

УДК 621.311.25

doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.10

Д. И. КУХТИН, А. В. ЕФИМОВ, Т. В. ПОТАНИНА, Т. А. ГАРКУША**АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЁТА СТРУКТУРНОЙ НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОБЛОКАХ АЭС**

АННОТАЦИЯ Рассмотрены методы расчёта надёжности сложных технических систем, позволяющие определять вероятность безотказной работы оборудования энергоблоков АЭС: метод перебора состояний, методы минимальных путей и минимальных сечений, метод расчета надёжности, основанный на разложении относительно «особого» элемента; метод построения «дерева отказов». Проведен сравнительный анализ методов расчета надёжности, приведены формулы расчета вероятности безотказной работы элементов логико-структурных схем объектов исследования.

Ключевые слова: энергоблок, вероятность безотказной работы, дерево отказов, метод минимальных путей и минимальных сечений, метод перебора состояний.

D. KUHTIN, A. YEFIMOV, T. POTANINA, T. GARKUSHA**ANALYSIS OF THE COMPUTING METHODS OF STRUCTURAL RELIABILITY OF PROCESS FLOW DIAGRAMS FOR THE POWER GENERATING UNITS OF NUCLEAR POWER PLANTS**

ABSTRACT This paper gives consideration to the methods used for the computation of the reliability of complicated engineering systems that allow us to specify the probability of failure-free operation of the equipment used by the power generating units of NPP, in particular the enumerating technique of states, the methods of minimal ways and minimal cross-sections, the reliability computing method based on the expansion of a relatively "special" elements, and the "fault tree" construction method. The reliability computing method based on the enumerating technique of states is grounded on the logic algebra tool and uses the computing methods of the reliability indices of series, parallel and combined connections in bridge circuits. When implementing the reliability computing method based on minimum ways and cross-sections minimum ways should be determined first. Then minimum cross-sections are determined, i.e. such options of element ways that in case of the failure of one element cause failure of the entire diagram in spite of the functionality of other ways. The reliability computing method based on the expansion of a relatively "special" element provides for the isolation of one ("special") element in the calculable system that is unconditionally faultless (the probability of the operable condition is equal to the unit) or unconditionally fault (the probability of the operable condition is equal to the zero). The analysis of the "fault tree" consists in the determination of such a combination of elements whose simultaneous failure results in the knot of tree, i.e. in the failure of the entire calculable system. In particular cases the set of elements is possible whose failure results in the failure of entire system. The knots of tree are the logic operations of an "AND" or "OR" type (that define the product or the sum of events).

Key words: power-generating unit, failure-free operation probability, fault tree, method of minimum ways and minimum cross-sections, and the enumerating technique of states.

Введение

Вопросам анализа надёжности оборудования энергоблоков АЭС во всем мире, в том числе и в Украине, уделяется повышенное внимание. Для Украины это особенно важно в связи с тем, что большое количество энергоблоков, введенных в эксплуатацию в 70–80-е годы XX столетия, в настоящее время находятся на грани исчерпания первоначально установленного ресурса и требуют целой серии мероприятий, направленных на продление этого ресурса. В результате этого возрастает актуальность научных исследований, связанных с анализом надёжности объектов ядерной энергетики, а также возникает необходимость разработки новых и совершенствования существующих методов анализа статистической информации о функционировании элементов, подсистем и систем энергоблоков АЭС с целью определения параметров, характеризующих их функциональную надёжность и работоспособность [1–7].

Цель работы

В настоящей статье рассмотрены вероятностные методы и подходы, которые могут быть применимы для расчета структурной надёжности схем технологических процессов в энергоблоках АЭС.

