



УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДЕРЕВА СОБЫТИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Левин В.М.¹, Зеленских А.А.¹, Петушков П.А.²

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

²АО «РЭМиС», г. Новосибирск, Россия

levin@power.nstu.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Повышение эффективности поддержки принятия решений по безаварийной эксплуатации ответственного электрооборудования требует совершенствования методов и алгоритмов обнаружения неисправностей, что, несомненно, является актуальной задачей. *ЦЕЛЬ.* Разработать эффективную и надёжную процедуру для целостного анализа, оценки и прогнозирования возможных неисправностей в маслонаполненном трансформаторном оборудовании, как в одном из критически важных активов энергопредприятия. *МЕТОДЫ.* При решении задач применяется метод анализа растворенных в масле газов (АРГ) как наиболее информативный с точки зрения оперативной оценки технического состояния трансформатора и обнаружения признаков его отклонений от нормы, а также усовершенствованный метод построения и анализа дерева событий (ДС), который сочетает традиционную структуру причинно-следственных связей с компонентами расчета индекса технического состояния оборудования. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Усовершенствование метода анализа дерева событий касается введения количественной меры важности причинно-следственных связей на каждом из иерархических уровней с определением вероятностей исходов каждого из инициирующих событий по заданной вероятности корневого события. Роль количественной меры выполняет система весовых коэффициентов, полученных с применением матриц парных сравнений Саати для каждого из уровней ДС. Сформирована логико-вероятностная модель ДС, позволяющая не только фиксировать взаимосвязи между событиями и последовательность их возникновения, но также ранжировать их по степени влияния на конечный нежелательный исход. Выполнены расчеты, подтверждающие эффективность предложенного подхода. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Получена логико-вероятностная модель ДС, обеспечивающая наряду с АРГ целостный анализ, оценку и прогнозирование возможных неисправностей маслонаполненного трансформаторного оборудования. Разработана эффективная процедура построения и анализа ДС с применением экспертных оценок и компонентов расчета индекса технического состояния оборудования. Продемонстрирована возможность эффективного применения разработанной модели на примере анализа причин монотонного превышения граничных концентраций оксида и диоксида углерода, растворенных в масле исследуемых трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор; неисправность; анализ дерева событий; важность причинно-следственных связей; логико-вероятностная модель; поддержка принятия решений; ранжирование событий.

Для цитирования: Левин В.М., Зеленских А.А., Петушков П.А. Усовершенствованный метод анализа дерева событий для обнаружения неисправностей в силовых трансформаторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-69-81.

AN ADVANCED EVENT TREE ANALYSIS METHOD FOR DETECTING FAULTS IN POWER TRANSFORMERS

Levin V.M.¹, Zelenskih A.A.¹, Petushkov P.A.²

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²JSC "REMiS", Novosibirsk, Russia

levin@power.nstu.ru

Abstract: RELEVANCE is improving the efficiency of decision support for the trouble-free operation of responsible electrical equipment requires improved methods and algorithms for fault detection, which is undoubtedly an urgent task. THE PURPOSE is to develop an effective and reliable procedure for the holistic analysis, assessment and prediction of possible malfunctions in oil-filled transformer equipment, as one of the critical assets of an energy company. METHODS. When solving problems, the dissolved gas analysis (DGA) method is used as the most informative in terms of the technical condition operational assessment of the transformer and detection of signs of its deviations from the norm, as well as an improved method for constructing and event tree analysis (ETA), which combines the traditional structure of cause-and-effect relationships with components for calculating the equipment health index. RESULTS. The improvement of the event tree analysis method concerns the introduction of a quantitative measure of the importance of cause-effect relationships at each of the hierarchical levels, with the determination of the probabilities of outcomes of each of the initiating events based on a given root event probability. The role of a quantitative measure is performed by a weighting coefficient system obtained using the matrices of paired comparisons of Saati for each ETA level. A logical and probabilistic ETA model has been formed, which allows not only to record the interrelationships between events and the sequence of their occurrence, but also to rank them according to the degree of influence on the final undesirable outcome. Calculations confirming the proposed approach effectiveness have been performed. CONCLUSION. A logical-probabilistic ETA model has been obtained, which provides, along with the DGA method, a holistic analysis, assessment and prediction of possible malfunctions of oil-filled transformer equipment. An effective procedure has been developed for constructing and analyzing data sets using expert assessments and components for calculating the equipment health index. The possibility of effective application of the developed model is demonstrated by analyzing the causes of monotonous excess of the boundary concentrations of carbon monoxide and carbon dioxide dissolved in the oil of the studied transformers.

Keywords: transformer; malfunction; event tree analysis; importance of cause-and-effect relationships; logical-probabilistic model; decision support; event ranking.

For citation: Levin V.M., Zelenskih A.A., Petushkov P.A. An advanced event tree analysis method for detecting faults in power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (4): 69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-69-81.

Введение (Introduction)

Одной из главных задач технической диагностики ответственного оборудования электростанций и электрических сетей является оперативная оценка и прогнозирование опасных неисправностей, способных привести к отказу работоспособности и другим нежелательным последствиям¹. Своевременное обнаружение факта и причин возможных неисправностей в электрооборудовании возлагается на системы поддержки принятия решений по его эксплуатации (СППР). СППР призваны обнаружить первичные признаки развивающихся неисправностей (дефектов), оценить степень риска дальнейшей эксплуатации объекта, выявить наиболее вероятные причины возникновения и предложить адекватные меры по их устранению (эксплуатационные воздействия). Внедрение подобных систем в эксплуатацию сложного, дорогостоящего и массового оборудования электростанций и электрических сетей, коим является высоковольтное маслонаполненное трансформаторное оборудование (МНТО) весьма актуально, а их разработка связана с решением сложной наукоёмкой технической задачи [1, 2]. Сложность задачи требует расширенного комплексного представления объекта с указанием не только признаков неисправности, как конечного нежелательного события, но и последовательности предшествующих её появлению промежуточных событий, обозначением их взаимосвязей и оценкой вероятностей возникновения. Для этих целей достаточно продуктивны методы анализа деревьев событий/отказов (ДС/ДО), имеющих отношение к теории анализа и управления рисками [3, 4].

