

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,

д.т.н., профессор

Никифоров А. С.,

д.т.н., профессор

Новожилов А. Н.,

д.т.н., профессор

Алиферов А. И.,

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Кошеков К. Т.,

д.т.н., профессор

Приходько Е. В.,

к.т.н., профессор

Кислов А. П.,

к.т.н., доцент

Нефтисов А. В.,

доктор PhD

Шеръязов С. К.

т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)

Искакова З. С.

технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

**А. С. Барукин¹, *А. Ж. Динмуханбетова²,
Б. Е. Машрапов³, О. М. Талипов⁴**

^{1,2,3,4}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5969-4030>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4538-9672>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3018-4125>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

*e-mail: ardi100909@mail.ru

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ СХЕМЫ ОРУ-500 кВ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МЕТОДОМ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

В статье рассматривается применение логико-вероятностного метода с использованием дерева отказов для оценки надёжности схем открытых распределительных устройств (ОРУ) атомных электрических станций (АЭС). В качестве объекта исследования выбрана схема ОРУ-500 кВ крупнейшей АЭС Индии – Куданкулам с двумя блоками по 1000 МВт. Цель работы – продемонстрировать эффективность метода дерева отказов при анализе влияния отказов отдельных элементов схемы ОРУ АЭС на потери генерируемой мощности. Описывается алгоритм построения дерева отказов, включающий в себя формализацию конечного события, описание промежуточных и первичных событий с применением функций алгебры логики. На примере пяти возможных видов повреждений были построены фрагменты деревьев отказов, что позволило проиллюстрировать вклад каждого элемента в общую надёжность схемы ОРУ и получить выражения для вычисления частоты потери генерируемой мощности и относительной длительности восстановления нормального режима. Установлено, что метод дерева отказов обеспечивает наглядное представление взаимосвязей между отказами отдельных элементов и состоянием всей схемы ОРУ АЭС, и может быть использован как дополнение к таблично-логическому методу при оценке надёжности таких схем.

Ключевые слова: надёжность схем ОРУ, атомная электростанция, логико-вероятностный метод, дерево отказов, отказы элементов, генерируемая мощность, длительность восстановления.

Введение

Надёжность открытых распределительных устройств (ОРУ) является одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость и безопасность работы электрических станций. Отказ любого элемента в схеме может приводить к частичной потере выдачи мощности, нарушению режима работы энергоблоков и, как следствие, к недоотпуску электроэнергии потребителям. Поэтому оценка надёжности схем ОРУ остаётся одной из приоритетных задач при проектировании и эксплуатации электростанций.

На практике для таких расчётов широко используется таблично-логический метод [1; 2; 3], позволяющий определить величину аварийного недоотпуска электроэнергии и выявить наиболее уязвимые элементы схемы. Однако он не отражает структуру взаимосвязей между отказами и не показывает, какие комбинации событий приводят к потере работоспособности всей схемы [4]. Для более детального анализа требуется метод, который одновременно учитывает вероятности отказов и их логические зависимости.

Одним из наиболее универсальных методов для решения такой задачи является метод дерева отказов [5; 6; 7], относящийся к логико-вероятностным методам. Он основан на построении причинно-следственных связей между исходными событиями (отказами элементов) и конечными событиями, такими как потеря выдачи мощности или отключение блока. Метод позволяет в аналитической форме получить выражения для частоты возникновения отказов и длительности восстановления нормального режима, а также визуализировать влияние отдельных элементов на надёжность всей схемы ОРУ. Применение дерева отказов особенно целесообразно для анализа схем ОРУ атомных электростанций (АЭС), где высокие требования к отказоустойчивости делают необходимым детальный вероятностный подход.

Учитывая строительство первой АЭС в Республике Казахстан компанией «Росатом», был проведён анализ реализованных ею проектов в различных странах. Среди них выделяется схема ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам (Индия) с двумя блока мощностью по 1000 МВт, как типовая и технологически наиболее близкая к той, что вероятнее всего будет применена при сооружении отечественной АЭС. В связи с этим именно данная схема выбрана в качестве объекта исследования для оценки её надёжности.

Цель исследования – оценить эффективность метода дерева отказов при анализе надёжности схемы ОРУ АЭС и показать возможность его применения для определения показателей частоты потери генерируемой мощности и длительности восстановления нормального режима.