Основная часть

Энергоблок АЭС является сложной технической системой, которая включает в себя десятки технологических и электротехнических систем, сотни единиц разнообразного оборудования, тысячи единиц арматуры и приборов контроля. В связи с этим, для эффективного применения вероятностных методов расчета показателей надёжности отдельных систем и оборудования энергоблоков предварительно реализуется принцип декомпозиции, т.е. осуществляется разложение сложной системы на составные компоненты, части или узлы в зависимости от выполняемых ими функций, а за-

© Д. И. Кухтин, А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, Т. А. Гаркуша, 2016

тем строятся их логико-структурные (так называемые мостиковые) схемы, состоящие из элементов и цепей (путей). Такие логико-структурные схемы являются, в известной мере, информационно-расчетными аналогами технологических схем функциональных систем и оборудования энергоблоков АЭС, надежность которых определяется. На рис. 1 представлен пример логико-структурной схемы, которая может рассматриваться, как некоторый аналог участка технологической схемы ниток трубопроводов подвода питательной воды к парогенераторам в системе регенерации высокого давления энергоблока двухконтурных АЭС.

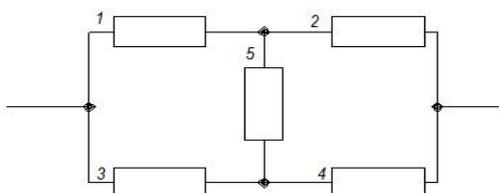


Рис. 1 – Мостиковая схема участка технологической системы подвода питательной воды к парогенераторам АЭС: элементы «1», «2», «3», «4» – отдельные участки трубопроводов с арматурой; элемент «5» – перемычка между ними

Рассмотрим алгоритмы и эффективность применения различных методов расчета надежности систем и оборудования энергоблоков АЭС по критерию вероятности безотказной работы на основе использования мостиковых схем [8–9].

Метод расчета надежности, основанный на переборе состояний, базируется на аппарате алгебры логики и использует методы расчета показателей надежности последовательных, параллельных и смешанных соединений в мостиковых схемах (рис. 1).

Этот метод предусматривает два этапа процесса расчета надежности:

- выявление множества возможных состояний рассчитываемой системы;
- расчёт вероятностей этих состояний.

На первом этапе определяются состояния, отвечающие работоспособному и неработоспособному состояниям рассчитываемой системы. Каждое из этих состояний характеризуется набором элементов, которые могут находиться, как в рабочем состоянии, так и в состоянии отказа. При независимых отказах вероятность каждого состояния определяется произведением вероятностей нахождения элементов в тех или иных состояниях.

Вероятность работоспособного состояния системы (вероятность ее безотказной работы p и вероятность ее отказа q) определяется следующим образом:

$$p = \sum_{j=1}^m \left[\prod_{l_j} p_l \prod_{k_j} q_k \right]; \quad q = 1 - \sum_{j=1}^m \left[\prod_{l_j} p_l \prod_{k_j} q_k \right], \quad (1)$$

где m – общее количество работоспособных состояний, в каждом из которых число исправных элементов равно l_j , а количество вышедших из строя элементов – k_j .

Для анализа всех возможных вариантов состояний рассчитываемой системы составляется таблица, в которую вносятся все возможные варианты состояний элементов (табл. 1). В этой таблице знаком «+» отмечается работоспособное состояние каждого из элементов системы (схемы) и знаком «-» – неработоспособное состояние. В каждом из j состояний системы комбинация работоспособных элементов, помеченных знаком «+» в таблице, обеспечивает с точки зрения технологического процесса подвода питательной воды в парогенератор АЭС (рис. 1), несмотря на отказ остальных элементов.

Таблица 1 – Возможные работоспособные состояния схемы участка системы подвода питательной воды к парогенераторам АЭС

Номер j состояния системы	Состояние элементов	Вероятность p_i состояния системы
1	+++++	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$
2	-++++	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$
3	+ - + + +	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$
4	+ + - + +	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$
5	+ + + - +	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$
6	+ + + + -	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$
7	- + - + +	$q_1 p_2 q_3 p_4 p_5$
8	- + + - +	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$
9	- + + + -	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$
10	+ - - + +	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$
11	+ - + - +	$p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$
12	+ - + + -	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$
13	+ + - + -	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$
14	+ + + - -	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$
15	- + - + -	$q_1 p_2 q_3 p_4 q_5$
16	+ - + - -	$p_1 q_2 p_3 q_4 q_5$

Для упрощения вычислений часто предполагают, что вероятности безотказной работы всех элементов системы одинаковы и для примера, приведённого на рис. 1, соответственно равны $p_i = p, i = \overline{1,5}$, а вероятности их отказов соответственно равны $q_i = q, i = \overline{1,5}$.

