

УДК 621.313

О разработке вариофикационных моделей для представления развития дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах

Г.В. Попов, К.В. Чернов, А.С. Асташов, Ю.М. Овсянников
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: popov@bjd.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Задачи обеспечения процесса принятия решений в рамках автоматизированной системы оценки состояния электрооборудования вариофикационными моделями, описывающими развитие дефектов при эксплуатации трансформаторов, ранее не рассматривались и актуальны для исследования.

Материалы и методы: Основу построения вариофикационной модели составляет системная методология, в соответствии с которой вариофикация технологических нарушений состоит в обнаружении и раскрытии детерминированных, детерминированно-стохастических и стохастических процессов, инициируемых и разграничиваемых событиями и происшествиями, совокупная последовательность которых приводит к повреждению оборудования.

Результаты: Приведено описание методики создания вариофикационных моделей. Представлены модели взрывного разрушения баков силового трансформатора с расширителем и трансформатора с гофробаком. Описана возможность применения указанных моделей в составе экспертных систем оценки состояния электрооборудования.

Выводы: Количественный учет влияния каждого из процессов, приведенных в вариофикационных моделях, реализованный с помощью математического моделирования, делает возможным всестороннюю и более точную оценку надежности работы и прогнозируемого состояния электрооборудования.

Ключевые слова: силовой трансформатор, вариофикация, взрывное разрушение бака трансформатора, гофробак, экспертная система оценки состояния.

On Developing Varioficational Models for Defects in Power Oil – Filled Transformers

G.V. Popov, K.V. Chernov, A.S. Astashov, Yu.M. Ovsyannikov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: popov@bjd.ispu.ru

Abstract

Background: The problems to consider the decision-making process within the automated system of electrical equipment estimation by means of the variofical models are not studied before. Nowadays they are current for the research. Moreover, these variofical models can be used for the description of defects development during transformation operation process.

Materials and Methods: The basis of the construction of the variofical model is the system methodology. It means that the variofication of technological faults consists of finding deterministic, deterministic-stochastic and stochastic processes. These processes define through events and accidents that bring to the technical faults of equipment.

Results: The description of the development methodology of variofical models is considered. The models of explosive rupture of power transformer tanks and transformer with corrugation tanks are provided. The implementation of these models within evaluation expert system of electrical equipment is described.

Conclusions: Quantitative account of the effect of each process listed in variofical models, implemented by means of mathematical modeling, allows to make more comprehensive and accurate assessment of the reliability and projected posture of electrical equipment.

Key words: power transformer, variofication, explosive rupture of power transformer tanks, goffer tank, evaluation expert system.

В силовом трансформаторе под воздействием эксплуатационных факторов протекают процессы различной природы и интенсивности, вызывающие старение и деструкцию его элементов. Существующие и разрабатываемые математические модели указанных процессов позволяют с различной степенью достоверности количественно оценить влияние того или иного эксплуатационного фактора. Комплексное использование этих моделей, в свою очередь, повышает достоверность диагностирования состояния и качество управления процессами технического обслуживания и ремонта силовых трансформаторов.

Наметившаяся в последнее время общемировая тенденция на создание «интеллек-

туальных сетей» предполагает использование многоаспектных моделей комплексной оценки состояния электрооборудования. При этом не вызывает сомнений тот факт, что управление подобными процессами будет осуществляться на базе экспертных систем.

Ниже рассмотрен подход и предлагается методика разработки так называемых вариофикационных¹ моделей, занимающих верхний уровень в иерархии математического обеспе-

¹ Вариофикация (лат. *Varians* – изменение и *facio* – делаю) – раскрытие внутрикомпонентных процессов и процессов взаимодействия, инициируемых и перемежаемых событиями и происшествиями, которые происходят и могут происходить в системе.

чения процесса принятия решений в рамках автоматизированной системы оценки состояния электрооборудования.

