

УДК 658.012.011.56

**В.М. ЛЕВЫКИН, М.С. КУДРЯВЦЕВА**

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина*

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ НАРУШЕНИЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Получена новая математическая модель определения нарушений трансформаторного оборудования с использованием регулярных схем системных моделей.

В рамках разработанной структуры определения нарушений трансформаторного оборудования созданы алгоритмы определения нарушений в основных элементах трансформаторного оборудования, среди наиболее типичных нарушений для силовых и измерительных трансформаторов. Получены соответствующие математические модели определения нарушений силовых и измерительных трансформаторов.

**трансформаторное оборудование, регулярные схемы системных моделей, структура определения нарушений, граф-схема алгоритма, математическая модель определения нарушений**

### **Введение**

Серьезной проблемой в электроэнергетике является проблема износа электротехнического и энергетического оборудования. Большое количество технических средств электроэнергетического комплекса не отвечает современным стандартам, в том числе и по надежности, т.к. парк оборудования подстанций имеет большую долю оборудования, отработавшего установленный стандартами минимальный срок службы. По оценкам различных экспертов к 2005 г. износ основных фондов в среднем достиг 45 – 50% [1].

Повышение надежности поставки электроэнергии потребителям в первую очередь связано со снижением и быстрым устранением возникающих аварий, что накладывает жесткие требования не только к электроэнергетическому и электротехническому оборудованию и, главным образом, к силовому оборудованию (трансформаторному, коммутационному, защитному), но и к системам диспетчерского управления, контроля и диагностики.

**Постановка задачи исследования.** Трансформаторное оборудование используется: для формирования необходимых схем передачи электроэнергии от ее источника к потребителю в нормальных экс-

плуатационных режимах, в аварийных условиях, а также для обеспечения непрерывного контроля за состоянием систем высокого напряжения, ограничения возникающих перенапряжений и токов короткого замыкания в процессе эксплуатации.

По типу и номинальной мощности трансформаторы классифицируются на [2]:

- силовые трансформаторы (110кВ);
- измерительные трансформаторы тока и напряжения (35кВ, 110 – 750кВ);

В настоящее время все трансформаторное оборудование подстанций находится на пределе физического износа. Невозможность замены всех старых трансформаторов на новые ставит задачу совершенствования системы наблюдения, ухода за оборудованием, и принятия мер по предотвращению каскадных аварий с тяжелыми последствиями.

Целью работы является разработка математических моделей определения нарушений трансформаторного оборудования.

**Анализ достижений и публикаций, в которых предложено решение данной проблемы.** Существующая система «Диагностика+» предназначена для оценки технического состояния электрооборудования энергопредприятий. В частности, система рассчитана на диагностику состояния силовых масля-

ных трансформаторов и высоковольтных вводов [3].

Основные функции системы:

- ведение базы паспортных данных оборудования (паспортные и учетные данные на объекты);
- ведение базы данных испытаний оборудования (тепловизионный контроль, визуальный контроль, измерение частичных разрядов, измерения сопротивлений короткого замыкания, испытания трансформаторного масла, измерения параметров изоляции обмоток);
- ведение базы данных внешних и внутренних воздействий;
- проведение экспертизы оборудования (оценка состояния электрооборудования на основе результатов различных испытаний и измерений);
- генерация протокола экспертизы;
- просмотр графика интегральной функции состояния объекта.

Таким образом, данная система направлена на обнаружение дефектов, под которыми подразумевается ситуация, когда набор диагностических параметров, характеризующих состояние объекта после ряда тестов, достаточно хорошо согласуется по некоторому заранее установленному критерию с набором эталонных параметров, т.е. моделью дефекта. Это приводит к ясному и количественно определенному признаку существования или отсутствия дефекта оборудования.

### 1. Выделение нерешенных вопросов общей проблемы, которым посвящена данная статья

Однако, данная система подразумевает систематическое ведение базы данных испытаний, учитывающей большое число измерений (около 15 критериев, более 100 измерений), что затруднено в условиях большого количества установленного на подстанциях трансформаторного оборудования. Хотя оригинальный алгоритм и позволяет получить результаты даже в случае неполной исходной информации, это снижает их достоверность. А в случае

возникновения тяжелых аварийных событий, которые неизбежны на подстанциях, система не предоставляет диспетчеру достаточной информации для оперативного реагирования на нарушение и выполнения функций управления.

Поэтому актуальной является разработка математических моделей определения нарушений трансформаторного оборудования, которые позволяют по отдельным данным испытаний и измерений или визуальным характеристикам нарушения определить возможные последствия нарушения, причинно-следственные связи его возникновения и принять оперативные меры по его устранению. Такие модели позволят определить возможные варианты путей решений по предотвращению или локализации каскадных системных аварий, источником которых является трансформаторное оборудование.