После выполнения прямого перебора возможных работоспособных состояний, суммируются значения вероятностей p_j этих состояний, и находится искомая вероятность безотказной рабо-

ты рассчитываемой системы

$$p = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3. \quad (2)$$

Определённый интерес представляет метод расчета надежности систем, который базируется на понятии минимальных путей и сечений. В этом методе множество элементов, при нормальной работе которых система работоспособна, а отказ любого из этих элементов приводит к отказу системы, называется минимальным путем. Под минимальным сечением понимается множество элементов, отказ которых приводит к отказу системы, но работоспособное состояние любого из них обеспечивает работоспособное состояние системы при условии работоспособности элементов, не входящих в данное минимальное сечение. Рассчитываемая система может иметь несколько минимальных путей и минимальных сечений. Необходимо отметить, что данный метод не дает точных значений показателей надежности (вероятности безотказной работы), а дает значения «верхней» и «нижней» границ диапазона их изменений. Однако, во многих случаях, особенно для некоторых специфических систем, подобных оценок оказывается достаточно для практических расчетов.

В процессе реализации метода расчета надежности, основанного на минимальных путях и сечениях, сначала определяются минимальные пути. Например, для схемы, представленной на рис. 1, множество возможных путей, составленных из элементов системы, (рис. 2) следующие: {1-3}, {5-4}, {1-2-4}, {5-2-3}, {1-3-4}, {5-4-3}, {1-5-3}, {1-5-4}, {5-2-4}, {1-2-3}, {1-5-2-4}, {1-5-2-3}, {1-2-3-4}, {5-2-3-4}, {1-3-5-4}, {1-5-2-3-4}. Из них минимальными являются пути: 1-3, 5-4, 1-2-4, 5-2-3. Количество минимальных путей равно четырем.

Вероятность безотказной работы соединения элементов, входящих в минимальные пути, даёт «верхнюю» оценку вероятности безотказной работы всей схемы, представленной на рис. 2

$$p_B = 1 - (1 - p_1 p_3)(1 - p_5 p_4) \times (1 - p_1 p_3 p_4)(1 - p_2 p_3 p_5). \quad (3)$$

Затем определяются минимальные сечения, то есть такие варианты путей элементов, которые при отказе всех элементов одного пути дают отказ всей схемы, несмотря на работоспособность остальных путей. Набор минимальных сечений для схемы, показанной на рис. 1, представлен на рис. 3.

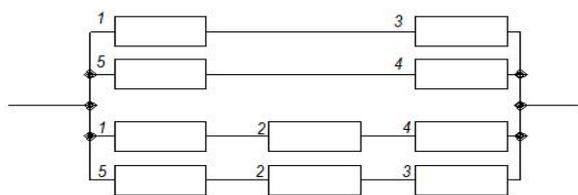


Рис. 2 – Минимальные пути для мостиковой схемы на рис. 1

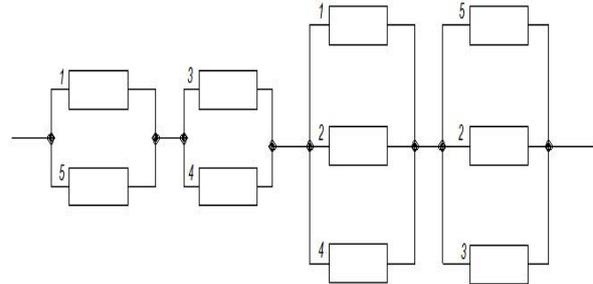


Рис. 3 – Минимальные сечения для мостиковой схемы на рис. 1

Вероятность безотказной работы набора минимальных сечений даёт «нижнюю» оценку вероятности безотказной работы всей схемы

$$p_H = (1 - q_1 q_5)(1 - q_3 q_4) \times (1 - q_1 q_2 q_4)(1 - q_2 q_3 q_5). \quad (4)$$

Согласно методу минимальных путей и сечений, средняя оценка вероятности безотказной работы рассматриваемого соединения при заданных значениях показателей надежности его элементов находится в пределах $p_H \leq p_C \leq p_B$.