Основу построения указанных моделей составляет системный подход к возникновению технологических нарушений в работе электрооборудования. Вариофикация технологических нарушений заключается в обнаружении и раскрытии детерминированных, детерминированно-стохастических и стохастических процессов, инициируемых и разграничиваемых событиями и происшествиями, совокупная последовательность которых приводит к повреждению оборудования [1]. Итог обнаружения и раскрытия процессов и событий предстает в виде графической вариофикационной модели, состоящей из представленных в табл. 1 элементов.

Большинство трансформаторов, установленных на электроэнергетических предприятиях РФ, являются маслонаполненными и имеют срок эксплуатации, превышающий нормативный. В ходе эксплуатации под воздействием различных эксплуатационных факторов техническое состояние трансформаторов ухудшается, в них появляются различные дефекты и в случае неэффективного диагностирования и непринятия соответствующих мер может произойти отказ, вплоть до возникновения взрыва бака (рис. 1).



Рис. 1. Силовой трансформатор с расширителем

Для повышения эффективности диагностирования трансформаторов представляется целесообразным разработать вариофикационные модели разных происшествий, включая взрывное разрушение бака трансформатора, как наиболее опасного и тяжелого по последствиям.

Аварии и взрывы высоковольтных маслонаполненных трансформаторов определя-

ются образующейся при пробое изоляции дугой. Нарастающее давление в корпусе трансформатора приводит к его разрушению. Оно вызвано большим количеством энергии, высвобождающейся в виде теплоты при образовании электрической дуги [2]. Рассмотрим этот процесс более подробно.

Количество энергии, переданное в масло трансформатора при внутреннем коротком замыкании, расходуется:

- 1) на образование электронами канала разряда и поддержание его заряженными частицами;
- 2) нагрев жидкости до температуры насыщения при столкновениях с заряженными частицами;
- 3) испарение, т.е. на преодоление сил межмолекулярного сцепления в жидкой фазе и на работу расширения при превращении жидкости в пар;
- 4) разрыв химических связей в молекулах заряженными частицами, приводящий к образованию радикалов;
- 5) последующую фрагментацию молекул и рекомбинацию осколков с образованием сажа и углерода и газовой фазы

Преодоление сил межмолекулярного сцепления в жидкой фазе и расширение при превращении жидкости в пар вызывают движение частиц трансформаторного масла. При этом теплота испарения преобразуется в кинетическую энергию движущегося масла. Скорость движения обуславливается количеством масла и кинетической энергией, т.е. теплотой испарения. Стенки бака служат препятствием, инициирующим гидравлический удар. Увеличение давления при гидравлическом ударе представляет собой внутреннее избыточное давление взрывного разрушения бака.

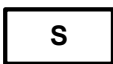




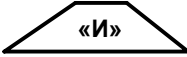
Скорости выделения энергии при дуговом разряде, преобразование ее части в теплоту испарения и кинетическую энергию, приводящую к гидравлическому удару, столь велики, что предохранительный клапан должным образом не срабатывает, а бак становится разрушающимся сосудом под давлением.

Внутреннее избыточное давление взрывного разрушения бака можно оценить по формуле

$$p_R = \frac{2\sigma\varphi s}{D + s},$$

где D – внутренний диаметр овальной части бака, мм; s – толщина стенки, мм; σ – временное сопротивление или предел прочности, т.е. механическое напряжение, выше которого происходит разрушение материала, МПа; φ – коэффициенты прочности сварных швов.

Таблица 1. Графическое представление элементов вариофикационной модели

Обозначение	Содержание
	Рассматриваемое технологическое нарушение в работе электрооборудования
	Событие, наступающее в ходе эксплуатации оборудования и оказывающее существенное влияние на его техническое состояние (увеличение напряженности электрического поля внутри бака, возникновение электрического разряда в изоляционном промежутке и т.д.); может быть отправным или промежуточным
	Предваряющий процесс, в результате протекания которого безусловно наступает технологическое нарушение (процесс динамического воздействия газомасляной смеси на конструктивные элементы трансформатора при наличии устойчивого дугового разряда внутри его бака)
	Процесс, инициирующий наступление очередного события при эксплуатации оборудования (например, процесс ухудшения диэлектрических показателей твердой изоляции трансформатора вследствие ее теплового термического старения)
	Условие отдельного протекания нескольких промежуточных процессов в части их влияния на наступление события
	Условие совместного протекания нескольких промежуточных процессов в части их влияния на наступление события