### 2. Изложение основного материала исследования

Общая структурная схема определения нарушений трансформаторного оборудования содержит основные структурные элементы трансформаторов: силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения; распределение наиболее типичных нарушений для каждого типа трансформаторов, основные поврежденных элементов трансформаторного оборудования, причинно-следственные связи нарушений при работе трансформаторов с большим сроком службы. Общая структурная схема определения нарушений трансформаторного оборудования приведена на рис. 1.

Для формализации данной структуры целесообразно использовать модифицированный язык регулярных схем алгоритмов с построением на базе его регулярных схем системных моделей (РССМ) [4].

РССМ необходимо представить в виде, позволяющем полноценно описать всю динамику функционирования формализуемой структуры:

$$R = f(y_j, x_k, e, \emptyset, y, x, y), \quad (1)$$

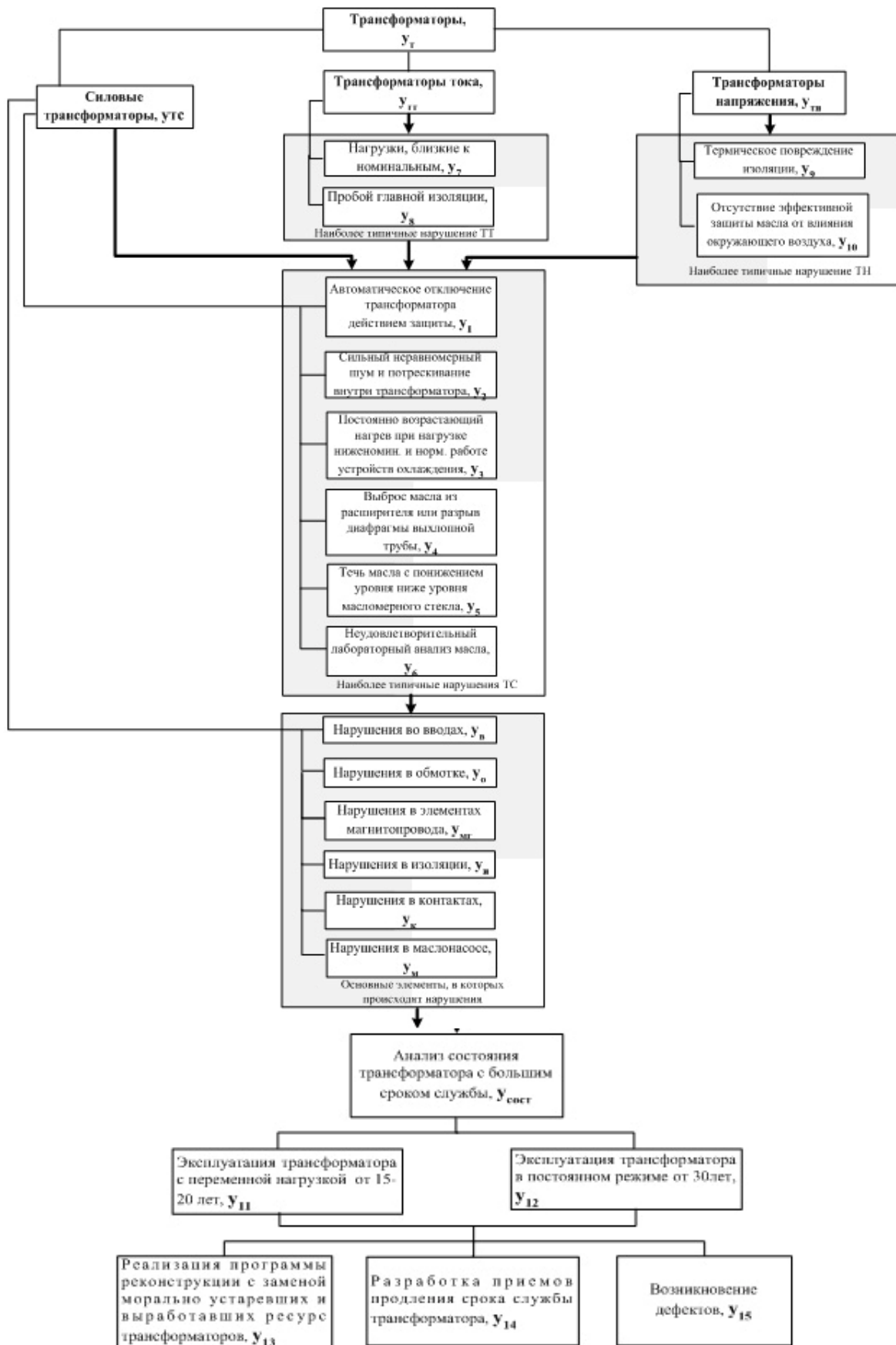


Рис. 1. Общая структурная схема определения нарушений трансформаторного оборудования