Метод расчёта надёжности, основанный на разложении относительно «особого» элемента, предусматривает выделение в рассчитываемой системе одного («особого») элемента, который безусловно исправен (вероятность работоспособного состояния равна единице) или безусловно неисправен (вероятность работоспособного состояния равна нулю). В мостиковой схеме, представленной на рис. 1, таким «особым» элементом может являться перемычка «5».

В случае, когда элемент «5» безусловно исправен, получается схема (рис. 4), для которой вероятность безотказной работы равна

$$p = [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)][1 - (1 - p_3)(1 - p_4)]. \quad (5)$$

При вероятности безотказной работы элемента «5», равной p_5 , вероятность безотказной работы соединения, представленного на рис. 4, равна

$$p_I = p_5 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)][1 - (1 - p_3)(1 - p_4)]. \quad (6)$$

В случае, когда элемент «5» безусловно неисправен, получается следующая схема (рис. 5), для которой вероятность безотказной работы равна



Рис. 4 – Мостиковая схема соединений при безусловно исправном элементе «5» схемы на рис. 1

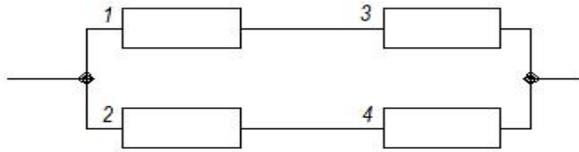


Рис. 5 – Мостиковая схема соединений при безусловно неисправном элементе «5» схемы на рис. 1

$$p = [1 - (1 - p_1 p_3)(1 - p_2 p_4)] \quad (7)$$

а вероятность нахождения элемента «5» в неисправном состоянии равна $1 - p_5$. Вероятность безотказной работы соединения в этом случае составляет

$$p_{II} = (1 - p_5)[1 - (1 - p_1 p_3)(1 - p_2 p_4)] \quad (8)$$

Вероятность безотказной работы рассматриваемой мостиковой схемы является суммой вероятностей двух рассмотренных состояний при выделенном особом элементе

$$P = P_I + P_{II} \quad (9)$$

Одним из методов расчёта надёжности системы элементов является метод построения «дерева отказов». «Дерево отказов» представляет связь событий отказа системы с отказами элементов (рис. 6).

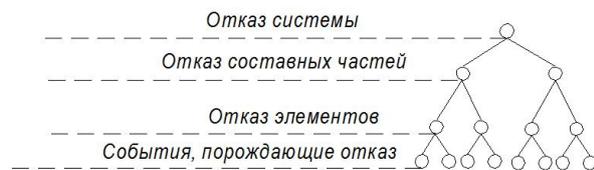


Рис. 6 – Граф «дерева отказов»

Анализ «дерева отказов» заключается в определении такой комбинации элементов, одновременный отказ которых приводит к вершине дерева, то есть к отказу всей рассматриваемой системы. В частных случаях может быть множество элементов, отказ которых приводит к отказу системы. Вершины дерева представляют собой логические операции типа «И» и «ИЛИ» (обозначающие соответственно произведение или сумму событий).

«Дерево отказов» начинается с конечного события, в качестве которого понимается полный отказ системы. На более низком уровне обозначаются события, которые вызывают конечное событие в соответствии с логической операцией, связывающей эти события. На нижнем уровне располагаются события отказов элементов.

Для анализа вероятности безотказной работы в этом методе вводятся понятия сечения и минимального сечения. Под сечением понимается множество элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а под минимальным сечением – такое множество, из которого нельзя удалить ни одного элемента, иначе оно перестанет быть сече-

нием. Если анализ «дерева отказов» начинается от конечного события, то при прохождении через вершину «И» увеличивается число элементов в сечении, а при прохождении через вершину «ИЛИ» – количество сечений. Если определено множество минимальных сечений, то вероятность отказа системы определяется как сумма вероятностей отказов соответствующих сечений.