Увеличение давления при одномерном гидравлическом ударе определяется по формуле Н.Е. Жуковского:

$$p = \rho(v_0 - v_1)c,$$

где p – увеличение давления, Н/м²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; v_0 и v_1 – средние скорости в трубопроводе до и после перекрытия сечения для перемещения жидкости, м/с; c – скорость распространения ударной волны вдоль трубопровода.

Скорость масла с учетом сферической симметрии при гидравлическом ударе, разрушающем бак, определяется по формуле

$$v_m = \frac{3p_R}{C_m \rho_m},$$

где C_m – скорость распространения ударной волны, равная скорости звука в масле (1390 м/с); ρ_m – плотность жидкости (895 кг/м³).

Количество масла, приводимое в движение расширяющейся парогазовой смесью, которая образована дуговым разрядом (ДР), обусловливается количеством масла в трансформаторной установке. Количество кинетической энергии, приобретаемой движущимся маслом, рассчитывается как

$$E_m = \frac{m_m v_m^2}{2},$$

где m_m – количество масла; v_m – скорость движения масла.

При тяжелых авариях время горения ДР может достигать сотен миллисекунд, а энергия – 100 МДж. Коэффициент газообразования равен

$$V_r = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{Дж}.$$

Объем образующихся газов

$$V_r = E_{др} V_r.$$

Масса жидкого масла, превратившаяся в газ, определяется как

$$M_{ж-п} = M_r = \rho_r V_r.$$

Энергия, затрачиваемая на фазовый переход, т.е. на испарение, находится по формуле

$$E_{ж-п} = M_{ж-п} r_{исп}.$$

Скрытая теплота парообразования масла, кДж/кг, составляет

$$r_{исп} = 236,44 + 0,9233(t_{кип} - 350).$$

Энергия дугового разряда, Дж, равна

$$E_{др} = \frac{9 m_m p_R^2}{2 \rho_m^2 C_m^2 r_{исп} \rho_r V_r}.$$

При горении дуги в масле, когда процесс не затрагивает твердой изоляции, в основном образуются водород (60–80 %) и ацетилен (10–25 % по объему). Объемное содержание метана – 2–4 %, этилена – 1–2 %. В случае, если горение дуги затрагивает пропитанную маслом твердую изоляцию на основе целлюлозы, также наблюдается большой выход водорода и ацетилена. Однако наряду с этим в значительном количестве образуется окись и двуокись углерода и повышается содержание метана в смеси газов.

Взрывное разрушение бака создает воздушную ударную волну, разлетающиеся осколки оболочки и разброс жидкого масла с определенной зоной взрывного воздействия на работников и оборудование станции. Выброс масла и газов, в свою очередь, может сопровождаться горением и взрывами с зоной поражающего воздействия на работников и смежное оборудование станции.

На рис. 2 приведено графическое изображение модели, вариофицирующей взрывное разрушение бака трансформатора.

Данная модель описывает причинно-следственную взаимосвязь различных процессов и событий, имеющих место в процессе эксплуатации трансформатора с рассмотренными выше последствиями. Описание каждого блока разработанной модели приведено в табл. 2.

Для трансформаторов класса напряжения 35 кВ мощностью до 10000 кВ·А в последнее время весьма распространенной стала тенденция компенсации температурного расширения масла посредством изготовления бака, меняющего свой внутренний объем. Такая конструкция получила название гофробака (рис. 3).

В данном случае тепловое расширение трансформаторного масла компенсируется не с помощью расширителя, а упругими деформациями тонкостенных гофрированных металлических пластин бака. Характерной особенностью данного типа маслonaполненного оборудования является изоляция внутреннего объема бака трансформатора от окружающей среды, что значительно улучшает условия работы масла, практически исключает его увлажнение, окисление и шламообразование. При этом обязательным условием качественного исполнения герметичных трансформаторов также является глубокая дегазация трансформаторного масла перед его заливкой.

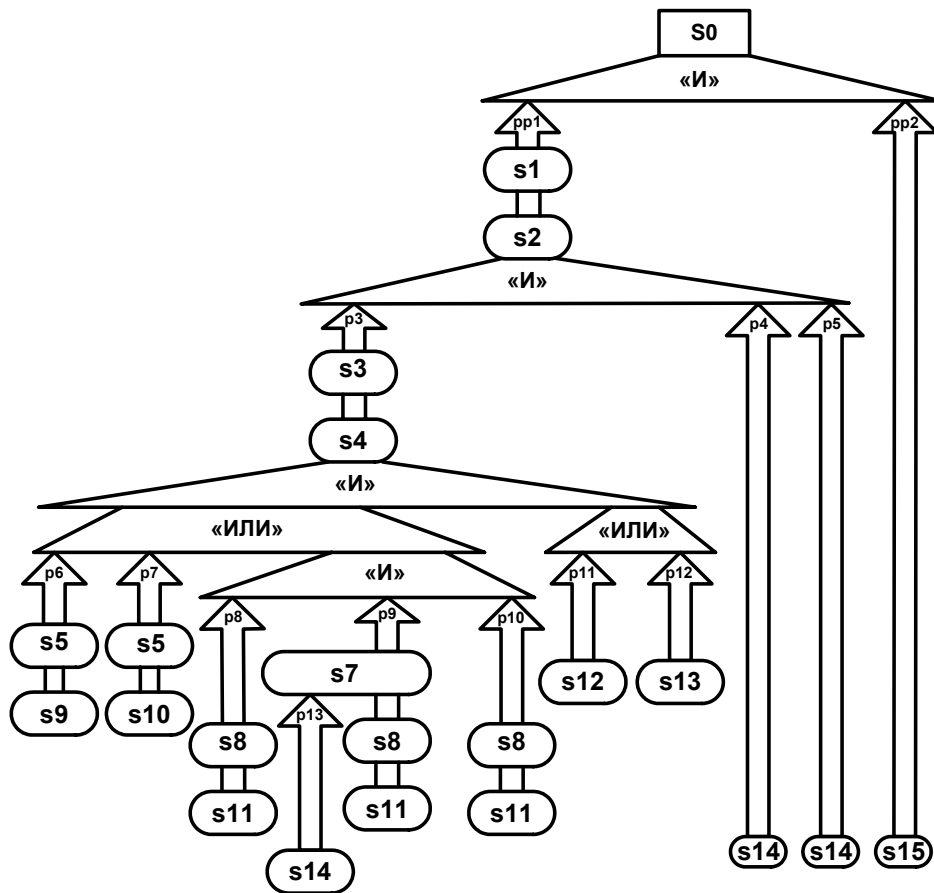


Рис. 2. Вариофикационная модель взрывного разрушения бака маслonaполненного силового трансформатора с расширителем

Таблица 2. События и процессы в трансформаторе при взрыве бака

Идентификатор	Описание блока	Длительность, с
S0	Взрывное разрушение бака трансформатора	$10^{-1} \div 1$
pp1	Процесс динамического, или силового, взаимодействия массива масла и оболочки (бака) трансформатора вследствие дугового разряда. Показателями данного процесса, в котором участвуют термодинамическая энергия массива масла и механическая энергия материала деталей оболочки, являются давление масла и скорость роста давления. При незначительной скорости роста давления срабатывает предохранительный клапан трансформатора, уменьшая величину давления внутри бака до допустимых пределов	$10^{-1} \div 1$

Идентификатор	Описание блока	Длительность, с
pp2	Процесс в оболочке, характеризуемый изменением состояния материала деталей оболочки вследствие влияния переменных условий длительной эксплуатации. Данный процесс приводит к постепенному накоплению дефектов и ухудшению механических свойств бака трансформатора	$(8 \div 16) \cdot 10^8$
s1	Отказ предохранительного клапана. Это событие является промежуточным относительно процесса pp1 и описывает возможный отказ при срабатывании предохранительного клапана трансформатора	$(5 \div 9) \cdot 10^{-2}$
s2	Возникновение дугового разряда в массиве масла между отводом ВН и стенкой бака. Это промежуточное стохастическое событие завершает несколько промежуточных процессов (р3, р4, р5), приводящих к возникновению дугового разряда	$10^{-1} \div 1$
р3	Процесс развития пробоя в изоляционном промежутке между витками обмотки или шинами отвода и стенкой бака. Данный процесс характеризуется возникновением, увеличением интенсивности частичных разрядов вследствие повышенной напряженности электрического поля в баке трансформатора	$(8 \div 16) \cdot 10^8$
р4	Процесс в твердой изоляции, характеризуемый изменением ее состояния вследствие старения. Данный процесс характеризуется ухудшением качества и, как следствие, ухудшением диэлектрических свойств твердой изоляции	$(8 \div 16) \cdot 10^8$
р5	Процесс в жидкой изоляции, характеризуемый изменением ее состояния вследствие старения. Данный процесс характеризует окисление входящих в состав масла углеводородов и сернистых продуктов, а также образование и рост размеров коллоидных частиц в масле, снижающих изоляционную прочность жидкой изоляции	$(8 \div 16) \cdot 10^8$
s3	Отказ газового реле. Это событие является промежуточным относительно процесса р3 и описывает возможный отказ в работе газового реле трансформатора при интенсивном газообразовании внутри бака	$(5 \div 9) \cdot 10^{-2}$
s4	Напряженность электрического поля между отводом и стенкой бака достигает значения, соответствующего пробивному напряжению. Наступает вследствие повышения напряженности электрического поля при перенапряжениях и снижения пробивного напряжения жидкого или твердого диэлектриков	$1 \div 10$
р6	Процесс повышения напряженности электрического поля при увеличении силы тока в отводе вследствие прихода в активную часть трансформатора фронта волны грозового разряда. Данный процесс отражает влияние атмосферных перенапряжений на изоляцию обмоток трансформатора, имеющих место при возникновении грозовых разрядов вблизи энергообъекта	$10^2 \div 3$
s5	Отказ ограничителя перенапряжения. Это событие является промежуточным относительно процессов р6 и р7, описывает возможный отказ в работе ограничителя перенапряжения при воздействии фронта грозовой волны или возникновении коммутационного перенапряжения	$10^{-1} \div 1$
р7	Процесс повышения напряженности электрического поля при увеличении силы тока в отводе вследствие коммутационных перенапряжений. Данный процесс происходит вследствие резкого изменения параметров сети из-за заряда и перезаряда ее емкостей при переходе от одного состояния к другому, которое вызывается коммутациями электроустановок	$10^2 \div 3$
р8	Процесс повышения напряженности электрического поля при увеличении силы тока в обмотке вследствие внешнего короткого замыкания	$10^2 \div 3$
р9	Процесс повышения напряженности электрического поля при уменьшении диэлектрического промежутка между отводом и стенкой бака вследствие смещения отвода, вызванного ударным током КЗ. Данный процесс отражает возникновение деформаций обмоток трансформатора при протекании по ним тока короткого замыкания	$10^2 \div 3$
s6	Электромеханическое усилие при КЗ достигает значения механической прочности крепления отвода, понижающейся в условиях длительной эксплуатации. Это событие является промежуточным относительно процесса р9 и отражает момент начала деформации обмотки и смещения отвода трансформатора	$10^{-1} \div 1$

Идентификатор	Описание блока	Длительность, с
p10	Процесс снижения пробивного напряжения при уменьшении сопротивления твердой изоляции вследствие термической деструкции, вызванной током КЗ. Данный процесс сопровождается перегревом металлического проводника обмотки и снижением изоляционных свойств целлюлозной изоляции	$10^{-2} \div 3$
s7	Отказ релейной защиты. Это событие является промежуточным относительно процессов p8, p9 и p10, поскольку они могут происходить при относительно длительном действии тока короткого замыкания, так как при правильной работе устройств релейной защиты оборудования поврежденный участок сети отключается мгновенно и уровень негативного воздействия тока короткого замыкания на элементы трансформатора минимизируется	$(1 \div 9) \cdot 10^{-2}$
s8	Прямой удар молнии в провод ВЛ, инициирующий возникновение в сети атмосферного перенапряжения. С момента наступления этого стохастического события начинается протекание процесса p6	$10^{-3} \div 1$
s9	Коммутация элементов сети, резко изменяющая ее параметры. Данное событие может спровоцировать коммутационное перенапряжение и дать начало процессу p7	$10^{-3} \div 1$
s10	Внешнее КЗ в сети. Данное событие инициирует процессы p8, p9 и p10	$10^{-2} \div 3$
p11	Процесс снижения пробивного напряжения жидкой изоляции вследствие поступившей в масло эмульсионной воды. Данный процесс отражает ухудшение изоляционных свойств жидкой изоляции вследствие увеличения влажности масла в процессе эксплуатации (при разложении целлюлозы, попадание влаги в масло из воздуха)	$1 \div 10^7$
s11	Поступление в масло эмульсионной воды. Данное событие инициирует процесс p11	$(1 \div 16) \cdot 10^8$
p12	Процесс снижения пробивного напряжения твердой изоляции вследствие попадания на ее поверхность растворенных в масле частиц металла. Данный процесс отражает ухудшение изоляционных свойств твердой изоляции вследствие увеличения количества металлических примесей в масле в процессе эксплуатации (при циркуляции масла вследствие его трения о металлические элементы системы охлаждения)	$(1 \div 16) \cdot 10^8$
s12	Поступление в масло частиц металла. Данное событие инициирует процесс p12	$(1 \div 16) \cdot 10^8$
p13	Процесс ухудшения состояния деталей крепления отводов обмоток трансформатора вследствие переменных условий длительной эксплуатации. Данный процесс отражает ухудшение качества крепления отводов обмоток трансформатора в процессе эксплуатации (вибрация, термическое воздействие, электродинамическое воздействие токов КЗ)	$(1 \div 16) \cdot 10^8$
s13	Эксплуатация трансформатора после устранения дефектов в рамках ремонта	$2,5 \cdot 10^8$
s14	Начало эксплуатации трансформатора после его установки на энергообъекте	1

В случае невыполнения этого условия при возникновении разряда внутри бака из масла начинает выделяться растворенный в нем воздух и внутри бака под крышкой образуется воздушная подушка, которая снижает надежность функционирования вводов и приводит к окислению масла.

На трансформаторах с гофробаком, ввиду отмеченных конструктивных особенностей, не устанавливаются газовое реле и предохранительный клапан. Специальные испытания и опыт эксплуатации показали, что возникновение дуги внутри гофробака не приводит к взрыву. Причина тому – меньшая жесткость

металлических стенок гофробака (их толщина составляет около 1 мм) по сравнению с обычным масляным трансформатором (2,5–4 мм). При внезапном росте давления внутри гофробака происходит местный разрыв гофры с выходом образовавшегося газа, при этом избыточного давления, приводящего к взрыву, не возникает.

Схема модели, вариофицирующей разрушение бака герметичного трансформатора с гофробаком, представлена на рис. 4.



Рис. 3. Масляный трансформатор с гофробаком ТМГ-630

Характерным отличием данной модели от модели взрывного разрушения бака трансформатора с расширителем является отсутствие процессов $p5/s2$, $p11/s4$ и $p12/s4$ ввиду изменившихся условий для масла, а также практически полного отсутствия технического обслуживания и ремонта данного типа оборудования.