Материалы и методы

При анализе события, которое вызывает отказ элемента схемы ОРУ, строится дерево отказов. Построение такого дерева позволяет легко воспроизводить алгоритмы для определения вероятности отказа элемента схемы. Для этого используются логические связи «И» (произведение), «ИЛИ» (сумма) и символы событий [8]. Дерево отказов описывает причины появления рассматриваемого вида отказа элемента схемы, т.е. конечное событие. Последнее обозначают прямоугольником с двойной рамкой. Промежуточное событие (сложное высказывание) – прямоугольником, а первичное элементарное событие (простое высказывание) – кругом. Первичные события обозначаются малыми прописными буквами, а промежуточные – строчными большими. Первичные события не могут быть ни как логические суммы «ИЛИ», ни как логические произведения «И» других событий и состояний.

Путь построения дерева отказов производится сверху вниз от конечного события через промежуточные к исходным событиям и состояниям, до тех пор, пока на всех уровнях дерева не останутся одни элементарные события и состояния. Последние обозначаются латинскими буквами. В качестве первичных событий учитывается следующее: y_i – отказ i -го элемента схемы; $\tilde{y}_j$ – состояние простоя j -го элемента схемы; $x_{o.c.}$ – отказ срабатывания выключателя (о.в. – отказ включения, о.о. – отказ отключения). Повреждения могут быть кратковременными (о.п.) на время оперативных переключений и длительными (в.р.) на время ремонта.

Функция отказа представляется следующим выражением:

$$\tilde{Y}(u) = \bigcup_k S_k = \bigcup_i y_i \bigcup_j (y_j \wedge x_{o.c.j}) \bigcup_{ji} (y_i \wedge \tilde{y}_j) \bigcup_{ijk} (y_i \wedge \tilde{y}_j) \bigcup_{ijk} (\tilde{y}_i \wedge y_j \wedge x_{o.c.k}). \quad (1)$$

Переход от логических функций к выражениям для расчета показателей надежности выполняется следующими заменами: логические знаки $\wedge$ и $\bigcap$ заменяются на $\times$, $\vee$ и $\bigcup$ – на $+$, символы событий и состояний y – частотами $\lambda(y)$, – вероятностями $q(\tilde{y}) = \lambda(y)\tau(\tilde{y})$, соответственно, а $x_{o.c.}$ – условными вероятностями $Q(x_{o.c.})$. После преобразования функции отказа (1) выражения оценки частоты потери генерируемой мощности и относительной длительности ее восстановления имеют вид:

$$\Lambda(u) = \sum_i \lambda(y_i) + \sum_k \lambda(y_k) \cdot Q(x_{o.c.k}) + \sum_{i,j} \lambda(y_i) \cdot q(\tilde{y}_j) + \sum_{j,i} \lambda(y_j) \cdot q(\tilde{y}_i), \quad (2)$$

$$q(u) = \sum_i \lambda(y_i) \tau(y_i) + \sum_k \lambda(y_k) \cdot Q(x_{o.c.k}) \tau(y_k \wedge x_{o.c.k}) + \\ + \sum_{i,j} \lambda(y_i) \cdot q(\tilde{y}_j) \tau(y_i \wedge \tilde{y}_j) + \sum_{j,i} \lambda(y_j) \cdot q(\tilde{y}_i) \tau(y_j \wedge \tilde{y}_j), \quad (3)$$

где $\tau(y_k \wedge x_{o.c.k})$ и $\tau(y_i \wedge \tilde{y}_j)$ среднее время восстановления работы схемы при отказе в отключении повреждения на присоединении и при совпадении повреждения одной цепи с аварийным простоем другой цепи, соответственно.

Далее будет выполнено построение дерева отказов некоторых возможных аварий в схеме ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам (рисунок 1) для оценки её надежности.

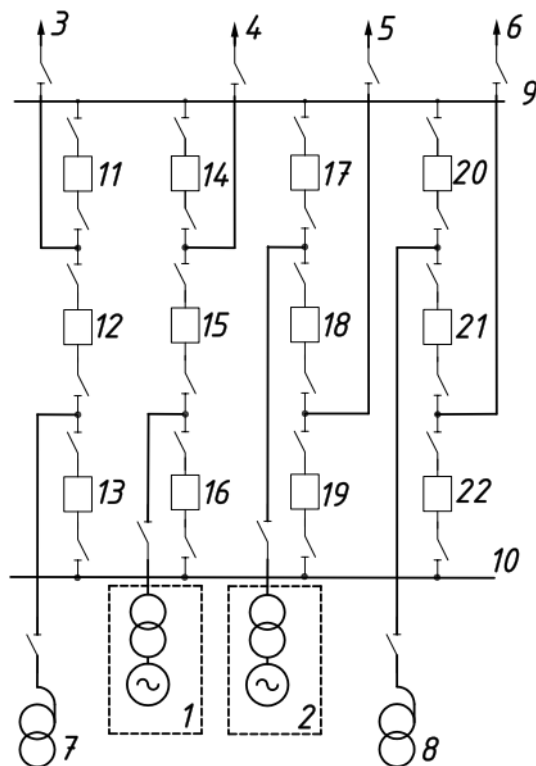


Рисунок 1 – Схема ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам

По изложенной выше методике для каждого вида повреждения строится свое дерево отказов. Исходными данными для расчета показателей надежности являются средние значения $\lambda(y)$, $\tau(\tilde{y})$ и $Q(x_{o.c.})$ для элементов схемы ОРУ-500 кВ, которые взяты из [9; 10] и представлены в таблицах 1 и 2. В таблице 2 первые значения соответствуют отказам выключателей в цепях линий (наибольшее значение), а вторые значения – в других цепях.