Многочисленные исследования с применением классического метода синтеза и анализа ДС (ДО) связаны с представлениями о степени детализации описания системы при изучении её различных свойств. Так, например, ДС (ДО) широко применяется в исследовании надежности и безопасности структурно-сложных систем [5]. Предложения авторов главным образом направлены на расширение возможностей описательного

¹ ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 1989. – 21 с.

моделирования структурно-сложных систем применением логико-вероятностных моделей ДС для выбора и обоснования структур сложных технических систем на основе сравнительного анализа надежности исследуемых вариантов. В [6] предлагается расширить описание ДС физико-механическими процессами и детализировать алгоритм его синтеза и анализа. Отмечается, что классический метод синтеза и анализа ДС может работать как в структурном проявлении, с точки зрения логических схем взаимодействия элементов системы, так и в проявлении физическом, отражающем причинно-следственные связи деградиационных процессов, приводящих к конечному нежелательному результату. Это, безусловно, требует различной степени детализации описания системы и формализации экспертных знаний, которые не подлежат регламентации, а определяются исключительно спецификой решаемой задачи. Следует отметить, что синтез ДС представляет собой интеллектуальную процедуру и базируется на глубоких экспертных знаниях в предметной области. Процедура построения ДС начинается с определения «корневого» события – вершины ДС. После этого определяются все промежуточные события и их различные комбинации, которые приводят к «корневому» событию. Затем каждое из этих событий рассматривается как вершина ДС. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут требуемый по условию задачи уровень детализации и получены все исходные («инициирующие») события. Процедура анализа ДС выполняется в обратном порядке от каждого из «инициирующих» событий к «корневому». При этом цель анализа состоит в выявлении самой короткой цепочки ДС, либо, при наличии количественной оценки вероятностей событий, цепочки с максимальной суммарной вероятностью. Одно из направлений совершенствования классического метода синтеза и анализа ДС (ДО) – это автоматизация означенных процедур с применением программируемых модулей и баз знаний [7]. В статье [8] авторы отмечают, что алгоритмы принятия решений, как правило, обладают древовидной структурой и состоит из ветвей и узлов, подобно классическому методу ДС. Это гарантирует высокую точность классификации дефектов по правилам, аналогичным правилам структурного анализа ДС.

Потребности учета дополнительных факторов и степени их неопределенностей при расширении описания системы и процессов, инициализирующих события, с учетом специфики решаемых задач неоднократно приводили к попыткам усовершенствования базового метода синтеза и анализа ДС (ДО). Одна из подобных попыток касается расширения описания системы с применением причинно-следственных связей, учитывающих механизм и кинетику изменения состояний опасного производственного объекта [9]. Применение ДС (ДО) для задач идентификации неисправностей, оценки технического состояния и планирования профилактического обслуживания МНТО освещено в работе [10]. Здесь логико-вероятностная модель ДС устанавливает все причинно-следственные связи между первичными признаками идентифицируемой в трансформаторе неисправности и последовательностью событий, запускающих физические процессы деградации. Это позволяет расширить диагностическую модель объекта описанием событий, в той или иной степени иницирующих появление и развитие опасной неисправности, что очень важно с точки зрения выбора и введения эксплуатационных воздействий по её предотвращению или устранению. Другая известная идея усовершенствования метода синтеза и анализа ДС состоит во включении в расчет компонентов структуры индекса технического состояния оборудования и раскрыта в [11, 12] и [13, 14]. Несмотря на значительный вклад описанных исследований с применением методов построения и анализа ДС (ДО) такое научное направление, как диагностика неисправностей МНТО, определение причин и прогнозирование риска последствий отказа остаётся недостаточно изученным. Основное препятствие к этому кроется в ограниченных возможностях классического метода в формализации описания деградиационных процессов МНТО и сравнительной оценки альтернатив развития событий.

Для повышения интеллектуальных возможностей метода синтеза и анализа ДС, а также эффективности его практического применения в задачах диагностики неисправностей МНТО актуально расширение базового метода в направлении определения количественной меры значимости причинно-следственных связей на каждом из иерархических уровней ДС для ранжирования их по важности влияния на появление «корневого» события.

Целью исследования является усовершенствование базового метода анализа ДС за счет расширенного описания МНТО комбинацией двух типов моделей: модели оперативной идентификации неисправности (дефекта) на основе АРГ и ситуационной логико-вероятностной модели причинно-следственных связей с ранжированием их по важности и определением наиболее вероятной причины опасной неисправности. Научная значимость исследования состоит в дополнении логико-вероятностной модели ДС расчетом

количественной меры важности цепочек событий для выявления наиболее вероятного сценария развития неисправности. Практическая значимость исследования заключается в разработке регулярной вычислительной процедуры формализации специализированных экспертных знаний и ранжирования причинно-следственных связей ДС по важности их влияния на корневое событие. Это позволит усилить интеллектуальные возможности СППР по эксплуатации МНТО анализом наиболее вероятных причин и последствий неисправности и рекомендовать адекватные меры по их устранению.

Материалы и методы (Materials and methods)

Ранжирование МНТО по сроку службы, техническому состоянию, приоритетности вывода в ремонт, либо другим критериям широко применяется в задачах диагностирования и управления техническим обслуживанием и ремонтами (ТОиР) [15]. Оно позволяет осуществлять группировку оборудования по степени значимости в соответствии с выбранным целевым критерием. Одним из практических приложений подобного подхода является определение индекса технического состояния (ИТС) линий электропередачи и единиц основного электрооборудования (ЕО) станций и сетей². Методика расчета ИТС оборудования включает ряд компонентов: определение фактических значений параметров технического состояния функциональных узлов (ФУ) по данным диагностического контроля (мониторинга); балльная оценка групп параметров состояния ФУ; вычисление весовых коэффициентов ФУ и ЕО, каждый из которых характеризует важность элемента с точки зрения влияния на систему в целом, а их сумма на каждом из уровней равна 1; расчет итоговых значений ИТС ФУ и ЕО. Именно процедура определения весовых коэффициентов для каждой из рассматриваемых альтернатив необходима для усовершенствования метода синтеза и анализа ДС в комбинированной модели принятия решений по обнаружению и устранению неисправностей МНТО. Её реализация возможна с помощью одного из методов экспертных оценок, например метода Саати на основе формирования матрицы парных сравнений (МПС) [16]. Рассмотрим решение задачи на обобщенном числовом примере.