В [3] приведены подходы к классификации дефектов в силовых трансформаторах. Выбрав конкретный подход, необходимо разработать подобные вариофикационные модели для каждого дефекта, а затем ввести эти модели в базы знаний соответствующих экс-

пертных систем (ЭС). Как правило, подобные ЭС являются ядром автоматизированных систем, создаваемых для диагностики электрооборудования в режимах on- или off-line. Одной из таких автоматизированных систем оценки состояния электрооборудования, разработанных в РФ, является система «Диагностика+» [4].

В качестве способа представления знаний в ЭС «Диагностика+» используются так называемые продукции, представляющие собой логические выражения вида «Если e , то h ». В теории ЭС e называется предположением, посылкой, а h – заключением, гипотезой. Нередко левая или (и) правая части продукции содержат составные посылки и гипотезы, состоящие из элементарных частей. Эти части связываются друг с другом так называемыми пропозициональными связками, среди которых наиболее часто употребляются конъюнкция (операция И) и дизъюнкция (операция ИЛИ) [5].

В качестве примера приведем одно из правил, предназначенных для занесения в базу знаний силовых трансформаторов:

ЕСЛИ в масле наблюдается рост O_2 ИЛИ N_2 , ТО возможна утечка масла ИЛИ повышенное увлажнение масла ИЛИ нарушение целостности мембраны в трубе (если она есть) ИЛИ нарушение целостности диафрагмы в расширителе (при ее наличии).

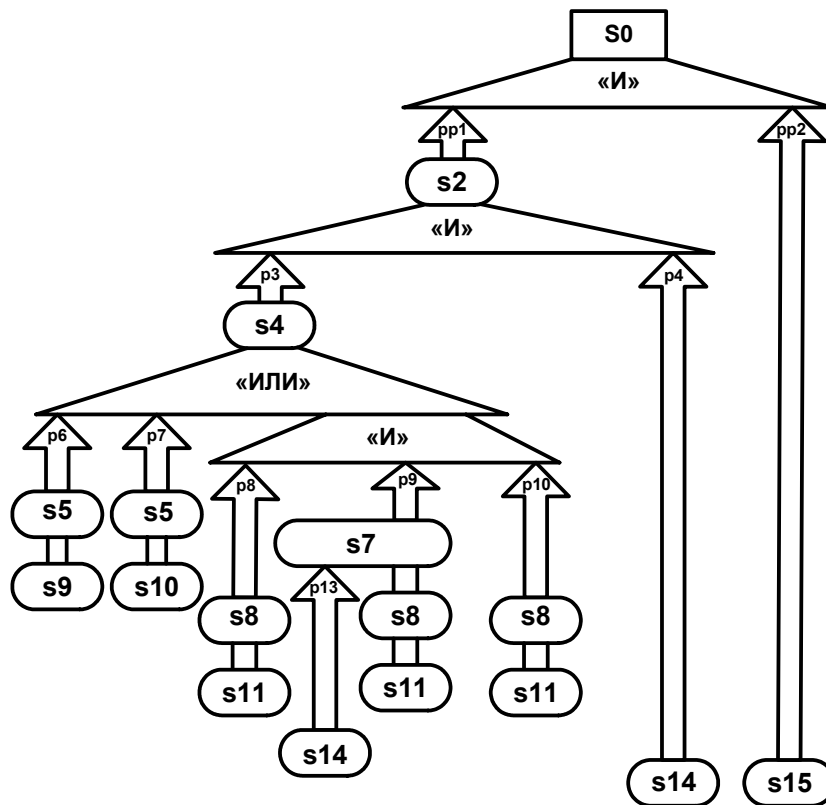


Рис. 4. Вариофикационная модель разрушения гофробака трансформатора

Подобные правила сначала формулируются на естественном языке, затем инженером по знаниям переписываются на специализированном языке «Z+» и вводятся в базу знаний. При решении конкретной задачи диагностики из множества правил специальной программой ЭС, получившей название «машины вывода», автоматически формируется алгоритм, обеспечивающий получение результата.

Представление знаний на базе продукционной модели обладает следующими достоинствами:

- независимостью правил, выражающих самостоятельные фрагменты знаний;
- легкостью и естественностью модификации знаний;
- простотой разделения системных и предметных знаний;
- возможностью решения задач в режиме реального времени.

Известны и в «Диагностике+» используются другие способы более компактного представления продукционных моделей знаний в виде таблиц решений и матриц Байеса [4]. Для ввода в ЭС знаний, формализованных в виде вариофикационных моделей, в настоящее время разрабатывается специальный редактор.

Знания, представляемые при использовании «Диагностики+» в виде таблиц решений, матриц Байеса и вариофикационных моделей, подвергаются дополнительной трансляции и в промежуточном виде представляются на языке «Z+», а затем уже выполняется процесс окончательной интерпретации информации.

Заключение

Количественный учет влияния на фактическое состояние оборудования, реализованный с помощью математического моделирования каждого из процессов, приведенных в вариофикационных моделях, позволяет более точно оце-

нить надежность работы и прогнозировать состояние электрооборудования.

Вариофикационные модели могут быть использованы в процессе обучения персонала служб энергопредприятий, занимающихся диагностированием электрооборудования.

Список литературы

1. **Чернов К.В.** Вариофикация техногенных опасностей трансформации электрической энергии // Проблемы управления безопасностью сложных систем: мат-лы XIX Междунар. конф. / Институт проблем управления РАН. – М.: РГГУ, 2011.
2. **Моделирование** взрыва высоковольтных маслонаполненных трансформаторов / В.Е. Фортов, Э.Е. Сон, В.С. Бондарь и др. // Известия Академии Наук. – 2011. – № 5. – С. 64–73.
3. **Попов Г.В.** Вопросы диагностики силовых трансформаторов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – 176 с.
4. **Экспертная** система оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» / Г.В. Попов, Е.Б. Игнатъев, Л.В. Виноградова и др. // Электрические станции. – 2011. – № 5. – С. 36–45.
5. **Башлыков А.А., Еремеев А.П.** Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. – М.: МЭИ, 1994. – 215 с.

References

1. Chernov, K.V. Variifikatsiya tekhnogennykh opasnostey transformatsii elektricheskoy energii [Technogenic Dangers Variification of Transformation of Electrical Energy]. *Materialy XIX Mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem»* [Proceedings of the XIX International Conference «Problems of Safety Management of Complex Systems»]. Moscow, RGGU, 2011.
2. Fortov, V.E. Modelirovanie vzyryva vysokovolt'nykh maslonapolnennykh transformatorov [Modeling the Explosion of High-Voltage Oil-Filled Transformers]. *Izvestiya Akademii Nauk*, 2011, no. 5.
3. Popov, G.V. *Voprosy diagnostiki silovykh transformatorov* [Diagnostics Issues of Power Transformers]. Ivanovo, 2012. 176 p.
4. Popov, G.V. *Ekspertnaya sistema otsenki sostoyaniya elektrooborudovaniya «Diagnostika+»* [Evaluation Expert System of Electrical Equipment «Diagnostika+»]. *Power Plants*, 2011, no. 5, pp. 36–45.
5. Bashlykov, A.A., Eremeev, A.P. *Ekspertnye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v energetike* [Expert Decision Support Systems in Power Engineering]. Moscow, MEI, 1994. 215 p.

Попов Геннадий Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности,
телефоны: (4932) 26-99-39, 26-99-37, 38-74-05,
e-mail: popov@bjd.ispu.ru

Чернов Константин Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности,
телефон +7 (4932) 41-25-42, 26-99-37,
e-mail: galla@dsn.ru

Асташов Алексей Сергеевич,
ОАО «Ивэнерго»,
инженер,
e-mail: astlexus@mail.ru

Овсянников Юрий Михайлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности,
телефоны: (4932) 41-25-42, 26-99-37,
e-mail: ovsjannikov@pochta.ru