Таблица 1 – Показатели надежности элементов схемы

Код	Элементы схемы		Частота отказа λ , 1/год	Длительность восстановления τ , $\times 10^{-3}$	Вероятность состояния $\tilde{q}$, $\times 10^{-3}$ о.е.
	№ на схеме	Наименование			
g	1, 2	Блок генератор-трансформатор	0,5	22,83	82,19
w	3-6	Линия электропередач	1,2	1,94	12,32
a	7, 8	Автотрансформатор	0,072	1,14	6,84
s	9, 10	Сборная шина	0,004	2,87	11,5
b	11-22	Выключатель элегазовый	0,14	5,51	8,33

Таблица 2 – Отказы выключателей

Код	Описание	Условная вероятность, $Q(x_{o.c.}), \times 10^{-3}$ о.е.
$b_{o.o.}$	Отказ выключателя в отключении КЗ	43,54/17,65
$b_{o.b.}$	Отказ выключателя во включении при АПВ	4,46/1,79

В рассматриваемой схеме возможны следующие режимы работы: $\tilde{q}_0$ нормальный режим без ремонтов; $\tilde{q}_1$ и $\tilde{q}_2$ – плановый и аварийный ремонты блоков генератор-трансформатор 1 и 2; $\tilde{q}_3$ и $\tilde{q}_4$ – плановый и аварийный ремонты линий 3 и 6 ($\tilde{q}_5$ и $\tilde{q}_6$ – аналогично для линий 4 и 5); $\tilde{q}_7$ и $\tilde{q}_8$ – плановый и аварийный ремонты автотрансформаторов 7 и 8; $\tilde{q}_9$ и $\tilde{q}_{10}$ – плановый и аварийный ремонты шин 9 и 10; $\tilde{q}_{11}$, $\tilde{q}_{14}$, $\tilde{q}_{15}$, $\tilde{q}_{18}$ – аварийные ремонты выключателей 11, 13, 14, 16; $\tilde{q}_{12}$, $\tilde{q}_{13}$, $\tilde{q}_{16}$, $\tilde{q}_{17}$ – плановый и аварийный ремонты выключателей 12, 21, 15 и 18, соответственно. Вероятности состояний: $\tilde{q}_{j,пл} = \tilde{q}_{j,ав} = \lambda_i \tau_i$; $\tilde{q}_{j0} = 1 - \sum_{j=1}^m \tilde{q}_j$. Деревья отказов для пяти возможных видов повреждений (конечных событий) из-за отказов

элементов рассматриваемой схемы приведены на рисунках 2-6. Для каждого из событий в числителе указаны кратковременные потери мощности, в знаменателе – длительные (прочерк – отсутствие потерь). Расчетные аварии зашифрованы как КЗБЛ – короткое замыкание (КЗ) на блоке, ОВ – отказ выключателя и т.д.

На основе (2) и (3) и рисунков 2-6, частоты потери генерируемой мощности и относительные длительности их восстановления для рассматриваемых пяти видов повреждений определяются по следующим формулам:

$$\Lambda(-/1\Gamma) = \tilde{q}_0 \cdot 2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_5)2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_4 + \tilde{q}_6)2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(g) + \\ + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_{11} + \tilde{q}_{12})2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_{13} + \tilde{q}_{14})2\lambda(g) + \\ + 2(q_{16} + q_{17})(2\lambda(g) + \lambda(b) + \lambda(s)) + 2(q_{15} + \tilde{q}_{18}) \cdot 2 \cdot \lambda(g),$$

$$q(-/1\Gamma) = \tilde{q}_0 \cdot 2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_5)2\lambda(g)\tau(g) + 2 \cdot (\tilde{q}_4 + \tilde{q}_6) \cdot 2 \cdot \lambda(g)\tau(g) + \\ + 2 \cdot (\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_{11} + \tilde{q}_{12})2\lambda(g)\tau(g) + \\ + 2(\tilde{q}_{13} + \tilde{q}_{14})2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_{16} + \tilde{q}_{17})(2\lambda(g)\tau(g) + \lambda(b)\tau(b) + \lambda(s)\tau(s)) + \\ + 2(\tilde{q}_{15} + \tilde{q}_{18})2\lambda(g)\tau(g)$$

