  $X$  и выходных  $Y$  сигналов этого автомата содержит следующие сигналы:  $x1$  – нет ИД хотя бы по одному параметру;  $x2$  – есть ИД по всем параметрам;  $x3$  – разрешен повтор запроса на получение ИД;  $x4$  – пополнение ИД не возможно;  $x5$  – новое задание на диагностирование;  $x6$  – ИД некорректны;  $x7$  – разрешен повтор запроса на получение корректных ИД;  $x8$  – ИД корректны;  $x9$  – анализ ИД не возможен;  $x10$  – анализ ИД проведен;  $x11$  – определение состояния ОД невозможно;  $x12$  – обновить состояние ОД;  $Y1.1$  – обновить задание на диагностирование;  $Y1.2$  – получить ИД;  $Y1.3$  – ожидать ИД;  $Y2.1$  – инкрементировать счетчик запросов ИД;  $Y2.2$  – вывести перечень недостающих ИД;  $Y3.1$  – вывести перечень имеющихся ИД;  $Y3.2$  – проверить корректность ИД;  $Y3.3$  – инкрементировать счетчик проверок корректности ИД;  $Y4.1$  – вывести перечень причин неисполнимости диагностирования;  $Y5.1$  – выбрать МД;  $Y5.2$  – проанализировать ИД;  $Y5.3$  – ожидать результаты анализа;  $Y6.1$  – вывести сообщение о начале обновления состояния ОД;  $Y6.2$  – запустить автомат состояний ОД (АСОД);  $Y6.3$  – ожидать завершения работы автомата АСОД.

Структурная схема автомата АСОД приведена на рис. 3. При этом использованы следующие сокращения: АССТ – автомат состояний СТ; АСУП – автомат состояний условий применения; АССД – автомат состояний системы диагностирования; АТС – автомат текущего состояния; ААП – автомат анализа причин повреждений; АП – автомат прогноза. Автоматы АСУП и АССД структурируются аналогично автомату АССТ. Таким образом, АСОД представляет собой многоуровневую структуру, на каждом уровне которой параллельно исполняются несколько автоматов.

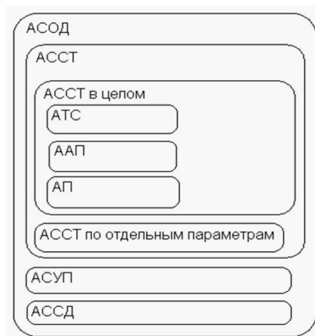


Рис. 3. Структурная схема автомата состояний ОД

В качестве примера рассмотрим автомат АТС, диаграмма состояний которого приведена на рис. 4. Она представляет собой развитие моделей, предложенных в [8]. Диаграмма графически задает множество  $S$ , и функции  $\lambda$ ,  $\delta$  автомата АТС в виде автомата Мура. Для описания входных сигналов автомата АТС введем обозначения значений параметров ОД:  $P_i, P_{i-1}$  – вектор текущих и предыдущих значений;  $L, H$  – вектор нижних и верхних границ нормальных значений;  $V_i$  – вектор текущих значений скоростей изменения параметров;  $V_{ii}$  – элемент вектора  $V_i$  для  $i$ -го парамет-

ра,  $i = \overline{1, I}$ ;  $V_{maxc}$  – вектор максимально допустимых значений скоростей изменения значений стабильных параметров;  $V_{maxn}$  – вектор максимально допустимых значений скоростей изменения нормальных значений параметров;  $O_{\Pi}$  – вектор параметров параметрических отказов;  $O_K$  – вектор параметров катастрофических отказов;  $V_{\Pi max}$  – вектор максимально допустимых значений скоростей изменения значений параметров при параметрических отказах;  $R_{\Pi}$  – вектор параметрических отказов в прошлом;  $R_{\Pi t}$  – вектор текущих параметрических отказов;  $Q_{\Pi}$  – вектор перемежающихся параметрических отказов. Элементы векторов  $R_{\Pi}, R_{\Pi t}, Q_{\Pi}$  принимают значение "0", если соответствующий отказ не обнаружен или "1", при его обнаружении.

С учетом введенных обозначений определим входные сигналы автомата АТС:

- $x1$ : для  $\forall i$  выполняется  $(L_i \leq P_i \leq H_i)$  – значения всех параметров в норме;
- $x2$ :  $\exists i$  для которого  $(P_i \geq L_i) OR (P_i \geq H_i)$  – значение хотя бы одного параметра вне нормы, где  $OR$  – логический оператор ИЛИ;
- $x3$ : для  $\forall i$  выполняется  $(V_{ii} \leq V_{maxc})$  – значения скоростей изменения всех параметров не превышают порогов стабильности;
- $x4$ : для  $\forall i$  выполняется  $(V_{ii} \leq V_{maxn})$  – значения скоростей изменения всех параметров не превышают порогов нормальной динамики;
- $x5$ :  $\exists i$  для которого  $(V_{ii} \geq V_{maxn})$  – значение скорости изменения хотя бы одного параметра вне нормы;
- $x6$ :  $\exists i$  для которого  $(P_i \geq O_{Kmaxi}) OR (P_i \leq O_{Kmini})$  – значение хотя бы одного параметра вне норм, допустимых для параметрических отказов;