На рис. 7 приведен пример построения «дерева отказов» для описания возникновения аварий в реакторах энергоблоков АЭС.

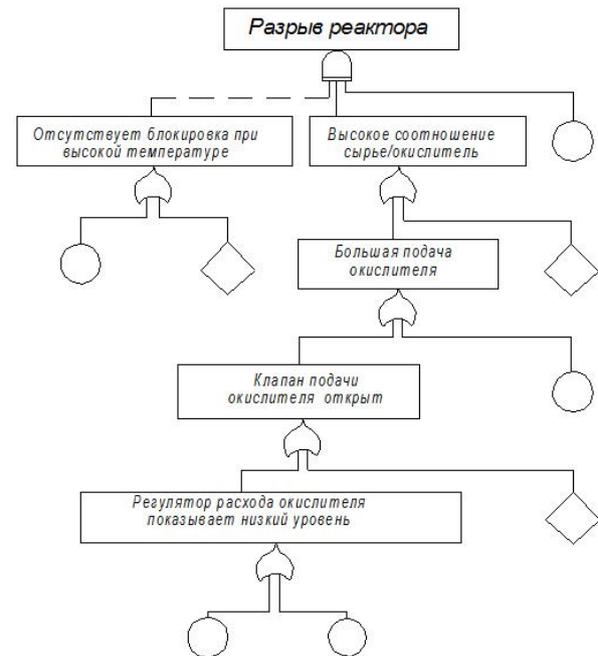


Рис. 7 – «Дерево отказов» для описания возникновения аварий в реакторах энергоблоков АЭС

Выводы

Из проведённого анализа можно сделать вывод, что методы расчета показателей надёжности сложных технических систем по критерию вероятности безотказной работы весьма различны и существенно зависят от функционального назначения рассматриваемых систем и имеющейся информации о вероятностях безотказной работы и отказов элементов этих систем. Длительный практический опыт эксплуатации энергоблоков АЭС и данные многочисленных натуральных и имитационных экспериментов часто дают возможность оценить вероятность безотказной работы и отказов элементов отдельных систем и подсистем энергоблоков, в том числе и систем, важных для безопасности АЭС. Однако, поскольку для таких сложных энергетических объектов, как энергоблоки АЭС, не всегда удастся преобразовать структуры отдельных систем и подсистем к простым логико-структурным схемам, то необходимо дальнейшее совершенствование существующих методов, а также разработка новых методов и про-

граммных средств, которые позволили бы достаточно точно определять надежность того или иного оборудования энергоблоков АЭС и повысить, таким образом, качество эксплуатации энергоблоков.

Список литературы

- 1 **Кенсницкий, О. Г.** Безопасность, надёжность и эффективность эксплуатации электротехнического и электроэнергетического оборудования блоков АЭС [Текст] / **О. Г. Кенсницкий, А. А. Ключников, Г. М. Федоренко.** – Чернобыль : Ин-т безопасности АЭС НАН Украины, 2009. – 240 с. – ISBN 978-966-02-5202-8.
- 2 Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій НП 306.2.141-2008 [Текст] : утверджен і введён в действие приказом Государственного комитета ядерного регулирования Украины от 19.11.2007 № 162. – К. : Державна адміністрація ядерного регулювання України, 2008. – 35 с.
- 3 ГНД 34.09.453-2003. Розрахунок показників надійності для електростанцій, теплових мереж та енергокомпаній. Методика [Текст]. – К. : ОЕП «ГІФРЕ», 2004. – 43 с.
- 4 **Кожешкурт, В. И.** Применение ускоренного моделирования для расчета оптимального количества запасных элементов, обеспечивающих требуемую надежность системы [Текст] / **В. И. Кожешкурт, В. Б. Осташевский, Н. Ю. Кузнецов** // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 69–79. – ISSN 1560-9189.
- 5 **Єфімов, О. В.** Вплив структурних змін в системі регенерації на показники роботи і надійності енергоблоків АЕС потужністю 1000 МВт [Текст] / **О. В. Єфімов, Т. А. Гаркуша** // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 1. – С. 24–30. – ISSN 2078-5364.
- 6 **Фокин, Ю. А.** Развитие метода минимальных путей и сечений для учёта специфики ЭЭС: способы формализации определения основных сечений и алгоритмы учёта нормально отключённых элементов [Текст] / **Ю. А. Фокин, А. В. Мацнев** // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2011. – Вып. 61. – С. 163–169.
- 7 **Ромашов, Ю. В.** Оценка показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР на основе континуальной модели коррозионного растрескивания [Текст] / **Ю. В. Ромашов** // Ядерная та радіаційна безпека. – 2012. – № 3(55). – С. 16–20. – ISSN 2073-6231.
- 8 **Острейковский, В. А.** Теория надёжности [Текст] : учеб. для вузов / **В. А. Острейковский.** – М. : Высшая школа, 2003. – 63 с. – ISBN 5-06-004053-4.
- 9 **Китушин, В. Г.** Надёжность энергетических систем [Текст] / **В. Г. Китушин.** – М. : Высшая школа, 1984. – 256 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Kensitsky, O., Kolesnikov, A. and Fedorenko, G.** (2009), *Bezopasnost', nadjozhnost' i jeffektivnost' jekspluatacii jelektrotehnicheskogo i jeletrojenergeticheskogo oborudovanija blokov AJeS* [Safety, reliability

- and efficiency of electrical and power equipment NPP unit operation], In-t bezopasnosti AJeS NAN Ukrainy [Nuclear Power Plant Safety Institute of National Academy of Sciences of Ukraine], Chernobyl, Ukraine.
- 2 (2008), *Zagal'ni polozhennja zabezpechennja bezpeky atomnyh stancij NP 306.2.141-2008* [General safety of nuclear power plants NP 306.2.141-2008], utverzdjon i vvedjon v dejstvie prikazom Gosudarstvennogo komiteta jadernogo regulirovanija Ukrainy ot 19.11.2007 № 162. [State Administration of Nuclear Regulation of Ukraine], Kyiv, Ukraine.
- 3 (2004), GND 34.09.453-2003. *Rozrahnok pokaznykiv nadijnosti dlja elektrostancij, teplovyh mrezh ta energokompanij. Metodyka* [MLA 34.09.453-2003. Calculation of reliability for power, heat and energy networks. Methods], OEP "HIFRE", Kyiv, Ukraine.
- 4 **Kozheshkurt, V., Ostrasevskiy, V. and Kuznetsov, N.** (2008), "Primenenie uskorenogo modelirovanija dlja rascheta optimal'nogo kolichestva zapasnyh jelementov, obespechivajushhih trebuemuju nadezhnost' sistemy [Application of Fast Simulation to the Evaluation of the Optimal Number of Reserve Components Ensuring the Required System Reliability]", *Rejestracija, zberigannja i obrobka danyh* [Data Recording, Storage & Processing], no. 1, pp. 69–79, ISSN 1560-9189.
- 5 **Efimov, A. and Garkusa, T.** (2009), "Vplyv strukturnyh zmin v systemi regeneracii na pokaznyky roboty i nadijnost' energoblokov AES potuzhnistju 1000 MVt [The dependence of efficiency and reliability of nuclear turbosets with capacity of 1000 mv from changing's of schemes of regeneration]", *Integrovani tehnologii' ta energozberezhennja* [Integrated Technologies and Energy Conservation], no. 1, pp. 24–30, ISSN 2078-5364.
- 6 **Fokin, Y. and Matsiev, A.** (2011), "Razvitie metoda minimal'nyh putej i sechenij dlja uchjota specifiky JeJeS: sposoby formalizacii opredelenija osnovnyh sechenij i algoritmy uchjota normal'no otkljuchjonnyh jelementov [Development of the minimal paths and sections to accommodate the specifics of electric power systems: methods of formalizing the definition of the main sections and accounting algorithms normally disconnected elements]", *Metodicheskie voprosy issledovanija nadjozhnosti bol'shijh sistem jenergetiki* [Methodical research questions the reliability of large-scale power systems], issue 61, pp. 163–169.
- 7 **Romashov, Y.** (2012), "Ocenka pokazatelej dolgovechnosti teploobmennyyh trub parogeneratorov AJeS s VVJeR na osnove kontinual'noj modeli korrozionnogo rastreskivaniya [Assessment of reliability indices for WWER steam generator heat exchange tubes based on a continuum stress-corrosion cracking model]", *Jaderna ta radiacijna bezpeka* [Nuclear & radiation safety], no. 3(55), pp. 16–20, ISSN 2073-6231.
- 8 **Ostreykovsky, V.** (2003), *Teorija nadjozhnosti* [Reliability theory], *Vysshaja shkola* [Higher School], Moscow, Russia, ISBN 5-06-004053-4.
- 9 **Kitushin, V.** (1984), *Nadjozhnost' jenergeticheskijh sistem* [The reliability of energy systems], *Vysshaja shkola* [Higher School], Moscow, Russia.

Сведения об авторах (About authors)

Кухтин Дмитрий Игоревич – аспирант кафедры «Парогенераторостроения», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина; тел.: +38 (063) 608-19-03, e-mail: kuhtindc@yandex.ua, ORCID 0000-0002-7088-5452.

Kukhtin Dmitry Igorevich – Postgraduate Student at the Department of Steam generator construction, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Ефимов Александр Вячеславович – доктор технических наук, профессор, зав. каф. Парогенераторостроения, г. Харьков; Украина, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: +38 (097) 393-52-24, e-mail: AVEfimov@kpi.kharkov.ua.

Yefimov Alexander Vyacheslavovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, The head of the Department of Steam generator construction, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Потанина Татьяна Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Парогенераторостроения», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; тел.: +38 (096) 760-07-43, e-mail: potaninatetiana@gmail.com.

Potanina Tatyana Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor; National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Steam generator construction, Kharkov, Ukraine.

Гаркуша Татьяна Анатольевна – научный сотрудник кафедры «Парогенераторостроения», Национальный технический университет, «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Garkusha Tatyana Anatolievna – Researcher at the Department of Steam generator construction, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кухтин, Д. И. Анализ методов расчета структурной надежности схем технологических процессов в энергоблоках АЭС [Текст] / **Д. И. Кухтин, А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, Т. А. Гаркуша** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 66–71. – Бібліогр. : 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.10.

Please cite this article as:

Kukhtin, D., Yefimov, A., Potanina, T. and Garkusha, T. (2016), "Analysis of the Computing Methods of Structural Reliability of Process Flow Diagrams for the Power Generating Units of Nuclear Power Plants", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 66–71, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.10.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кухтін, Д. І. Аналіз методів розрахунку структурної надійності схем технологічних процесів в енергоблоках АЕС [Текст] / **Д. І. Кухтін, О. В. Єфімов, Т. В. Потаніна, Т. А. Гаркуша** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 66–71. – Бібліогр. : 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.10.

АНОТАЦІЯ Розглянуто методи розрахунку надійності складних технічних систем, які дозволяють визначити ймовірність безвідмовної роботи устаткування енергоблоків АЕС, зокрема: метод перебору станів, методи мінімальних шляхів і мінімальних перетинів; метод розрахунку надійності, заснований на розкладанні відносно «особливого» елемента, метод побудови «дерева відмов». Проведено порівняльний аналіз даних методів, наведено формули розрахунку ймовірності безвідмовної роботи елементів логіко-структурних схем об'єктів дослідження.

Ключові слова: енергоблок, ймовірність безвідмовної роботи, дерево відмов, метод перебору станів, методи мінімальних шляхів і мінімальних перетинів.

Поступила (received) 23.01.2016