Пусть имеется некоторое ДС, отражающее ситуационное описание последовательности взаимосвязанных событий в эксплуатации трансформатора (рис. 1). Корневым событием служит исчезновение тока во вторичной обмотке. Для построения ДС применяются логические операторы, которые связывают входные и выходные события по принципу их подчиненности. Так, например, логический оператор «ИЛИ» с одним выходом и несколькими входами отражает обязательное появление выходного события при наличии любого из входных. На схеме ДС (рис. 1) логические операторы «ИЛИ» 1, 2, 3, 4 формируют двухуровневую иерархическую модель, объединяющую корневое, промежуточные и исходные события, которые с точки зрения принятия решений представляют собой известные альтернативы.

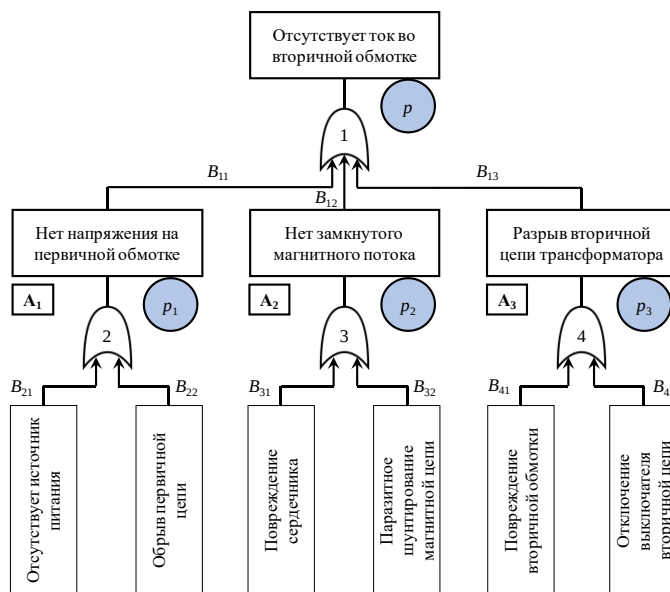


Рис. 1. Пример использования ДС

Fig. 1. An example of using the ET

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

² Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Утверждена приказом Минэнерго России от 26.07.2017, № 676. Доступно по: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-679-20200531-233201.pdf>. Ссылка активна на 05.01.2025.

Например, корневое событие – отсутствие тока во вторичной обмотке трансформатора может произойти по одной из альтернативных причин: A_1 – исчезновение напряжения на первичной обмотке; A_2 – отсутствие в сердечнике замкнутого магнитного потока; A_3 – разрыв вторичной цепи трансформатора. Формирование МПС и проверка полученных экспертных оценок на непротиворечивость производятся по следующему алгоритму.

1. Для каждого логического оператора на каждом иерархическом уровне ДС формируется квадратная МПС, размерность которой (n) определяется количеством рассматриваемых альтернатив. Так, например, для верхнего иерархического уровня ДС (рис. 1) при $n = 3$ формируется МПС размерностью (3×3) . На пересечении i -й строки и j -го столбца МПС с помощью чисел натурального ряда 1 – 9 проставляются экспертные оценки A_{ij} , характеризующие степени предпочтения i -й альтернативы по отношению к j -й. При примерно равноценном предпочтении i -й и j -й альтернатив $A_{ij} = 1$. Если степень предпочтения i -й альтернативы незначительно выше, чем j -й, $A_{ij} = 3$. Если i -я альтернатива предпочтительнее j -й, $A_{ij} = 5$. При значительном или явном предпочтении i -й альтернативы по сравнению с j -й оценки A_{ij} будут соответственно равны 7 или 9. В случае меньшего предпочтения i -й альтернативы по сравнению с j -й в МПС указываются обратные (дробные) оценки $(1/3, 1/5, 1/7, 1/9)$. Главную диагональ матрицы, таким образом, составляют единицы.

2. Определяются цены альтернатив как средние геометрические значения соответствующих строк МПС:

$$\Pi_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n A_{ij}}. \quad (1)$$

3. Определяется сумма цен альтернатив матрицы ($i = 1, \dots, n$):

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i. \quad (2)$$

4. Вычисляются весовые коэффициенты (веса, B_i) альтернатив (при этом сумма B_i в каждой строке МПС равна 1):

$$B_i = \frac{\Pi_i}{\Pi}. \quad (3)$$

Наиболее предпочтительной является альтернатива, имеющая максимальный вес.

5. Для проверки экспертных оценок на противоречивость находятся суммы j -х столбцов МПС:

$$C_j = \sum_{i=1}^n A_{ij}. \quad (4)$$

6. Рассчитывается вспомогательный коэффициент β суммированием произведений сумм столбцов МПС на веса альтернатив:

$$\beta = \sum_{j=1}^n (C_j \cdot B_j). \quad (5)$$

7. Определяется индекс согласованности экспертных оценок:

$$CI = \frac{\beta - n}{n - 1}. \quad (6)$$

8. Определяется значение случайной согласованности $(RC)^3$, зависящее от размерности МПС (количества альтернатив). Так согласно справочным данным, при $n = 3$, $RC = 0,58$.

9. Находится отношение согласованности оценок

$$CR = \frac{CI}{RC}, \quad (7)$$

для которого условие $CR \leq 0,2$ означает отсутствие необходимости корректировки МПС (экспертные оценки непротиворечивы)³.

Система весовых коэффициентов для альтернатив на каждом из иерархических уровней ДС (B_i) характеризует их важность (приоритетность) с точки зрения корневого события. При известной вероятности корневого события p_i весовые коэффициенты B_j позволяют определить вероятности промежуточных событий A_j по выражению:

³ Системный анализ и исследование операций: лаб. практикум для студ. спец. «Автоматизированные системы обработки информации» дневн. и дистанц. форм обуч. / С.С. Смородинский, Н.В. Батин. – Минск: БГУИР, 2009. – 64 с.

$$p_j = p_i \cdot B_j, (i, j = 1, \dots, n), j \neq i. \quad (8)$$

Подобным образом производится распределение вероятностей для всех промежуточных и исходных событий. Это обеспечивает целостность и повышает эффективность анализа логико-вероятностной модели ДС, так как позволяет определить и использовать количественную меру важности исходных событий, инициирующих нежелательное корневое событие в системе. Для логических операторов «ИЛИ» события нижних иерархических уровней могут быть интерпретированы как несовместные, поскольку появление любого из них достаточно для инициации корневого события. В этом случае предложенная процедура распределения вероятностей не противоречит теореме сложения вероятностей несовместных событий, в соответствии с которой вероятность появления одного из нескольких несовместных событий равняется сумме вероятностей каждого из них.