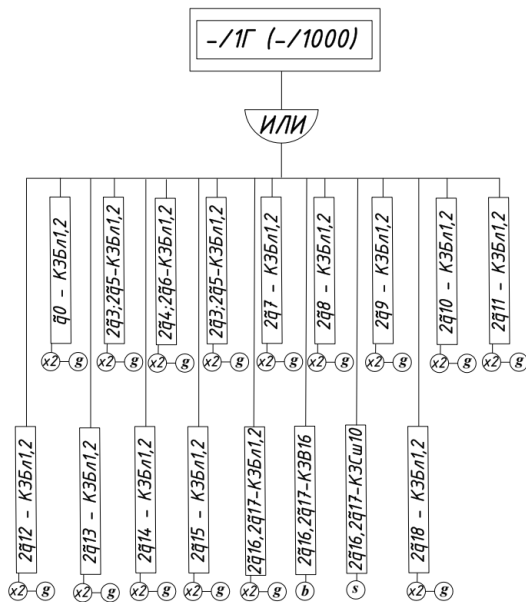


Рисунок 2 – Первое дерево отказов

$$\begin{aligned}
\Lambda(1\Gamma1\Gamma / 1\Gamma) = & \tilde{q}_0 2Q(b_{0,0})(\lambda(g) + \lambda(b)) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2Q(b_{0,0})\lambda(g) + \\
& + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2Q(b_{0,0})\lambda(g) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2Q(b_{0,0})\lambda(g) + \\
& + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{0,0})(\lambda(g) + \lambda(w)) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{0,0})\lambda(w) + \\
& + 2(\tilde{q}_{12} + \tilde{q}_{13})2Q(b_{0,0})(\lambda(g) + \lambda(g)) + 2\tilde{q}_{15}\lambda(g) + \\
& + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{0,0})(\lambda(g) + \lambda(b)) + 2(\tilde{q}_{16} + \tilde{q}_{17})2Q(b_{0,0})(\lambda(g) + 2\lambda(b)) + \\
& + 2\tilde{q}_{18}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{18}2Q(b_{0,0})(\lambda(g) + \lambda(w)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{0,v})\lambda(w),
\end{aligned}$$