где  $y_j$  – элементы алгебры операторов  $R_0$ , определяющие все операции функционирования трансформаторного оборудования;

$x_k$  – логические условия (элементы алгебры условий  $R_y$ );

$e$  – тождественно-эквивалентный оператор;

$\emptyset$  – пустой оператор;

•

$y$  – процесс умножения элементов (последовательное выполнение операторов, задач строго в порядке их очередности);

$\vee$   
 $x$  –  $X$ -дизъюнктивный процесс (условное разветвление и соединение путей алгоритма вперед в зависимости от условия  $x_k$ );

$\wedge$   
 $y$  – процесс конъюнкции (безусловное разветвление одновременно на выполнение нескольких путей).

Тогда математическая модель определения нарушений трансформаторного оборудования определяется в общем виде как:

$$y_m = ( y_{mc} \vee y_{mm} \vee y_{mn} ) \cdot x_k \quad (2)$$

С учетом значений введенных элементов математическая модель примет вид:

$$\begin{aligned} y_m = & ( y_{mc} \cdot \{ y_1 \cdot y_2 \cdot y_3 \cdot y_4 \cdot y_5 \cdot y_6 \} \times \\ & \times \{ y_6 \cdot y_o \cdot y_{me} \cdot y_u \cdot y_k \cdot y_m \} \cdot \{ y_{cosm} \times \\ & \times (y_{11} \wedge y_{12}) \times (y_{13} \wedge y_{14} \wedge y_{15}) \} \vee \\ & \vee \{ y_{mm} \cdot (y_7 \wedge y_8) \} \cdot \{ y_1 \cdot y_2 \cdot y_3 \times \\ & \times y_4 \cdot y_5 \cdot y_6 \} \cdot \{ y_6 \cdot y_o \cdot y_{me} \cdot y_u \times \\ & \times \{ y_{cosm} \cdot (y_{11} \wedge y_{12}) \cdot (y_{13} \wedge y_{14} \wedge \\ & \wedge y_{15}) \} \vee \{ y_{mn} \cdot (y_9 \wedge y_{10}) \} \cdot \{ y_1 \times \\ & \times y_2 \cdot y_3 \cdot y_4 \cdot y_5 \cdot y_6 \} \cdot \{ y_6 \cdot y_o \cdot y_{me} \times \\ & \times y_u \cdot y_k \cdot y_m \} \cdot \{ y_{cosm} \cdot (y_{11} \wedge y_{12}) \times \\ & \times (y_{13} \wedge y_{14} \wedge y_{15}) \} ) \cdot x_k \quad (3) \end{aligned}$$

где  $y_n$  – элементы, определяющие все операции функционирования трансформаторов;

$n = \{1..15\}$ , {в, о, мг, и, к, м; тс, тт, тн; сост}: {в – вводы, о – обмотка, мг – магнитопровод; и – изоляция; к – контакты; м – маслонасос, тс – силовой трансформатор, тт – трансформатор тока, тн – трансформатор напряжения, сост – анализ состояния трансформатора с большим сроком службы};

$x_k$  – условие выбора трансформатора:

$$x_k = \begin{cases} TC - \text{силовой трансформатор;} \\ TT - \text{трансформатор тока;} \\ 0 - \text{трансформатор напряжения;} \end{cases}$$

$x_1$  – условие поиска нарушений среди наиболее типичных для силового трансформатора;

$x_2$  – условие поиска нарушений среди наиболее типичных для основных элементов силового трансформатора;

$x_3$  – условие поиска нарушений, которые возникли из-за проблемы работы трансформатора более установленного периода;

$x_4$  – условие поиска нарушений среди наиболее типичных для трансформатора тока;

$x_5$  – условие поиска нарушений среди наиболее типичных для трансформатора напряжения.

В рамках данной структуры целесообразно сформировать алгоритмы принятия решений по определению нарушений трансформаторного оборудования. Алгоритмы представляют собой совокупность действий, определяющих дальнейшую последовательность протекания нарушения, и соответствующих предписаний, обеспечивающих контроль за техническим состоянием трансформаторного оборудования.