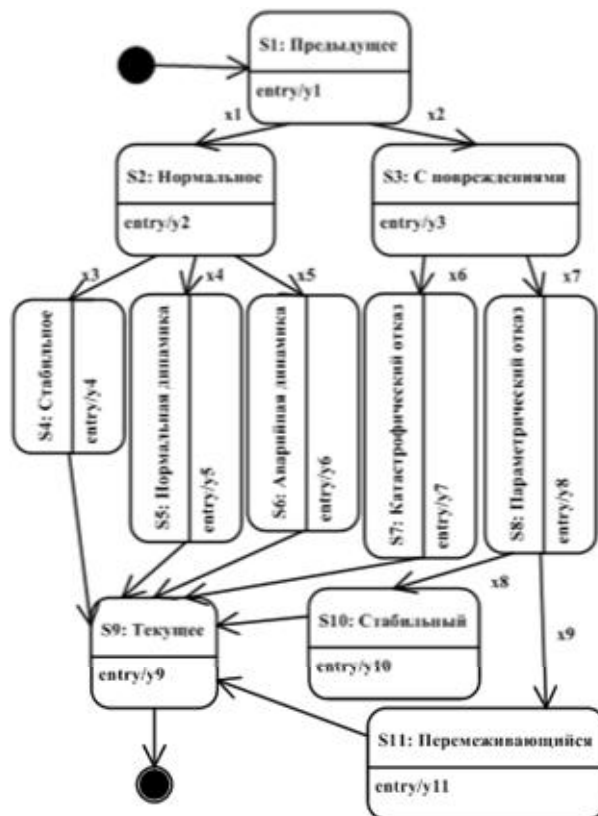


Рис. 4. Диаграмма состояний автомата АТС

x7:  $\exists i$  для которого  $(O_{\text{Пmax}i} < P_{ii} \leq O_{\text{Кmax}i})$  OR  $(O_{\text{Пmin}i} > P_{ii} \geq O_{\text{Кmin}i})$  – значение хотя бы одного параметра в пределах параметрического отказа, но вне норм катастрофического отказа;

x8: для  $\forall i$  выполняется  $(O_{\text{П}i} = 0)$  – в текущий момент не зафиксировано перемежающихся отказов;

x9:  $\exists i$  для которого  $(R_{\text{П}i} \& \bar{R}_{\text{П}i}) = 1$  – хотя бы для одного параметра в текущий момент не зафиксирован отказ, хотя он был зафиксирован в прошлом.

Выходы y1-y11 автомата описывают действия в состояниях, такие как документирование факта перехода в данное состояние и запуск соответствующих ОА по идентификации входов автомата и др.. Так в состоянии S2 запускаются ОА идентифицирующие входы x2-x4.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, процесс мониторинга состояний СТ может быть формализован с использованием системы ОА и УА, реализованных программно в среде приложения визуализации. Учет динамики состояний системы этих автоматов – основа для повышения эффективности использования СТ с применением идей систем искусственного интеллекта.

Предложенные автоматные модели состояний СТ предполагается использовать при разработке алгоритмического и программного обеспечения систем мониторинга и управления трансформаторами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассальский А.Н. Система мониторинга и управления силовых трансформаторов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – № 2.
2. Pink T, Stewart P. Power Transformer Control System Developments providing improved reliability and increased overload capacity // *Proceeding of TechCon@2004 North America* (San Antonio, Texas, January 28-29, 2004). pp 73-88.

3. Поляков М.А., Климов С.И. Методы и информационные технологии обработки данных мониторинга параметров силового трансформатора // *Вісник національного університету "Львівська політехніка"*. – 2009. – № 637. – С. 70-74.

4. Хренников А.Ю., Терешко О.А. Диагностика дефектов и примеры повреждений маслонаполненного трансформаторно-реакторного оборудования, турбогенераторов, измерительных трансформаторов тока, напряжения и ОПН // М: ИПКГосслужбы. – 2007. – 89 с.

5. Поляков М.А. Идентификация тепловых параметров силового масляного трансформатора по данным мониторинга параметров. // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту*. – 2007. – № 11, ч.1(117). – С. 167-173.

6. Поляков М.А. Определение и использование показателя режима нагрузки силового трансформатора в системе мониторинга и управления трансформатором // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 2. – С. 51-54.

7. Поляков М.А. Теоретико-множественная модель интегрированной контроллерной системы управления // *Системні технології*. – 2009. – № 4. – С. 131-137.

8. Поляков М.А., Ларионова Т.Ю. UML-модели сложных электрических аппаратов // *Вісник Кременчуцького держ. техн. ун-ту*. – 2010. – №3 (62). – част. 1. – С.85-88.

*Поступила 27.10.2010*

*Поляков Михаил Алексеевич, к.т.н., доц.*

Запорожский национальный технический университет  
кафедра "Электрические аппараты"  
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64  
тел. (061) 228-16-10, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua

*M.A. Polyakov*

#### **From monitoring of parameters – to monitoring of the states of power transformer.**

Modeling of conditions of power transformers by results of monitoring of its parameters is considered. The automatic model of dynamics of conditions of the power transformer, conditions of its application and diagnosing system are offered.

**Key words – transformer, monitoring, modeling of conditions.**