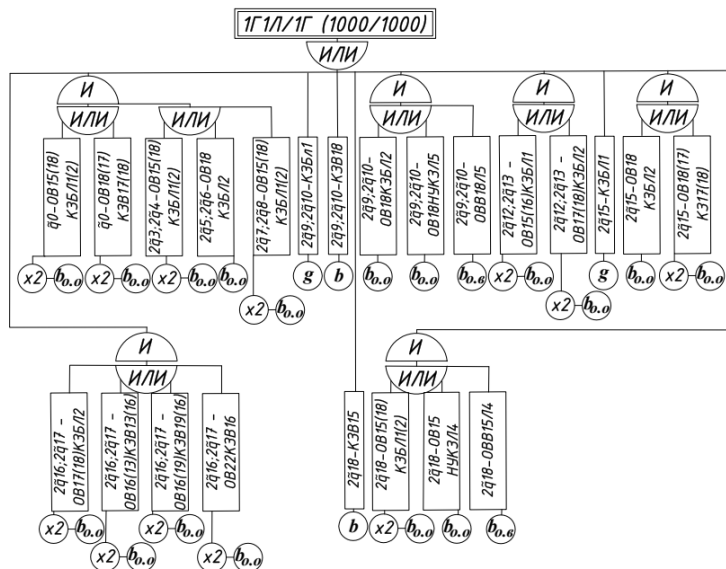


Рисунок 3 – Второе дерево отказов

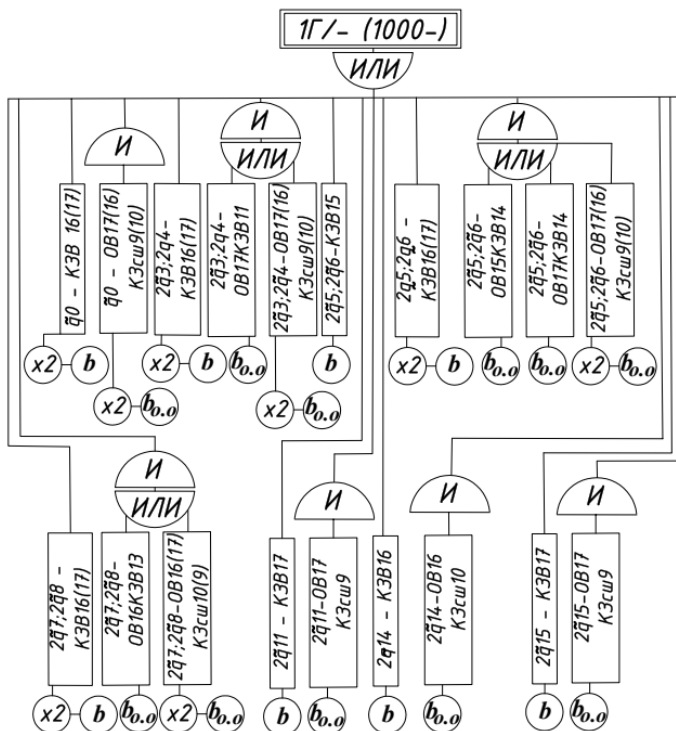


Рисунок 4 – Третье дерево отказов

$$\begin{aligned}
 q(1\Gamma 1\Gamma / 1\Gamma) = & \tilde{q}_0 2Q(b_{0..0})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(b)\tau(b)) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2Q(b_{0..0})\lambda(g)\tau(g) + \\
 & + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2Q(b_{0..0})\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2Q(b_{0..0})\lambda(g)\tau(g) + \\
 & + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{0..0})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(w)\tau(w)) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{0..0})\lambda(w)\tau(w) + \\
 & + 2(\tilde{q}_{12} + \tilde{q}_{13})2Q(b_{0..0})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(g)\tau(g)) + 2\tilde{q}_{15}\lambda(g)\tau(g) + \\
 & + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{0..0})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(b)\tau(b)) + 2(\tilde{q}_{16} + \tilde{q}_{17})2Q(b_{0..0})(\lambda(g)\tau(g) + 2\lambda(b)\tau(b)) + \\
 & + 2\tilde{q}_{18}\lambda(b)\tau(b) + 2\tilde{q}_{18}2Q(b_{0..0})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(w)\tau(w)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{0..v})\lambda(w)\tau(w),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Lambda(1\Gamma / -) = & \tilde{q}_0 2\lambda(b) + \tilde{q}_0 2Q(b_{0..0})\lambda(s) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2\lambda(b) + \\
 & + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2Q(b_{0..0})(\lambda(b) + \lambda(s)) + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2\lambda(b) + \\
 & + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)Q(b_{0..0})2(\lambda(b) + \lambda(s)) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(b) + \\
 & + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)Q(b_{0..0})(\lambda(b) + 2\lambda(s)) + 2\tilde{q}_{11}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{11}Q(b_{0..0})\lambda(s) + \\
 & + 2\tilde{q}_{14}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{14}Q(b_{0..0})\lambda(s) + 2\tilde{q}_{15}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{0..0})\lambda(s),
 \end{aligned}$$