Алгоритм определения нарушений в основных элементах трансформаторного оборудования включает стратегию определения нарушений во вводах, в обмотке, в элементах магнитопровода, в изоляции, в контактах, в маслонасосе, причинно-следственные связи и последствия нарушений в трансформаторе. Граф-схема алгоритма (ГСА) принятия решений по определению нарушений в основных элементах

трансформаторного оборудования представлена на рис. 2. Используя равносильные преобразования алгоритмов из ГСА в РССМ [4, 5], алгоритм функционирования можно представить в виде:

$$AF = f(y_j, x_k, e, \emptyset, y, x). \quad (4)$$

В общем виде математическая модель определения нарушений в основных элементах трансформаторного оборудования имеет вид:

$$AF(t_{нозм}) = \left( \begin{matrix} B & O & MГ & И & K & x_l \\ t_6 \vee t_o \vee t_{м2} \vee t_u \vee t_k \vee t_m \end{matrix} \right). \quad (5)$$

С учетом значений введенных элементов:

$$\begin{aligned} AF(t_{нозм}) = & \left( \begin{matrix} B \\ t_6 \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdot t_4 \cdot t_5 \vee t_o \times \\ x_l \end{matrix} \right) \times \\ & \times ([x_{i1} = a_1] \cdot t_6 \cdot t_7 \cdot t_8 \vee [x_{i1} = a_2] \cdot t_9 \times \\ & \times t_{14} \cdot t_{15} \vee [x_{i1} = a_3] \cdot t_{10} \cdot t_{11} \cdot t_{12} \cdot t_{13} \times \\ & \times \begin{matrix} O \\ t_{14} \cdot t_{15} \vee t_{м2} \cdot ([x_{i2} = a_4] \cdot ([x_{i3} = a_6] \times \\ \times t_{17} \vee [x_{i3} = a_7] \cdot t_{18} \cdot t_{19} \cdot t_{20}) \vee [x_{i2} = a_5] \cdot t_{21} \times \\ MГ \\ \times t_{22}) \vee t_u \cdot ([x_{i4} = a_8] \cdot t_{23} \cdot t_{24} \cdot t_{25} \vee \\ \vee [x_{i4} = a_9] \cdot t_{27} \cdot t_{29} \cdot t_{25} \cdot t_{26} \vee t_k \cdot \times \\ \times ([x_{i5} = a_{10}] \times t_{28} \cdot t_{29} \cdot t_{30} \cdot t_{31} \vee \\ K \\ \vee [x_{i5} = a_{11}] \cdot t_{32} \cdot t_{33} \cdot t_{30} \cdot t_{31}) \vee t_m \cdot t_{34} \times \\ x_l \\ \times ([x_{i6} = a_{12}] \cdot t_{35} \vee [x_{i6} = a_{13}] \cdot t_{36}) ) \times \\ \times \{ ([x_{i7} = a_{12}] \cdot t_{37} \cdot t_{38} \cdot t_{39} \vee [x_{i7} = a_{13}] \times \\ \times ([x_{i8} = a_{14}] \cdot t_{40} \vee [x_{i8} = a_{15}] \cdot t_{41}) \}, \end{matrix} \quad (6) \end{aligned}$$

где  $x_l$  – условие выбора элементов трансформатора:

$$x_l = \begin{cases} B - \text{вводы;} \\ O - \text{обмотка;} \\ MГ - \text{элементы магнитопровода;} \\ И - \text{изоляция;} \\ K - \text{контакты;} \\ 0 - \text{маслонасос;} \end{cases}$$

$t_i$  – элементы, определяющие все операции функционирования элементов трансформатора,

$$i = \{1..41\}, \{B, O, MГ, И, K, 0\};$$

$$x_{ij} - \text{логические условия, } j = \{1..8\};$$

$$a_k - \text{варианты выбора элементов, } k = \{1..15\}.$$

Алгоритм определения нарушений трансформаторного оборудования, среди наиболее типичных

для силовых трансформаторов, описывает наиболее часто происходящие нарушения, выявление причины и их последствия. ГСА определения нарушений трансформаторного оборудования среди наиболее типичных для силовых трансформаторов представлена на рис. 3.

Аналогично используя равносильные преобразования алгоритмов из ГСА в РССМ, математическую модель определения нарушений трансформаторного оборудования среди наиболее типичных для силовых трансформаторов можно представить:

$$AF(t_{мнсм}) = \left( \begin{matrix} 42 & 50 & 51 & 52 & 53 & x_p \\ t_{42} \vee t_{50} \vee t_{51} \vee t_{52} \vee t_{53} \vee t_{54} \end{matrix} \right), \quad (7)$$

С учетом значений введенных элементов:

$$\begin{aligned} AF(t_{мнсм}) = & \left( \begin{matrix} x_p \\ t_{42} \cdot ([x_{i9} = a_{16}] \cdot t_{43} \times \\ x_p \\ \times ([x_{i10} = a_{18}] \cdot t_{44} \vee [x_{i10} = a_{19}] \cdot t_{47} \vee \\ \times \{ ([x_{i7} = a_{12}] \cdot t_{37} \cdot t_{38} \cdot t_{39} \vee [x_{i7} = a_{13}] \times \\ \times ([x_{i8} = a_{14}] \cdot t_{40} \vee [x_{i8} = a_{15}] \cdot t_{41}) \} ) \times \\ \times t_{48}) \cdot t_{45} \vee [x_{i9} = a_{17}] \times a_{15} \cdot t_{41} \} \right), \quad (8) \end{matrix} \end{aligned}$$

