

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВЕРОЯТНОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

ONE OF APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF RELIABILITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH PROBABILITY FUNCTIONING PARAMETERS

Сукач Е.И., Жердецкий Ю.В., Бужан М.А., Кончиц А.А.

Беларусь, Гомель, Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины
elena.sukach@mail.ru, yuraid@tut.by, mfredy92@gmail.com, alexey.konchits99@mail.ru

Аннотация. Рассматривается один из подходов к исследованию надёжности электроэнергетических систем, формализованных в виде n -полюсников и базирующийся на математическом аппарате вероятностного моделирования, обеспечивающего расчёт надёжности электроэнергетических систем, функционирующих в условиях воздействия случайных факторов. Предложенный подход может быть использован как для расчёта надёжности объектов ограниченной размерности, так и для получения исходных данных для расчёта надёжности электроэнергетических систем большой размерности. Представлены результаты апробации программного средства, применённого для оценки надёжности фрагмента электроэнергетической системы.

Ключевые слова: надёжность, электроэнергетическая система, n -полюсники, автоматизация расчета надежности, программный комплекс, вероятностное моделирование, математическая модель, граф.

Введение. Одним из наиболее универсальных способов формализации электроэнергетических систем, включающим множество элементов (оборудование, линии связи), являются графы $G(N, K)$, вершинам которых ставятся в соответствие структурные элементы $N = \{N_\nu\}, \nu = \overline{1, l}$, имеющие вероятностные параметры надёжности, а рёбрам – линии связи между этими элементами $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$. Такое представление электроэнергетических систем позволяет рассмотреть их как сетевые структуры и применить для оценки их надёжности различные математические методы [1,2], которые учитывают вероятностную природу надёжности элементов, однако работают в предположении одной начальной (вход) и одной конечной вершины (выход). В статье предлагается способ вероятностной оценки надёжности электроэнергетических систем, рассмотренных в виде структур n -полюсников, разработанный в рамках вероятностно-алгебраического подхода [3], и позволяющий, реализовать расчет вероятностных характеристик исследуемых объектов по аналогичным вероятностным характеристикам их структурных элементов.

Инструментальные средства моделирования реализованы в составе программно-технологического комплекса (ПТК) «ControlSyst» [4], предназначенного для автоматизации процессов моделирования сетевых объектов различной структурной сложности.

Схемы формализации электроэнергетической системы в виде графовой структуры n -полюсника. Способ формализации электроэнергетической системы выбирается в зависимости от её структурной организации, числа источников энергии и числа её потребителей.

При формализации электроэнергетической системы в виде графа-трёхполюсника $G(N, K)$, где $N = \{N_\nu\}, \nu = \overline{1, l}$ – множество вершин, а $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ – множество рёбер (рисунок 1), определяются входы в систему ($N_1, N_2 \in N$) и выход из неё ($N_3 \in N$).

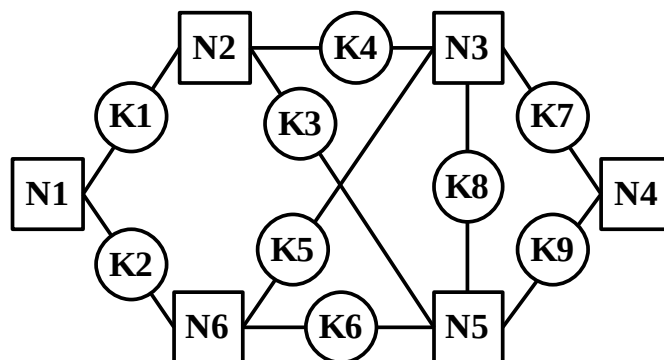


Рисунок 1– Схема электроэнергетической системы, формализованной в виде графа

Вершины графа $N = \{N_v\}, v = \overline{1, l}$ описываются переменными x_i , определяющими состояния надёжности элементов $S = \{S_j\}, j = \overline{1, 2}$ и принимающими значения:

$$x_i = \begin{cases} 1 & (\text{работа}), \text{ с вероятностью } q_i \\ 0 & (\text{отказ}), \text{ с вероятностью } 1 - q_i \end{cases} \quad (1)$$

Надёжность системы, формализованной в виде графа-трёхполюсника описывается 5 результирующими состояниями $S = \{S_j\}, j = \overline{1, 5}$, (таблица 1), которым в графе соответствует элементы связности.