Ранжирование событий по важности в задачах диагностики неисправностей МНТО дает техническим службам энергопредприятий новую полезную информацию, необходимую для обоснованного принятия решений по дальнейшей безаварийной эксплуатации ответственного электрооборудования.

Для того, чтобы подчеркнуть целостность и оригинальность предложенного подхода, процедуру усовершенствования метода синтеза и анализа, ранжированных по важности причинно-следственных связей процессов (причин) возникновения неисправностей в МНТО целесообразно детально проиллюстрировать и обсудить на примере проблемной ситуации, которая в последнее время приобрела массовый характер на электрических станциях РФ.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В составе основного оборудования филиала ПАО «РусГидро» «Новосибирская ГЭС» с 2009 года работают 5 энергоблоков с новыми однотипными силовыми трансформаторами TNEPE-125000/110 PN компании ABB (Asea Brown Boveri Ltd.). В период начала эксплуатации указанного МНТО (2009-2017 гг.) метод анализа растворенных в масле газов (АРГ) зафиксировал систематический устойчивый монотонный рост концентраций оксида и диоксида углерода (CO , CO_2) у каждого из трансформаторов. При этом концентрации остальных характерных газов в масле соответствовали норме. Периодически концентрации CO и CO_2 превышали граничные значения, что указывало на возможное ускоренное старение масла и/или бумажной изоляции под действием повышенного окисления, увлажнения или перегрева. По нормам эксплуатации⁴ требовался дорогостоящий комплекс обследований. Проблемная ситуация с МНТО обострялась тем, что отмеченные факторы в явном виде отсутствовали, а проводимые дегазации масла практически не изменяли указанную тенденцию (рис. 2).

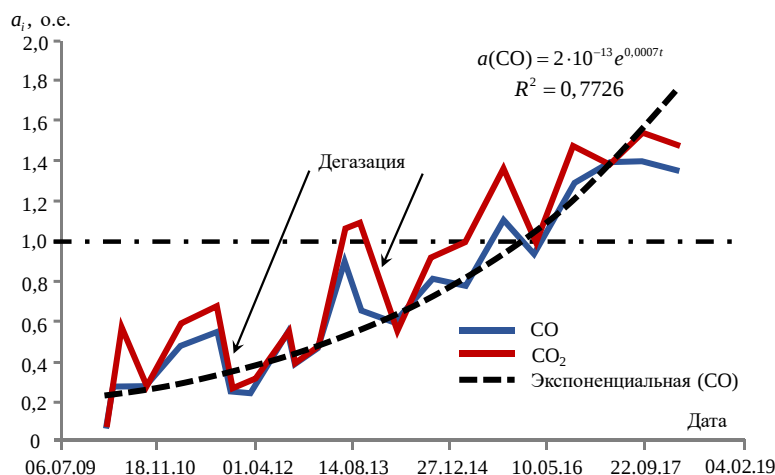


Рис. 2. Изменение концентраций CO и CO_2 в масле трансформаторов Новосибирской ГЭС
Fig. 2. Changes of CO and CO_2 concentrations in the oil of Novosibirsk HPP transformers

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

⁴ СТО РусГидро 02.01.124–2020. Силовые трансформаторы. Организация технической эксплуатации. Нормы и требования. Утвержден приказом ПАО «РусГидро» от 02.12.2020, № 1025. Доступно по: <https://storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/iblock/271/271390aa5782df6a8ed46c34f3591641/STO%20RusGidro%2002.01.124-2020%20nov.red.2023.pdf>. Ссылка активна на 05.01.2025.

Опасная для эксплуатации оборудования ГЭС тенденция вызвала обоснованную тревогу службы технической диагностики и требовала более глубокого анализа ситуации с привлечением специальных экспертных знаний и дополнительных исторических данных. Направления и методы разрешения указанной проблемной ситуации подробно описаны в [17]. В данной статье это описание использовано в качестве примера для иллюстрации усовершенствованной процедуры синтеза и анализа ДС, повышающей возможности наблюдаемости опасной неисправности в оборудовании и принятия решений по выявлению и устранению ее причин и последствий.