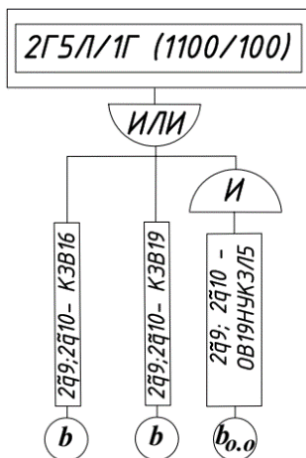


Рисунок 5 – Четвёртое дерево отказов

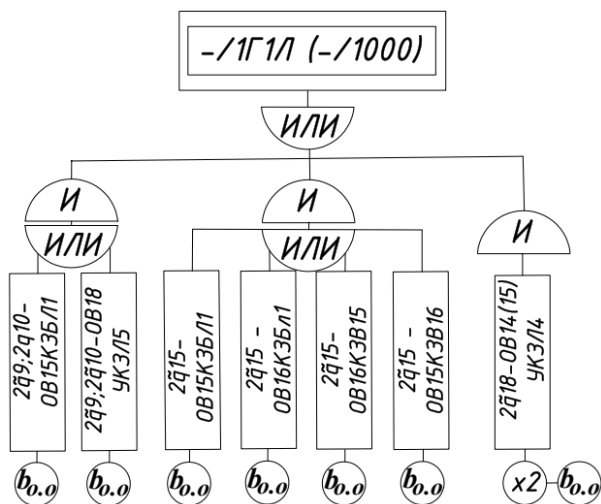


Рисунок 6 – Пятое дерево отказов

$$\begin{aligned}
q(1\Gamma / -) = & \tilde{q}_0 2\lambda(b)\tau(b) + \tilde{q}_0 2Q(b_{o.o})\lambda(s)\tau(s) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2\lambda(b)\tau(b) + \\
& + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2Q(b_{o.o})(\lambda(b)\tau(b) + \lambda(s)\tau(s)) + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2\lambda(b)\tau(b) + \\
& + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)Q(b_{o.o})2(\lambda(b)\tau(b) + \lambda(s)\tau(s)) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(b)\tau(b) + \\
& + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)Q(b_{o.o})(\lambda(b)\tau(b) + 2\lambda(s)\tau(s)) + 2\tilde{q}_{11}\lambda(b)\tau(b) + \\
& + 2\tilde{q}_{11}Q(b_{o.o})\lambda(s)\tau(s) + 2\tilde{q}_{14}\lambda(b)\tau(b) + 2\tilde{q}_{14}Q(b_{o.o})\lambda(s)\tau(s) + \\
& + 2\tilde{q}_{15}\lambda(b)\tau(b) + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{o.o})\lambda(s)\tau(s),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Lambda(2\Gamma 5\text{Л} / 1\Gamma) = & 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b) + \\
& + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o.o})\lambda(w),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q(2\Gamma 5\text{Л} / 1\Gamma) = & 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b)\tau(b) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b)\tau(b) + \\
& + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o.o})\lambda(w)\tau(w), \\
\Lambda(- / 1\Gamma 1\text{Л}) = & 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v.o})\lambda(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v.o})\lambda(w) + \\
& + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{v.o})(2\lambda(g) + 2\lambda(b)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{v.o})\lambda(w),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q(- / 1\Gamma 1\text{Л}) = & 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v.o})\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v.o})\lambda(w)\tau(w) + \\
& + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{v.o})(2\lambda(g)\tau(g) + 2\lambda(b)\tau(b)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{v.o})\lambda(w)\tau(w).
\end{aligned}$$

Всего в рассматриваемой схеме ОРУ (рисунок 1) возможно возникновение 30 видов аварий. Пять из них рассмотрены выше. Для остальных 25 дерева отказов строятся аналогично.

Результаты и обсуждение

В таблице 3 представлены результаты оценки надежности рассматриваемой схемы ОРУ с использованием метода дерева отказов. Установлено, что на долю пяти рассмотренных видов аварий приходится 89,6% от суммарного аварийного недоотпуска электроэнергии, а длительность восстановления варьируется от 1,5 до 210 часов.

Полученные результаты показывают, что метод дерева отказов позволяет не только количественно оценить надёжность схемы, но и выявить структуру взаимосвязей между отказами её элементов. Высокая доля пяти анализируемых видов аварий в суммарном аварийном недоотпуске электроэнергии подтверждает корректность выбранных сценариев и отражает реальные закономерности функционирования схемы ОРУ.

Таблица 3 – Результаты расчета

Код аварии	Частота аварии Λ , 10^{-3} 1/год	Теряемая мощность, МВт		Аварийный недоотпуск электроэнергии W , кВт ч/год 10^6
		$\Delta P_{о.п.}$	$\Delta P_{в.р.}$	
-/1Г	801	-	1000	168
1Г1Л/1Г	47	1000	1000	9
1Г/-	1	-	1000	0,14
2Г5Л/1Г	58	1000	-	0,09
-/1Г1Л	4	1100	100	0,02
.....				
Итого:				197

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26199335).

Выводы

Проведённое исследование показало возможность эффективного применения метода дерева отказов для оценки надёжности схем ОРУ атомных электростанций. На примере схемы ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам выполнена количественная оценка влияния отказов элементов на потери генерируемой мощности и длительность восстановления нормального режима. Совокупность пяти характерных видов аварий определяет около 90% суммарного аварийного недоотпуска электроэнергии, что подтверждает репрезентативность выбранных в статье сценариев. Использование метода дерева отказов позволило определить наиболее уязвимые элементы схемы и обосновать целесообразность его применения на этапе проектирования и анализа надёжности схем ОРУ атомных электростанций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Клецель, М. Я., Барукин, А. С., Динмуханбетова, А. Ж., Әмірбек Д. Ә. Влияние надежности элементов кольцевых схем электрических станций на недоотпуск электроэнергии. // Вестник Торайғыров университет. Энергетическая серия, 2022. –№1. – С. 99–110. – <https://doi.org/10.48081/OOFL4909>

2 Барукин, А. С., Клецель, М. Я., Динмуханбетова, А. Ж., Әмірбек Д. Ә. Ввод дополнительного выключателя в блок генератор-

трансформатор для энергосбережения в схемах ОРУ электростанций // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2023. – Т. 66, № 4. – С. 333-343. – <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-333-343>

3 **Dinmukhanbetova, A.** Reduction of Energy Underdelivery at Nuclear Power Plants by Enhancing the Reliability of 3/2 Schemes // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2025. – P. 327-332. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM65163.2025.11028469>

4 **Kletsel, M. Ya., Barukin, A. S., Dinmukhanbetova, A. Zh.** Analysis of the methods for assessing the reliability of schemes of outdoor switchgears of electrical stations and substations // XIX Сатпаевские чтения: материалы междунар. конф. молодых ученых, магистрантов, студентов и школьников. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова, 2019. – С. 71–74.