Таблица 1 – Описание состояний надёжности электроэнергетической системы, формализованной в виде трёхполюсника

Состояние	Графическая интерпретация	Представление в виде множества связанных вершин
S_1		$\{\{1\}, \{2\}, \{3\}\}$
S_2		$\{\{1, 2\}, \{3\}\}$
S_3		$\{\{2, 3\}, \{1\}\}$
S_4		$\{\{1, 3\}, \{2\}\}$
S_5		$\{1, 2, 3\}$

Ставится задача определения вектора вероятностей состояний надёжности исследуемой системы, имеющей два входа и один выход, а именно:

$$P^s = (p_1^s, p_2^s, \dots, p_5^s), \sum_{j=1}^5 p_j^s = 1. \quad (2)$$

При рассмотрении электроэнергетической системы с четырьмя терминальными вершинами предполагается, что у системы имеется два входа и два выхода. На рисунке 1 входам соответствуют вершины $N_1, N_2 \in N$, а выходам – $N_3, N_4 \in N$.

Поскольку рассматривается система, элементы которой характеризуются вероятностными значениями надёжности, то она может находиться в одном из 15 состояний $S = \{S_j\}, j = \overline{1,15}$ (таблица 2), характеризующими варианты её надёжности (связности терминальных вершин).

Например, состояние S_2 , описывает состояние системы-четырёхполюсника, у которой функционируют N_1 и N_2 . Соответственно в графе присутствует связь между соответствующими вершинами. Состояние S_6 определяет состояние системы, у которой функционируют компоненты N_1, N_2, N_3 .

Ставится задача определения вектора вероятностей состояний надёжности исследуемой системы, имеющей два входа и два выхода, а именно:

$$P^s = (p_1^s, p_2^s, \dots, p_{15}^s), \sum_{j=1}^{15} p_j^s = 1. \quad (3)$$

Таблица 2 – Состояния надёжности электроэнергетической системы, формализованной в виде четырёхполюсника

Состояние	Графическая интерпретация	Представление в виде множества связанных вершин
S_1		$\{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}\}$
S_2		$\{\{1,2\}, \{3\}, \{4\}\}$
S_3		$\{\{1,3\}, \{2\}, \{4\}\}$
S_4		$\{\{1,4\}, \{2\}, \{3\}\}$
S_5		$\{\{2,3\}, \{1\}, \{4\}\}$
S_6		$\{\{1,2,3\}, \{4\}\}$
S_7		$\{\{1,4\}, \{2,3\}\}$
S_8		$\{\{2,4\}, \{1\}, \{3\}\}$
S_9		$\{\{1,3\}, \{2,4\}\}$
S_{10}		$\{\{1,2,4\}, \{3\}\}$
S_{11}		$\{\{3,4\}, \{1\}, \{2\}\}$
S_{12}		$\{\{1,2\}, \{3,4\}\}$
S_{13}		$\{\{1,3,4\}, \{2\}\}$
S_{14}		$\{\{2,3,4\}, \{1\}\}$
S_{15}		$\{1,2,3,4\}$

Оценка надёжности электроэнергетической системы. На рисунке 2 представлен фрагмент электроэнергетической сети районного центра.

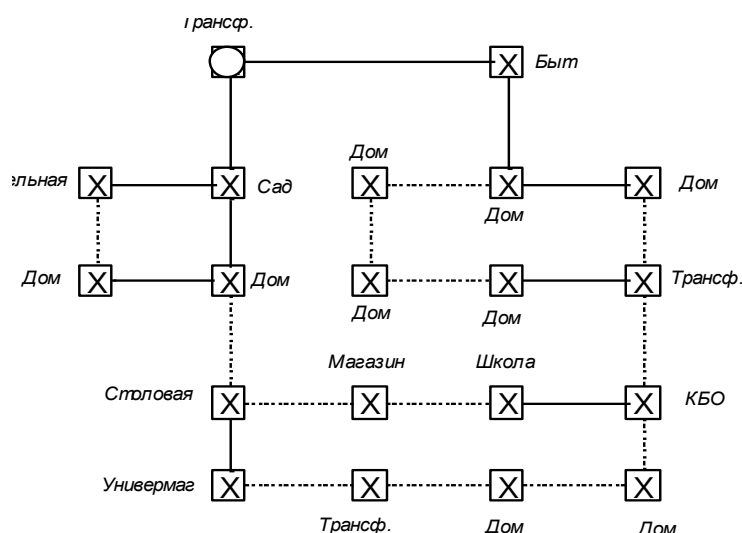


Рисунок 2 – Схема фрагмента электроэнергетической сети

Система может быть формализована как в виде графа-трёхполюсника так, и в виде графа-четырёхполюсника. Формализуем фрагмент в виде графа-трёхполюсника. На рисунке 3 данный фрагмент системы представлен в виде графа $G(N, K)$, где $N = \{N_v\}, v = \overline{1,20}$, $K = \{K_i\}, i = \overline{1,23}$. В качестве терминальных вершин выступают два входа $N_2, N_4 \in N$ и один выход $N_{18} \in N$.

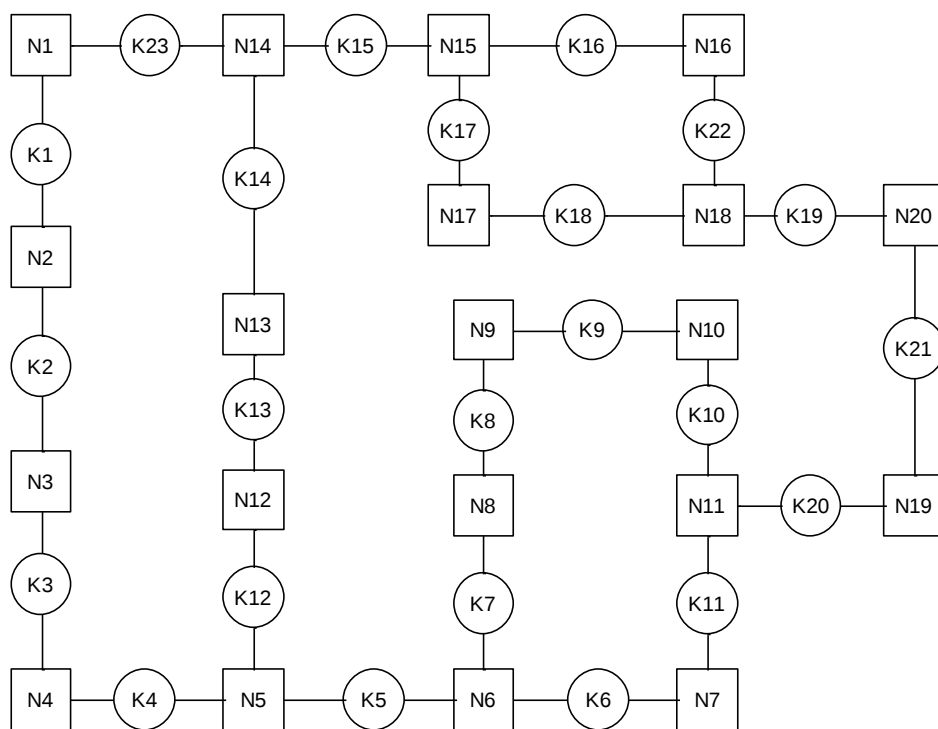


Рисунок 3 – Граф модели фрагмента электроэнергетической сети, формализованной в виде графа-трёхполюсника.

В виду того, что представленная модель электроэнергетической системы является примером, позволяющим продемонстрировать возможности разработанного математического аппарата, исходные данные (1) были выбраны случайным образом в рабочей точке области определения параметров элементов, выделенных в процессе формализации объекта исследования (таблица 3).

Таблица 3 – Показатели надежности элементов электроэнергетической системы.

Элемент электроэнергетической системы	Вероятностный показатель работы элемента	Вероятностный показатель отказа элемента
Трансформатор	0,9000	0,1000
Потребитель электроэнергии 1 типа	0,8730	0,1270
Потребитель электроэнергии 2 типа	0,9685	0,0315
Потребитель электроэнергии 3 типа	0,9000	0,1000
Линия электропередачи воздушная	0,9625	0,0375
Линия электропередачи подземная	0,9910	0,0090

Для элементов графа, представленного на рисунке 2, сформированы исходные данные вероятностей работы элементов электроэнергетической сети (рисунок 3), приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели надежности элементов-вершин графа модели электроэнергетической системы.

Элемент	Надежность	Элемент	Надежность	Элемент	Надежность	Элемент	Надежность
N ₁	0,8730	N ₆	0,9000	N ₁₁	0,9000	N ₁₆	0,9000
N ₂	0,9000	N ₇	0,8730	N ₁₂	0,8730	N ₁₇	0,8730
N ₃	0,9685	N ₈	0,9000	N ₁₃	0,8730	N ₁₈	0,9000
N ₄	0,9000	N ₉	0,9685	N ₁₄	0,9000	N ₁₉	0,8730
N ₅	0,9685	N ₁₀	0,9000	N ₁₅	0,8730	N ₂₀	0,8730

Вероятностные показатели надежности приведены для вершин, что в свою очередь означает оценку надежности электроэнергетической системы со схемой формализации «элементы-вершины» [5].

В таблице 5 приведены вероятности надежной работы линий связи (ребер графа модели электроэнергетической системы), которые использовались для оценки надежности электроэнергетической системы, формализованной по схеме «элементы-ребра».

Таблица 5 – Показатели надежности элементов-ребер графа модели электроэнергетической системы.

Элемент	Надежность	Элемент	Надежность
K ₁	0,9625	K ₁₃	0,9625
K ₂	0,9625	K ₁₄	0,9625
K ₃	0,9625	K ₁₅	0,9625
K ₄	0,9625	K ₁₆	0,9625
K ₅	0,9910	K ₁₇	0,9910
K ₆	0,9910	K ₁₈	0,9910
K ₇	0,9625	K ₁₉	0,9910
K ₈	0,9625	K ₂₀	0,9910
K ₉	0,9625	K ₂₁	0,9910
K ₁₀	0,9625	K ₂₂	0,9910
K ₁₁	0,9910	K ₂₃	0,9910
K ₁₂	0,9910		

Результаты моделирования фрагмента электроэнергетической системы для двух схем формализации представлены в таблице 6 (схема формализации «элементы-вершины») и таблице 7 (схема формализации «элементы-рёбра»).

Таблица 4 – Результаты моделирования фрагмента электроэнергетической системы для схемы формализации «элементы-вершины».

Состояния системы	Вероятностные оценки
Состояние S_1	0,0000067579689588000
Состояние S_2	0,0000276652821192000
Состояние S_3	0,0000165545896312000
Состояние S_4	0,0306100042564110000
Состояние S_5	0,9693390179028800000

Таблица 5 – Результаты моделирования фрагмента электроэнергетической системы для схемы формализации «элементы-рёбра».

Состояния системы	Вероятностные оценки
Состояние S_1	0,0000423908958435058
Состояние S_2	0,0002661804612979000
Состояние S_3	0,0024654047857418900
Состояние S_4	0,0081481095264200000
Состояние S_5	0,9890779143307000000

Полученные оценки вероятностей результирующих состояний надёжности фрагмента электроэнергетической системы представляют собой целый вектор вероятностей состояний надёжности объекта исследования, что является более информативным при выборе проектного решения для электроэнергетических объектов ограниченной размерности. При рассмотрении систем большой размерности, полученные результаты моделирования могут служить исходными данными, позволяющими реализовать вероятностно-алгебраическое умножение структур (n-полосников) [5].

Закключение. Для выбора надёжного варианта организации электроэнергетического объекта предлагается воспользоваться компьютерным моделированием, позволяющим построить модели с учетом числа элементов, структурной организации объекта и числа входов/выходов.

Подход не требует больших объемов ресурсов для проведения моделирования, реализуется с использованием параметризованных моделей в составе ПТК «ControlSyst», учитывающих варианты структурной организации [6] и схему формализации объекта исследования.

Практическая значимость подхода заключается в возможности решения типовых задач проектного моделирования и анализа вероятностных характеристик надёжности большого класса неоднородно-ненадёжных электросетевых структур, которые представляются в виде графов, имеющих множество входов/выходов, таких как:

- оценка вероятностных характеристик надёжности структур n-полосников на основе вероятностных состояний их элементов;

- выявление множества структурных элементов и их комбинаций, оказывающих существенное влияние на вероятностные значения выбранного показателя надёжности исследуемых объектов;

- получение, обоснование и оптимизации различных проектных, эксплуатационных и управленческих решений на основе результатов расчёта [7].

Литература

1. Сукач, Е.И. Карасева Е.И., Жердецкий Ю.В., Бужан М.А. О различных подходах к исследованию вероятностных характеристик надёжности информационно-вычислительных сетей // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2015 – № 3 (84) – С.83-87.

2. Карасева Е.И., Сукач Е.И., Карасев В.В. Вероятностная оценка надежности программного обеспечения // 15th International Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems. MA SR-2015», труды Международной научной школы МА БР - 2015, ноябрь 2015 г. – Санкт-Петербург: ГУАП-2015. – С. 221-223.
3. Сукач Е.И., Ратобыльская Д.В., Каморникова Т.Я. Вероятностно-алгебраическое моделирование функционально-сложных систем // 10th International Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems. MA SR-2010», труды Международной научной школы МА БР –2010, 6-10 июля, 2010 г. – Санкт-Петербург: ГУАП –2010. – С. 495-500.
4. Программно-технологический комплекс автоматизации проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 773 / Е.И. Сукач, Ю.В. Жердецкий. – Минск: НЦИС, 2015. – Заявка № С20150031. – Дата подачи: 15.04.15.
5. Бужан М.А., Жердецкий Ю.В., Сукач Е.И., Вероятностно-алгебраическое моделирование как средство оценки надёжности при проектировании электроэнергетических систем //Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.– 2017. – 3(102). – С.77-82.
6. Сукач, Е.И. Вероятностно-алгебраическое моделирование как средство оценки надёжности при проектировании электроэнергетических систем/ Е.И. Сукач, М.А. Бужан, Ю.В. Жердецкий //Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2017. – 3(102). – С.77-82.
7. Карасёва, Е.И. Методы оценки надежности программного обеспечения для повышения конкурентоспособности предприятий /Е.И. Сукач, Е.И. Карасёва, Е.В. Акуленко, Ч.А. Сумачакова, В.В. Карасев// 15th International Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems. MA SR-2015», труды Международной научной школы МА БР -2015, ноябрь 2015 г. – Санкт-Петербург: ГУАП-2015. – С. 275-280.