где  $t_i$  – элементы, определяющие все операции функционирования силового трансформатора,

$$i = \{7, 8; 42..54\};$$

$$x_{ij} - \text{логические условия, } j = \{7..10\};$$

$$a_k - \text{варианты выбора элементов нарушений,}$$

$$k = \{12..20\}$$

$x_p$  – условие выбора наиболее типичных нарушений силовых трансформаторов:

$$x_p = \begin{cases} 42 - \text{автоматическое отключение действием защиты;} \\ 50 - \text{сильный неравномерный шум, потрескивание внутри;} \\ 51 - \text{постоянно возрастающий нагрев при нагрузке ниже номинальной и нормальной работе устройств охлаждения;} \\ 52 - \text{выброс масла из расширителя или разрыв диафрагмы выхлопной трубы;} \\ 53 - \text{течь масла с понижением уровня;} \\ 0 - \text{неудовлетворительный лабораторный анализ масла.} \end{cases}$$

Кроме определения нарушений, наиболее свойственных силовым трансформаторам, целесообразно отдельно рассмотреть процессы определения нарушений измерительных трансформаторов.

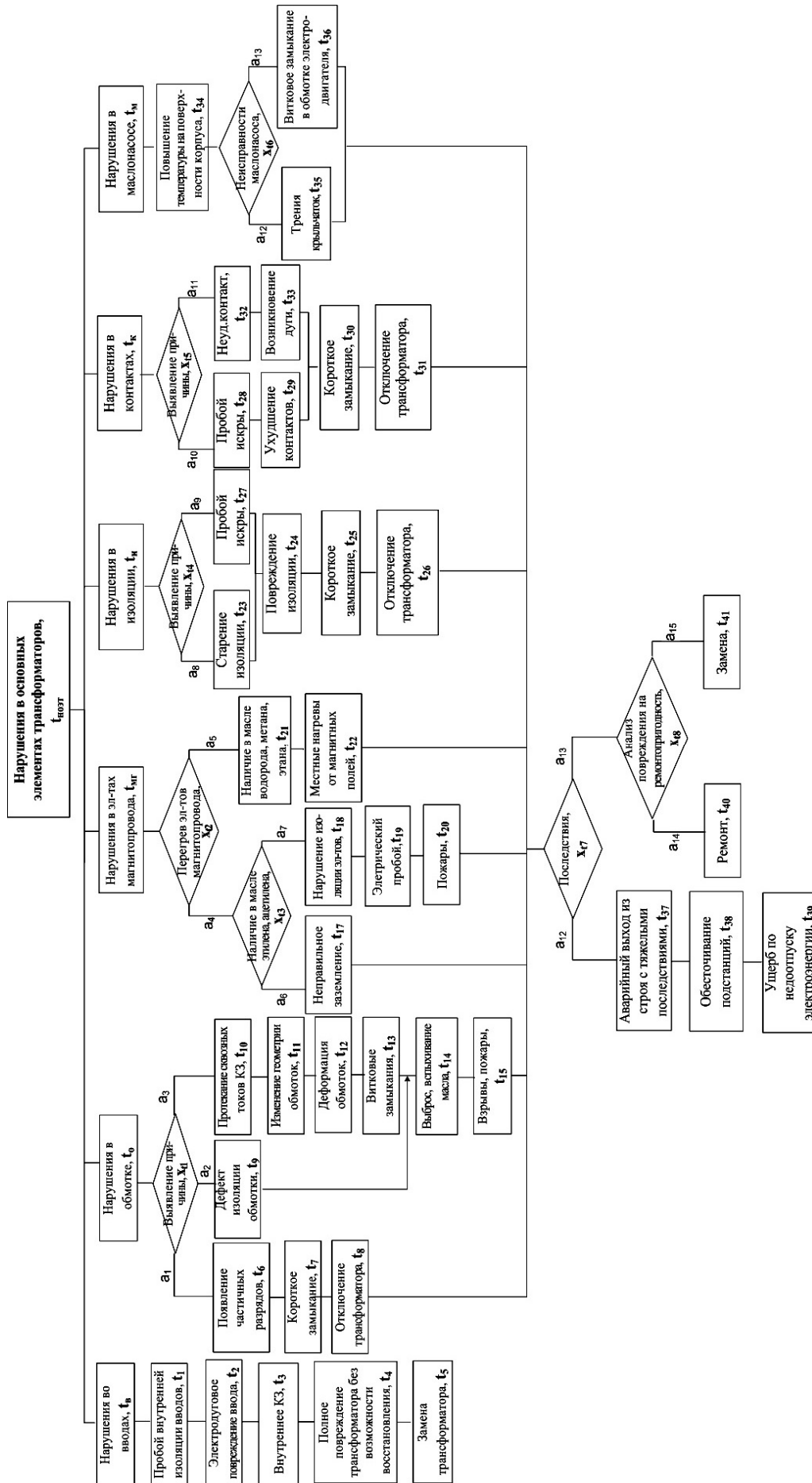


Рис. 2. Алгоритм определения нарушений в основных элементах трансформаторного оборудования

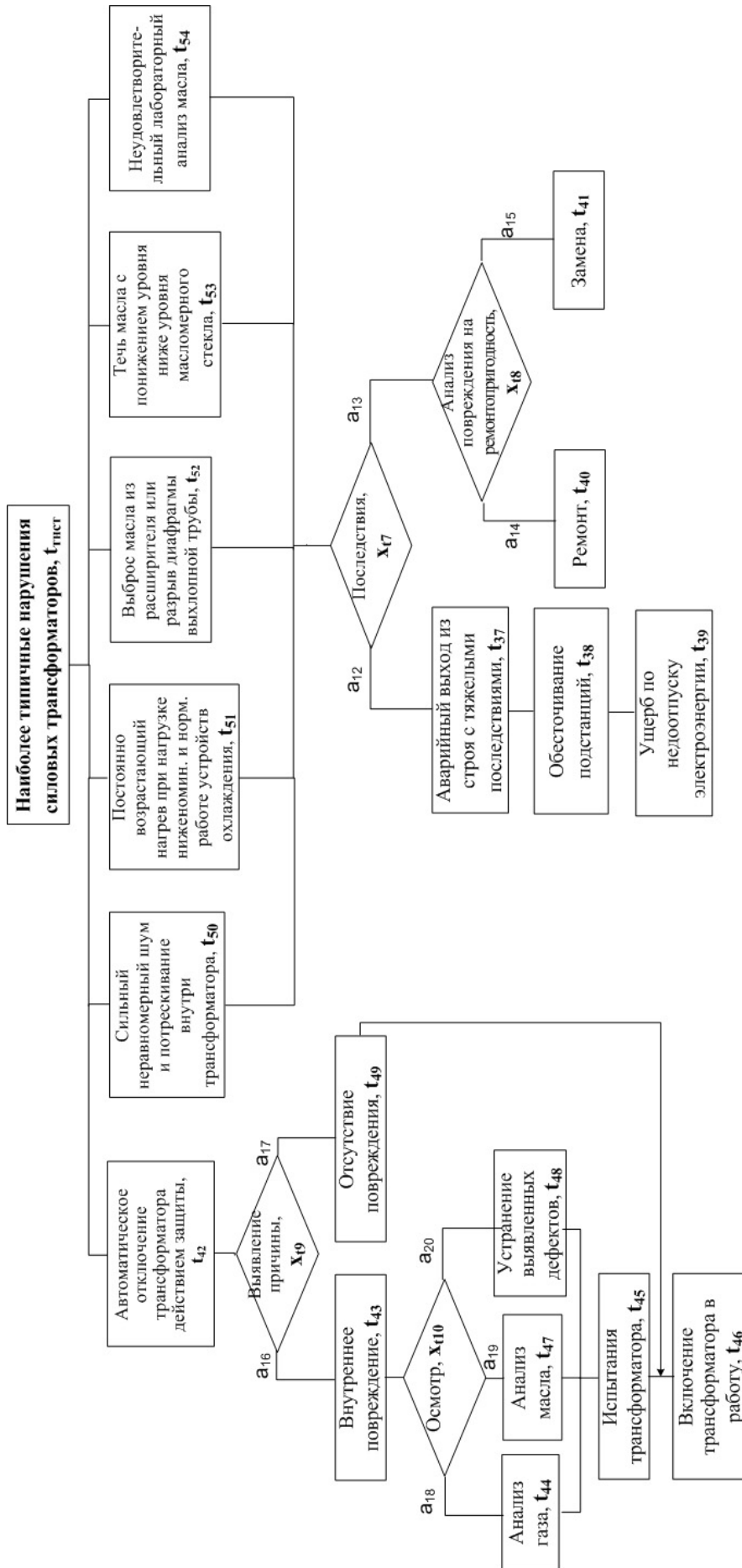


Рис. 3. Алгоритм определения нарушений трансформаторного оборудования среди наиболее типичных для силовых трансформаторов

ГСА определения нарушений трансформатора тока среди наиболее типичных для него нарушений приведена на рис. 4.

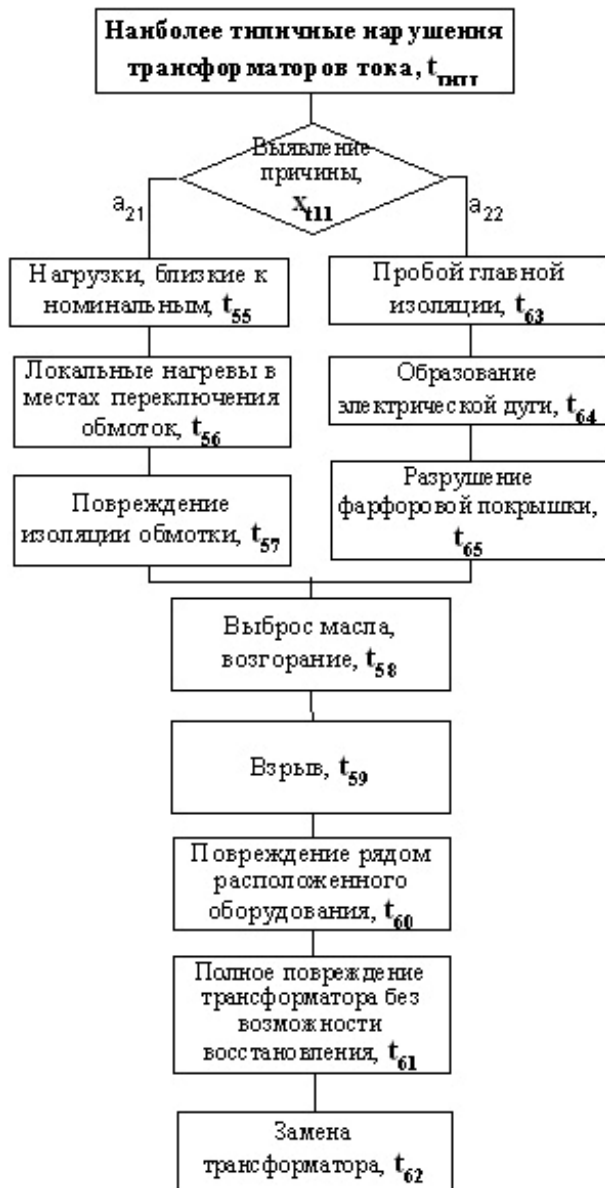


Рис. 4. Алгоритм определения нарушений трансформатора тока

Данный алгоритм можно представить в виде следующей математической модели:

$$AF(t_{mnmn}) = ([x_{111} = a_{21}] \cdot t_{55} \cdot t_{56} \cdot t_{57} \vee [x_{112} = a_{22}] \cdot t_{58} \cdot t_{59} \cdot t_{60} \cdot t_{61} \cdot t_{62}), \quad (9)$$

где  $t_i$  – элементы, определяющие все операции функционирования трансформатора тока,

$$i = \{55..62\};$$

$$x_{ij} - \text{логические условия, } j = \{11\};$$

$$a_k - \text{варианты выбора элементов нарушений;}$$

$$k = \{21..22\}.$$

ГСА определения нарушений трансформатора напряжения среди наиболее типичных для него нарушений приведена на рис. 5.

Алгоритм функционирования по определению нарушений трансформатора напряжения можно представить в виде следующей математической модели:

$$AF(t_{mnmn}) = ([x_{112} = a_{23}] \cdot t_{65} \cdot t_{66} \times \{([x_{17} = a_{12}] \cdot t_{37} \cdot t_{38} \cdot t_{39} \vee [x_{17} = a_{13}]) \times ([x_{18} = a_{14}] \times t_{40} \vee [x_{18} = a_{15}] \cdot t_{41})\} \vee, \vee [x_{112} = a_{24}] \cdot t_{67} \cdot t_{68} \cdot t_{69} \cdot t_{70}), \quad (10)$$

где  $t_i$  – элементы, определяющие все операции функционирования трансформатора напряжения,

$$i = \{65..70\};$$

$$x_{ij} - \text{логические условия, } j = \{7, 8, 12\};$$

$$a_k - \text{варианты выбора элементов нарушений;}$$

$$k = \{12, 15, 23, 24\}.$$

### Выводы из данного исследования

Таким образом, в работе получена новая математическая модель определения нарушений трансформаторного оборудования с использованием регулярных схем системных моделей.

В рамках разработанной структуры определения нарушений трансформаторного оборудования созданы соответствующие алгоритмы определения нарушений в основных элементах трансформаторного оборудования, среди наиболее типичных нарушений для силовых и измерительных трансформаторов. Получены математические модели определения нарушений силовых и измерительных трансформаторов.

Данные модели, описывая причинно-следственные связи нарушений и их последствия, дают возможность сотрудникам функциональных служб электроэнергетических систем оперативно принимать правильные меры по устранению последствий нарушений, что приводит к снижению и быстрому устранению возникающих аварий, предотвращению каскадных аварий с тяжелыми последствиями.