5 **Volkanovski, A., Ćepin, M., Mavko, B.** Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability // Reliability Engineering & System Safety, 2009. – Т. 94, № 6. – P. 1116–1127.

6 **Rahman, F. A.** Application of fault tree analysis for customer reliability assessment of a distribution power system // Reliability Engineering & System Safety, 2013. – Т. 111. – P. 76–85.

7 **Mamdikar, M. R., Kumar, V., Singh, P.** Dynamic reliability analysis framework using fault tree and dynamic Bayesian network: A case study of NPP // Nuclear Engineering and Technology, 2022. – Т. 54, №. 4. – P. 1213–1220. – <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.038>

8 **Гук, Ю. Б.** Теория надежности в электроэнергетике. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.

9 **Балаков, Ю. Н., Мисриханов, М. Ш., Шунтов, А. В.** Проектирование схем электроустановок. Электронный ресурс : учебное пособие для вузов. – М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – 288 с.

10 **Абдурахманов, А. М., Мисриханов, М. Ш., Федоров, В. Е., Шунтов, А. В.** О надежности ячеек элегазовых выключателей 110-750 кВ подстанций // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып 61. Проблемы исследования и обеспечение надежности систем энергетики – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2011. – С. 93–97.

REFERENCES

1 **Kletsel, M. Ya., Barukin, A. S., Dinmukhanbetova, A. Zh., Amirbek, D. A.** Vliianie nadezhnosti elementov kol'tsevykh skhem elektricheskikh stantsii na nedootpusk elektroenergii [Influence of the reliability of ring circuit elements at power plants on the energy not supplied] // Bulletin of

Toraighyrov University. Series: Energetics, 2022. – No. 1. – P. 99–110. – <https://doi.org/10.48081/OOFL4909>

2 **Barukin, A. S., Kletsel, M. Ya, Dinmukhanbetova, A. Zh., Amirbek, D. A.** Vvod dopolnitel'nogo vykliuchatel'ia v blok generator-transformator dlia energosberezheniia v skhemakh ORU elektrostantsii [Introduction of an auxiliary breaker into the generator-transformer block for energy saving in open switchgear circuits of power plants] // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – vol. 66, No. 4. – P. 333–343. – <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-333-343>

3 **Dinmukhanbetova, A.** Reduction of Energy Underdelivery at Nuclear Power Plants by Enhancing the Reliability of 3/2 Schemes // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2025. – P. 327–332. – <https://doi.org/10.1109/ICIEAM65163.2025.11028469>

4 **Kletsel, M.Ya., Barukin, A.S., Dinmukhanbetova, A.Zh.** Analysis of the methods for assessing the reliability of schemes of outdoor switchgears of electrical stations and substations // XIX Satpaevskie chteniya: materialy mezhdunar. konf. molodykh uchenykh, magistrantov, studentov i shkol'nikov [XIX Satpayev Readings: Proceedings of the International Conference of Young Scientists, Master's Students, Students and Schoolchildren]. – Pavlodar : S. Toraighyrov Pavlodar State University, 2019. – P. 71–74.

5 **Volkanovski, A., Čepin, M., Mavko, B.** Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability // Reliability Engineering & System Safety, 2009. – T. 94, № 6. – P. 1116–1127.

6 **Rahman, F. A.** Application of fault tree analysis for customer reliability assessment of a distribution power system // Reliability Engineering & System Safety, 2013. – T. 111. – P. 76–85.

7 **Mamdikar, M. R., Kumar, V., Singh, P.** Dynamic reliability analysis framework using fault tree and dynamic Bayesian network: A case study of NPP // Nuclear Engineering and Technology, 2022. – T. 54, №. 4. – P. 1213–1220. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.038>

8 **Guk, Yu. B.** Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike [Theory of reliability in electric power engineering]. – L. : Energoatomizdat, 1990. – 208 p.

9 **Balakov, Yu. N., Misrikhanov, M. S., Shunts, A. V.** Proektirovanie shem elektroustanovok : uchebnoe posobie dlja vuzov [Designing of electrical circuits : textbook for universities]. – M. : Publishing house MPEI, 2016. – 288 p.