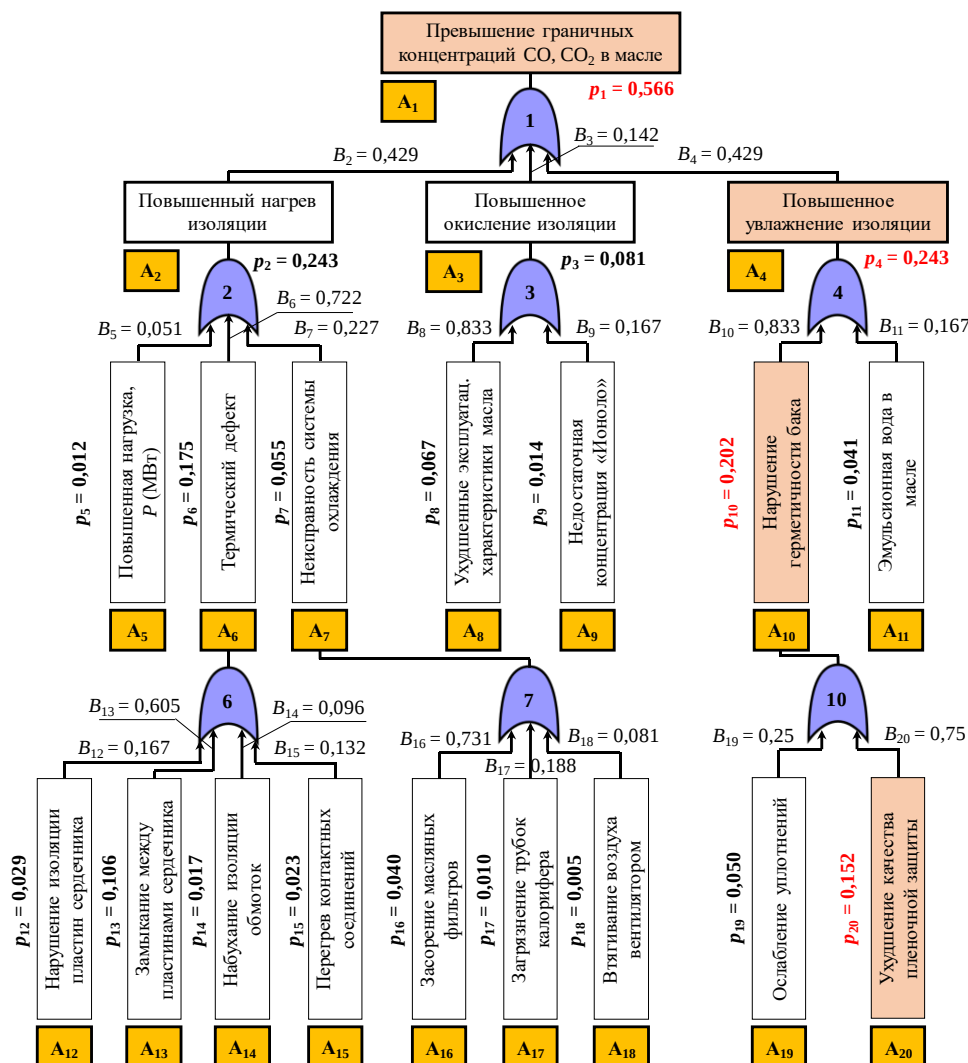


Рис. 3. Логико-вероятностная модель ДС для «Превышение граничных концентраций CO, CO₂ в масле МНТО»

Fig. 3. Logical-probabilistic event tree model for "Exceeding the boundary concentrations of CO, CO₂ in oil of OFTE"

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

Использование предметных знаний в области причин и механизмов возникновения и развития деградиционных процессов в бумажно-масляной изоляции высоковольтного МНТО [18], [19], [20], [21], а также данных из истории его эксплуатации, позволило сформировать логико-вероятностную модель причинно-следственных связей ДС для рассматриваемой проблемной ситуации. Модель ДС приведена на рисунке 3 и отражает последовательность и взаимосвязь случайных событий, предшествующих корневому событию (альтернатива A_1) «Превышение граничных концентраций CO и CO₂ в масле подконтрольного МНТО».

Следует подчеркнуть, что приведенная на рисунке 3 модель ДС представляет собой неотъемлемый компонент разработанной процедуры усовершенствования метода синтеза и анализа ДС для обнаружения опасных неисправностей в МНТО и должна рассматриваться обособленно. Как видно из рисунка модель содержит 7 логических операторов «ИЛИ», объединяющих на нескольких иерархических уровнях 20 альтернатив: A_1 – корневая; A_2 , A_3 , A_4 , A_6 , A_7 , A_{10} – промежуточные; A_5 , A_8 , A_9 , A_{11} - A_{20} – исходные (инициирующие).

Порядковые номера логических операторов «ИЛИ» повторяют номера связанных с ними альтернатив, что повышает удобство описания ДС и не преследует иных целей. Задача выбора и принятия обоснованного решения состоит в том, чтобы проранжировать имеющиеся события по важности их влияния на конечный результат с учетом кинетики и физики возникающих процессов. Формирование МПС для каждого из иерархических уровней ДС сведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Результаты парного сравнения альтернатив и анализа непротиворечивости оценок
The results of a paired comparison of alternatives and the estimate consistency analysis

The results of a paired comparison of alternatives and the estimate consistency analysis

МПС для альтернативы A ₁						МПС для альтернативы A ₂					
	A ₂	A ₃	A ₄	Ц _i	B _i		A ₅	A ₆	A ₇	Ц _i	B _i
A ₂	1	3	1	1,442	0,429	A ₅	1	1/9	1/7	0,251	0,051
A ₃	1/3	1	1/3	0,481	0,142	A ₆	9	1	5	3,557	0,722
A ₄	1	3	1	1,442	0,429	A ₇	7	1/5	1	1,119	0,227
Сумма				3,365	1,0	Сумма				4,927	1,0
β				3		β				3,208	
CI				0		CI				0,104	
CR				0		CR				0,180	

МПС для альтернативы A ₃					МПС для альтернативы A ₄				
	A ₈	A ₉	Ц _i	B _i		A ₈	A ₉	Ц _i	B _i
A ₈	1	5	2,236	0,833	A ₈	1	5	2,236	0,833
A ₉	1/5	1	0,447	0,167	A ₉	1/5	1	0,447	0,167
Сумма			2,683	1,0	Сумма			2,683	1,0
β			2		β			2	
CI			0		CI			0	
CR			0		CR			0	

МПС для альтернативы A ₆						
	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	Ц _i	B _i
A ₁₂	1	1/5	1	3	0,880	0,167
A ₁₃	5	1	3	7	3,201	0,605
A ₁₄	1	1/3	1	1/5	0,508	0,096
A ₁₅	1/3	1/7	5	1	0,699	0,132
Сумма					5,288	1,0
β					4,676	
CI					0,225	
CR					0,250	

МПС для альтернативы A ₇						МПС для альтернативы A ₁₀					
	A ₁₆	A ₁₇	A ₁₈	Ц _i	B _i		A ₁₉	A ₂₀	Ц _i	B _i	
A ₁₆	1	5	7	3,271	0,731	A ₁₉	1	1/3	0,577	0,250	
A ₁₇	1/5	1	3	0,844	0,188	A ₂₀	3	1	1,732	0,750	
A ₁₈	1/7	1/3	1	0,362	0,081	Сумма				2,309	1,0
Сумма				4,477	1,0	β				2	
β				3,065		CI				0	
CI				0,032		CR				0	
CR				0,056							

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

Здесь же приведены расчеты значений весовых коэффициентов альтернатив, а также результаты проверки и анализа непротиворечивости их парных сравнений, выполненные по выражениям (1) – (7).

Рассмотрим подробнее фрагмент расчетов, связанный с формированием МПС для альтернатив A₂, A₃, A₄, являющихся входами логического оператора «ИЛИ» под номером 1. Полученная матрица размерностью (3×3) подлежит построчному заполнению с

использованием предметных экспертных знаний и имеющихся данных по эксплуатации МНТО. На указанном основании главная диагональ МПС заполняется единицами, а в ячейке 2-3 проставляется экспертная оценка «3», отражающая незначительную степень предпочтения A_3 по отношению к A_2 . Предпочтение A_4 по отношению к A_2 принимается равноценным. Подобным образом заполняются остальные ячейки строк МПС. Далее по выражению (1) проводятся расчеты цен альтернатив:

$$Ц_2 = \sqrt[3]{1 \cdot 3 \cdot 1} = 1,442; \quad Ц_3 = \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{3}} = 0,481; \quad Ц_4 = \sqrt[3]{1 \cdot 3 \cdot 1} = 1,442.$$

По (2) находится сумма цен: $Ц = 1,442 + 0,481 + 1,442 = 3,365$. Вычисляются весовые коэффициенты для каждой из альтернатив по выражению (3): $B_2 = \frac{1,442}{3,365} = 0,429$;

$$B_3 = \frac{0,481}{3,365} = 0,142; \quad B_4 = \frac{1,442}{3,365} = 0,429. \text{ При этом } \sum_i B_i = 1. \text{ После определения весовых}$$

коэффициентов выполняется проверка на непротиворечивость парных сравнений экспертных оценок. Для этого по (4) рассчитываются суммы столбцов МПС каждой из альтернатив: $C_2 = 2 \frac{1}{3}$; $C_3 = 7$; $C_4 = 2 \frac{1}{3}$. По (5) находится вспомогательный коэффициент

$$\beta = \left(2 \frac{1}{3} \cdot 0,429 + 7 \cdot 0,142 + 2 \frac{1}{3} \cdot 0,429 \right) = 3 \text{ и по (6) вычисляется индекс согласованности}$$

экспертных оценок $CI = \frac{3-3}{3-1} = 0$. По (7) определяется отношение согласованности оценок

$$CR = \frac{CI}{RC} = \frac{0}{0,58} = 0, \text{ где справочное значение}^3 RC = 0,58 \text{ при } n = 3. \text{ По условию}$$

согласованности $CR \leq 0,2$, что выполняется, поскольку $CR = 0$. Аналогично выполняются расчеты для всех уровней иерархии альтернатив ДС, результаты которых заносятся в табл. 1.

По значениям весовых коэффициентов (B_i), характеризующих важность, для каждой из альтернатив на всех иерархических уровнях ДС, следует рассчитать вероятности событий p_j по формуле (8). Тогда одно из исходных событий, получивших наибольшее значение вероятности, будет интерпретировано как первопричина, и определять наиболее предпочтительный с точки зрения проведенного целостного анализа сценарий их развития. Кроме этого, именно данное событие и будет началом цепи наиболее вероятных взаимосвязанных событий, приводящих к нежелательному результату.

Рассмотрим исходную выборку протоколов АРГ в масле трансформаторов ГЭС на интервале наблюдения 2009-2017 гг. Её объем составил $N = 131$ протокол АРГ в то время как количество протоколов АРГ с превышением граничных концентраций CO , CO_2 , растворенных в масле МНТО N_1 равнялось 74 шт. Таким образом вероятность p_1 появления корневого события A_1 составила $p_1 = \frac{N_1}{N} = \frac{74}{131} = 0,566$ о.е.

Формализацию усовершенствованного метода построения и анализа ДС, дополненного процедурой введения количественной меры важности событий на основе их весовых коэффициентов с применением матриц парных сравнений Саати и приоритизацией исходных альтернатив по значениям вероятностей их возникновения выполним в соответствии с вычислительным алгоритмом, описанным в предыдущем разделе.

Таким образом, назначенные балльные оценки отражают компетентное и непротиворечивое экспертное мнение по вопросам логической взаимосвязи и физической природы деградиационных процессов в эксплуатации бумажно-масляной изоляции высоковольтного МНТО, приводящих к «Превышению граничных концентраций CO , CO_2 , растворенных в масле». Обозначим в модели ДС важность взаимосвязей с помощью рассчитанных весовых коэффициентов альтернатив (B_i) и распределим последовательно по уровням иерархии ДС, начиная с корневого события, вероятности возникновения всех промежуточных и исходных событий (рис. 3).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшими значениями вероятностей в описанных условиях обладает цепочка событий $A_{20} - A_{10} - A_4 - A_1$. В связи с этим наиболее вероятен сценарий, по которому систематический монотонный рост концентраций CO , CO_2 с превышением предельно-допустимых значений в масле МНТО ГЭС, возникает в результате ухудшения качества пленочной защиты масла, что в свою очередь вызывает нарушение герметичности бака и повышенное увлажнение масла и целлюлозной изоляции трансформаторов. При этом по параметрам текущего мониторинга

состояния МНТО и ретроспективным данным из истории его эксплуатации следует, что такие деградационные факторы, как повышенный нагрев, повышенное окисление масла полностью исключаются. Напротив, повышенное увлажнение изоляции могла вызвать локальная перфорация защитных полимерных пленок у всех единиц МНТО, о чем имеются соответствующие записи в журнале пуско-наладочных испытаний.

Таким образом, усовершенствованный метод синтеза и анализа дерева событий, дополненный процедурой количественной оценки важности причинно-следственных связей, их ранжированием и распределением вероятностей исходов каждого из событий на всех уровнях иерархии по известной вероятности корневого события является эффективным инструментом целостного анализа риска, идентификации опасных неисправностей в оборудовании, определения и прогнозирования причин и последствий их возникновения. Наличие такого вычислительного инструмента в СППР по эксплуатации ответственного электрооборудования расширит её интеллектуальные возможности и обеспечит надежность безаварийной работы энергообъекта.

Заключение (Conclusions)

1. Первостепенной задачей эксплуатации сложного и ответственного оборудования электростанций и электрических сетей, такого как МНТО, является своевременное обнаружение опасных неисправностей, которые могут сопровождаться тяжелыми нежелательными последствиями. Такая задача в полной мере возлагается на специализированные СППР по эксплуатации МНТО, которые призваны выявлять признаки неисправностей, идентифицировать их опасность и причины возникновения, исследовать риски отказов объекта, обеспечить принятие решений по их предупреждению и устранению.

2. Методы синтеза и анализа деревьев событий (отказов) нашли широкое применение в качестве классики жанра для решения подобного вида задач. Дерево событий представляет собой упорядоченное графическое описание причинно-следственных связей случайных событий (отказов, неисправностей), приводящих к реализации нежелательного конечного события. Построение классического ДС выполняется в результате декомпозиции сложной технической системы (оборудования) на структурные элементы и формализации глубоких экспертных знаний в области деградационных процессов в виде её логико-вероятностной модели. Сильные стороны метода анализа ДС: целостность представления системы (объекта); возможность формализации экспертных знаний; универсальность применения к различным объектам и ситуациям. Слабая сторона метода – зависимость адекватности и достоверности результатов его применения от компетентности экспертов (полноты и качества экспертных знаний). Известна идея усовершенствования метода анализа ДС для МНТО включением в расчет компонентов структуры индекса технического состояния.

3. В статье предложена вычислительная процедура для усовершенствования метода, заключающаяся в дополнительной количественной оценке важности причинно-следственных связей событий с применением весовых коэффициентов альтернатив на основе матриц парных сравнений Саати и определением вероятностей исходов каждого из событий на всех уровнях иерархии ДС по известной вероятности ключевого события. Возможность ранжирования промежуточных и исходных событий по важности их влияния на конечный исход позволяет оценить риск реализации любого сценария развития ситуации, определить наиболее вероятный и опасный в существующих условиях сценарий, повысить эффективность принятия эксплуатационных решений по его предотвращению. Разработанный усовершенствованный метод анализа ДС реализован на реальном примере анализа неисправности из практики эксплуатации МНТО «Новосибирской ГЭС». Полученные результаты полностью согласуются с данными из систем диагностического мониторинга трансформаторов и историей их эксплуатации, количественно подтверждают опасность выявленной неисправности и необходимость её устранения. Таким образом, следует заключить, что разработан эффективный инструмент целостного анализа и выявления причин опасных неисправностей в электрооборудовании, который требует цифровизации и интеграции в СППР по его эксплуатации.

Литература

1. Лабабиди М.Р., Система поддержки принятия решений (СППР) как инструмент принятия эффективных управленческих решений на промышленных предприятиях / М.Р. Лабабиди, Н.Р. Кельчевская. – Текст: электронный // Весенние дни науки: сборник докладов международной конференции студентов и молодых ученых (Екатеринбург, 21-23 апреля 2022 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – С. 377-381.

2. Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А. Система оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей с применением машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. No 2. С. 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45.
3. Дерево отказов, как метод структурного анализа FTA. Примеры внедрения. Доступно по: <https://www.itexpert.ru/rus/biblio/detail.php?ID=16266> (дата обращения: 28.01.2025 г.).
4. Andrews J.D. and Dunnett S.J., Event-tree analysis using binary decision diagrams, in *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 49, no. 2, pp. 230-238, June 2000, doi: 10.1109/24.877343.
5. Рябинин И.А., Надежность и безопасность структурно-сложных систем. 2-е изд. перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 276 с.
6. Берман А.Ф., Павлов Н.Ю., Николайчук О.А., Метод синтеза и анализа деревьев отказов на основе понятий механизма и кинетики событий // Проблемы анализа риска. 2018. Т 15. No 3. С. 62-77. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-62-77>.
7. Matsuoka T., Procedure to solve mutually dependent Fault Trees (FT with loops), *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 214, 2021, 107667, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107667>.
8. Demirci M., Gozde H., Taplamacioglu M.C., Fault diagnosis of power transformers with machine learning methods using traditional methods data, *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering"*, Iss. 49, Vol. 13, No 4, Dec. 2021, pp. 225-230.
9. Васильков Р.Е., Кочетов Н.М., Применение логических деревьев событий при обосновании безопасности опасных производственных объектов // Проблемы анализа риска. 2016. Т. 13. No 1. С. 60-69. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2016-13-1-60-69>.
10. Давиденко И.В., Халикова Е.Д., Учет рисков при выборе очередности мероприятий технического обслуживания силовых трансформаторов // ЭЛЕКТРО. 2014. No 6. С. 32-37.
11. Bicen Yu, Aras F., Smart asset management system for power transformers coupled with online and offline monitoring technologies, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 154, 2023, 107674, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107674>.
12. Левин В.М., Петушков П.А., Швец М.А. Дистанционный мониторинг и управление состоянием трансформаторов в распределительных электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. No 2. С. 97-109. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109.
13. Wang Yongliang, Li Xiaoqiang, Ma Jianwei and Li SuoYu, Fault diagnosis of power transformer based on fault-tree analysis (FTA), *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 64 (2017) 012099 doi: 10.1088/1755-1315/64/1/012099.
14. Daniella Gonzalez Tinois Da Silva, Halley J. Braga Da Silva, Fernando Pinhabel Marafão, Helmo Kelis Morales Paredes, Flavio Alessandro Serrão Gonçalves, Enhanced health index for power transformers diagnosis, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 126, 2021, 105427, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105427>.
15. Живодерников С.В., Ранжирование силовых трансформаторов по техническому состоянию. Доступно по: <https://forca.ru/stati/podstancii/ranzhirovanie-silovyh-transformatorov-po-tehnicheskomu-sostoyaniyu.html>. Ссылка активна на 28.01.2025.
16. Лесс В.М., Любченко В.Я., Павлюченко Д.А. Анализ энергоэффективности энергетических объектов с применением методов ранжирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. No 5. С. 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58.
17. Левин В.М., Сагалакова К.И., Яхья А.А., О проблемах в эксплуатации оборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики // Научный вестник НГТУ. Т 77. No 4. 2019. С. 147-160.
18. Липштейн Р.А., Шахнович М.И., Трансформаторное масло / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
19. Липштейн Р.А., Глазунова Т.В., Довгопольный Е.Е., Шведские трансформаторные масла фирмы «Nynas» марок Nitro 11 GX и Nitro 10 X / Р.А. Липштейн и др. // Электрические станции. 1998. No 6. С. 61-64.
20. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Методика автоматического обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора / О.Г. Широков и др. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2004. No 4. С. 64-68.
21. Levin V.M., Yahya A.A., Support for Decision-Making to Ensure Reliable Operation of Transformers as Part of a Responsible Power Facility, 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271626.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0880-3989>. levin@power.nstu.ru

Зеленских Александр Александрович – аспирант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3519-0493>. zelenskihaleksandr7@gmail.com

Петушков Пётр Александрович – гл. инженер проекта АО «РЭМиС», г. Новосибирск, Россия. Petushkov@bk.ru

References

1. Lababidi M.R., Sistema podderzhki prinyatiya reshenij (SPPR) kak instrument prinyatiya effektivnykh upravlencheskikh reshenij na promyshlennykh predpriyatiyah / M.R. Lababidi, N.R. Kel'chevskaya. – Tekst: elektronnyj // *Vesennie dni nauki: sbornik докладов mezhdunarodnoj konferencii studentov i molodyh uchenykh* (Ekaterinburg, 21-23 aprelya 2022 g.). – Ekaterinburg: UrFU, 2022. – pp. 377-381. (In Russ.).
2. Galyautdinova A.R., Ivshin I.V., Solov'ev S.A. Sistema ocenki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya silovogo maslonapolnennogo transformatornogo oborudovaniya raspredelitel'nykh setej s primeneniem mashinnogo obucheniya // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2024. T.26. No 2. S. 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45. (In Russ.).
3. Derevo otkazov, kak metod strukturnogo analiza FTA. Primery vnedreniya; URL: <https://www.itexpert.ru/rus/biblio/detail.php?ID=16266> (data obrashcheniya: 28.01.2025). (In Russ.).
4. Andrews J.D. and Dunnett S.J., Event-tree analysis using binary decision diagrams, in *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 49, No. 2, pp. 230-238, June 2000, doi: 10.1109/24.877343.
5. Ryabinin I.A., Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem. 2-e izd. pererab. i dop. SPb.: Izd-vo SPbGU, 2007. – 276 p. (In Russ.).
6. Berman A.F., Pavlov N.Yu., Nikolajchuk O.A., Metod sinteza i analiza derev'ev otkazov na osnove ponyatij mekhanizma i kinetiki sobytij // *Problemy analiza riska*, tom 15, 2018, No 3. pp. 62-77. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-62-77>. (In Russ.).
7. Matsuoka T., Procedure to solve mutually dependent Fault Trees (FT with loops), *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 214, 2021, 107667, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107667>.
8. Demirci M., Gozde H., Taplamacioglu M.C., Fault diagnosis of power transformers with machine learning methods using traditional methods data, *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering"*, Iss. 49, Vol. 13, No 4, Dec. 2021, pp. 225-230.
9. Vas'kov R.E., Kochetov N.M., Primenenie logicheskikh derev'ev sobytij pri obosnovanii bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov // *Problemy analiza riska*. 2016. T. 13. № 1. pp. 60-69. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2016-13-1-60-69>. (In Russ.).
10. Davidenko I.V., Halikova E.D., Uchet riskov pri vybere ocherednosti meropriyatij tekhnicheskogo obsluzhivaniya silovykh transformatorov // *ELEKTRO* 2014. № 6. pp. 32-37. (In Russ.).
11. Bicen Yu, Aras F., Smart asset management system for power transformers coupled with online and offline monitoring technologies, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 154, 2023, 107674, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107674>.
12. Levin V.M., Petushkov P.A., SHvec M.A. Distancionnyj monitoring i upravlenie sostoyaniem transformatorov v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyah // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2023. T.25. № 2. S. 97-109. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109. (In Russ.).
13. Wang Yongliang, Li Xiaoqiang, Ma Jianwei and Li SuoYu, Fault diagnosis of power transformer based on fault-tree analysis (FTA), *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 64 (2017) 012099 doi: 10.1088/1755-1315/64/1/012099.
14. Daniella Gonzalez Tinois Da Silva, Halley J. Braga Da Silva, Fernando Pinhabel Marafão, Helmo Kelis Morales Paredes, Flavio Alessandro Serrão Gonçalves, Enhanced health index for power transformers diagnosis, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 126, 2021, 105427, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105427>.
15. Zhivodernikov S.V., Ranzhirovanie silovykh transformatorov po tekhnicheskomu sostoyaniyu; URL: <https://forca.ru/stati/podstancii/ranzhirovanie-silovykh-transformatorov-po-tehnicheskomu-sostoyaniyu.html> (data

obrashcheniya: 28.01.2025). (In Russ.).

16. Less V.M., Lyubchenko V.YA., Pavlyuchenko D.A. Analiz energoeffektivnosti energeticheskikh ob'ektov s primeneniem metodov ranzhirovaniya // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2023. T.25. No 5. S. 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58. (In Russ.).

17. Levin V.M., Sagalakova K.I., Yah'ya A.A., O problemah v ekspluatatsii oborudovaniya inostrannogo proizvodstva na ob'ekтах otechestvennoj energetiki // *Nauchnyj vestnik NGTU*, tom 77, № 4, 2019, pp. 147–160. (In Russ.).

18. Lipshtejn R.A., Shahnovich M.I., Transformatornoe maslo / R.A. Lipshtejn, M.I. Shahnovich. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 296 p. (In Russ.).

19. Lipshtejn R.A., Glazunova T.V., Dovgopolyj E.E., Shvedskie transformatornye masla firmy «Nynas» marok Nitro 11 GX i Nitro 10 X / R.A. Lipshtejn i dr. // *Elektricheskie stancii*. – 1998. – № 6. – pp. 61 – 64. (In Russ.).

20. Shirokov O.G., Zaliznyj D.I., Los' D.M., Metodika avtomaticheskogo obnaruzheniya nenormal'nogo nagreva silovogo transformatora / O.G. Shirokov i dr. // *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo*. – 2004 – № 4 – pp. 64 – 68. (In Russ.).

21. Levin V.M., Yahya A.A., Support for Decision-Making to Ensure Reliable Operation of Transformers as Part of a Responsible Power Facility, 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271626.

Authors of the publication

Vladimir M. Levin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0880-3989>. levin@power.nstu.ru

Aleksandr A. Zelenskih – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3519-0493>. zelenskihaleksandr7@gmail.com

Peter A. Petushkov – JSC "REMiS", Novosibirsk, Russia. Petushkov@bk.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 27.02.2025 г.

Отредактировано 01.07.2025 г.

Принято 03.07.2025 г.