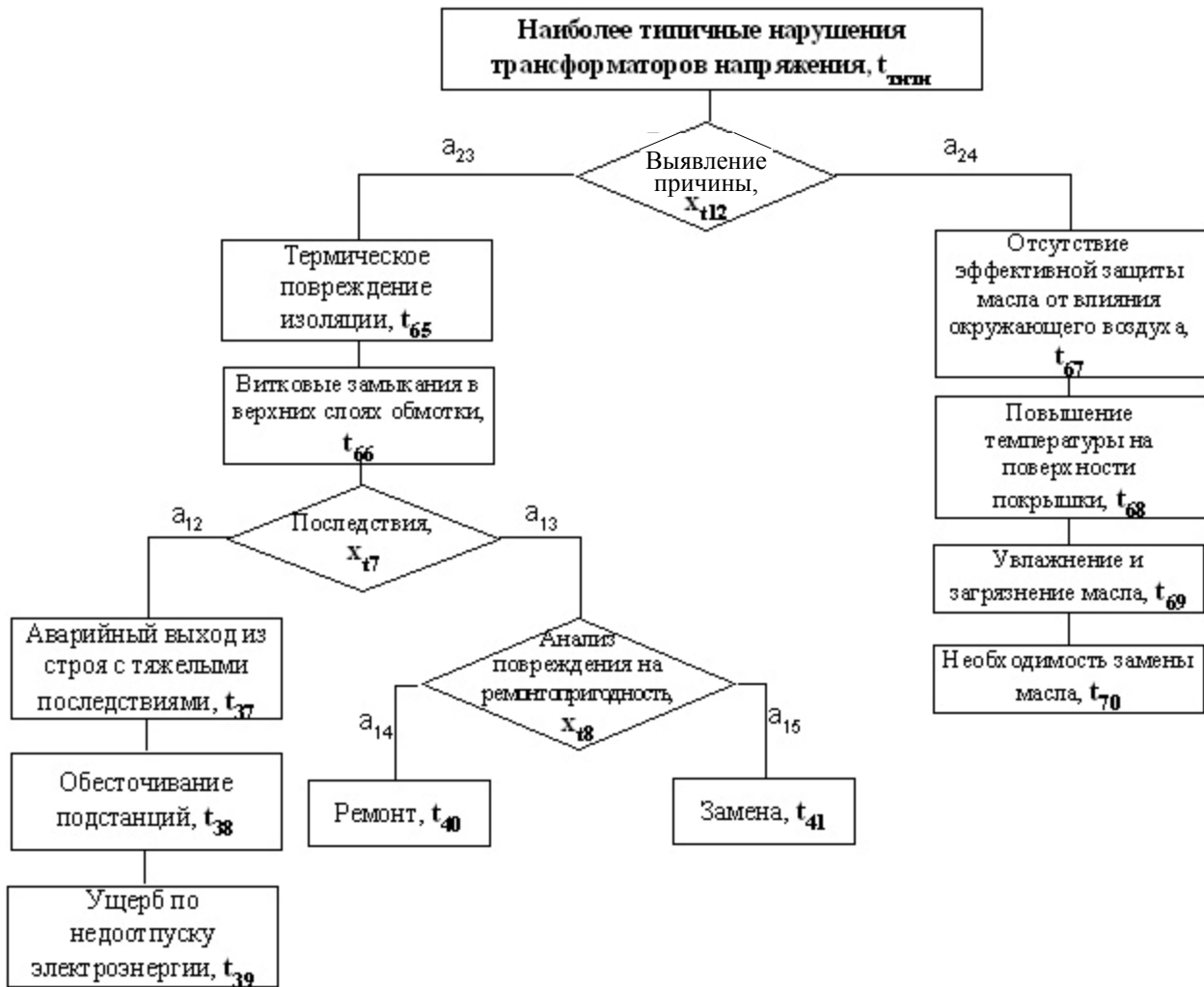


Рис. 5. Алгоритм определения нарушений трансформатора напряжения

## Литература

1. Алексеев Б.А., Мамиконянц Л.Г., Савваитов Д.С. Основное электрооборудование электрических станций и сетей // Электрические станции. – М.: НТФ "Энергопрогресс". – 2005. – № 2. – С. 65-74.
2. Смирнов А.Ю. Силовые устройства систем автоматизации энергетических установок и их характеристики // Электричество. М.: Энергия. – 2001. – № 5. – С. 10-17.
3. Экспертная система Диагностика+. Руководитель работ: Г.В. Попов. – ИГЭУ, кафедра БЖД. – Иваново, 2000. – 126 с.

4. Жихарев В.Я., Илюшко В.М., Чумаченко И.В. Математические основы проектирования рекурсивных автоматов с программируемой логикой. – Х.: Факт, 1999. – 144 с.

5. Чижухин Г.Н., Кулагин О.В. Синтез алгоритмов программ регулярными выражениями алгебры событий. // Электронный научный журнал «Системотехника». – 2003. – № 1. – С. 95-111.

Поступила в редакцию 10.06.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.