10 **Abdurakhmanov, A. M., Misrikhanov, M. Sh., Fedorov, V. E., Shuntov, A. V.** O nadezhnosti jacheek elegazovykh vykluchatelej 110-750 kV podstantsij. Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih system energetiki. Vyp 61. Problemy issledovaniya i obespechenie nadezhnosti system

energetiki [On the reliability of the cells of gas switches 110-750 kV substations. Methodological issues of reliability research of large energy systems. Issue 61. Problems of research and ensuring the reliability energy systems] – Irkutsk: ISEM SO RAN, 2011. P. 93–97.

Поступило в редакцию 31.10.25.

Поступило с исправлениями 17.11.25.

Принято в печать 31.08.26.

*А. С. Барукин¹, *А. Ж. Динмуханбетова², Б. Е. Маширапов³, О. М. Талипов⁴*

^{1,2,3,4}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

31.10.25 ж. баспаға түсті.

17.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АТОМ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫҢ 500 КВ ОРУ СХЕМАСЫНЫҢ СЕНІМДІЛІГІН АҚАУЛАР АҒАШЫ ӘДІСІМЕН БАҒАЛАУ

Мақалада атом электр станцияларының (АЭС) ашық тарату құрылғылары (АТҚ) схемаларының сенімділігін бағалау үшін қолданылатын ақаулар ағашы әдісін қамтитын логикалық-ықтималдық әдісінің қолданылуы қарастырылады. Зерттеу нысаны ретінде Үндістандағы ең ірі атом электр станцияларының бірі – әрқайсысының қуаты 1000 МВт болатын екі блогы бар Куданкулам АЭС-нің 500 кВ АТҚ схемасы таңдалды. Жұмыстың мақсаты – АТҚ схемасының жеке элементтерінің ақаулары генерацияланатын қуаттың жоғалуына қалай әсер ететінін талдау кезінде ақаулар ағашы әдісінің тиімділігін көрсету. Мақалада соңғы оқиганы формализациялауды, аралық және бастапқы оқиғаларды логика алгебрасының функцияларын пайдалана отырып сипаттауды қамтитын ақаулар ағашын құру алгоритмі берілген. Бес ықтимал зақым түрінің мысалында ақаулар ағашының фрагменттері жасалды, бұл әрбір элементтің АТҚ схемасының жалпы сенімділігіне қосқан үлесін бейнелеуге және генерацияланатын қуаттың жоғалу жиілігі мен қалыпты режимді қалпына келтірудің салыстырмалы ұзақтығын есептеу өрнектерін алуға мүмкіндік берді. Ақаулар ағашы әдісі жеке элементтердің ақаулары мен АТҚ АЭС схемасының жалпы күйі

арасындағы өзара байланыстарды айқын көрсетуге мүмкіндік беретіні және мұндай схемалардың сенімділігін бағалауда кестелік-логикалық әдісті толықтыру ретінде пайдалануға болатыны анықталды.

Кілтті сөздер: АТҚ схемаларының сенімділігі, атом электр станциясы, логикалық-ықтималдық әдіс, ақаулар ағашы, элементтердің ақаулары, генерацияланатын қуат, қалпына келтіру ұзақтығы.

*A. S. Barukin¹, *A. Zh. Dinmukhanbetova², B. E. Mashrapov³, O. M. Talipov⁴*

^{1,2,3,4}Toraighyrov University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 31.10.25.

Received in revised form 17.11.25.

Accepted for publication 31.08.26.

RELIABILITY ASSESSMENT OF A 500 KV OPEN SWITCHYARD SCHEME OF A NUCLEAR POWER PLANT USING THE FAULT TREE METHOD

The article discusses the application of the logic-probabilistic method using fault tree analysis to assess the reliability of open switchyard (OSY) schemes of nuclear power plants (NPPs). The 500 kV OSY scheme of India's largest NPP – Kudankulam, consisting of two 1000 MW units, was selected as the object of study. The purpose of the work is to demonstrate the effectiveness of the fault tree method in analyzing the impact of individual component failures in the OSY scheme on the loss of generated power. The paper presents the algorithm for constructing a fault tree, including the formalization of the top event and the description of intermediate and primary events using Boolean logic functions. Based on five possible types of failures, fragments of fault trees were constructed, illustrating the contribution of each element to the overall reliability of the OSY scheme and providing analytical expressions for calculating the frequency of power loss and the relative duration of restoration to normal operation. It was established that the fault tree method provides a clear representation of the relationships between individual equipment failures and the overall state of the OSY scheme of an NPP and can be used as a complement to the tabular-logical method in reliability assessment of such configurations.

Keywords: reliability of OSY schemes, nuclear power plant, logic-probabilistic method, fault tree, equipment failures, generated power, recovery duration.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

19,0 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.

Электронное издание

19,0 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz