

## Информатика

УДК 519.174

### Вероятностно-алгебраическое моделирование как средство оценки надёжности при проектировании электроэнергетических систем

М.А. БУЖАН, Ю.В. ЖЕРДЕЦКИЙ, Е.И. СУКАЧ

Рассматривается один из подходов к оценке надёжности электроэнергетических объектов, функционирующих в условиях воздействия случайных факторов. Построение и эксплуатация моделей надёжности электроэнергетических систем различной структурной организации обеспечены программными средствами, автоматизирующими основные этапы формирования моделей и получения вероятностных оценок надёжности функционирования электроэнергетических систем. Представлены результаты апробации программного средства, применённого для оценки надёжности фрагмента электроэнергетической системы районного центра.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, надёжность, графы, автоматизация расчета надёжности, вероятностное моделирование.

One of the approaches to assessing the reliability of electric power facilities operating under the influence of random factors is considered. The construction and operation of reliability models of electric power systems of various structural organizations are provided with software that automates the main stages of model formation and obtaining probabilistic estimates of the reliability of the functioning of electric power systems. The results of approbation of the software used to assess the reliability of a fragment of the power system of the district center are presented.

**Keywords:** electric power system, reliability, graphs, automation of reliability calculation, probabilistic modeling.

**Введение.** Проблема надёжности электроэнергетических систем относится к задачам определения и оптимизации их показателей на этапах планирования, проектирования, сооружения и эксплуатации. Надёжность – свойство объекта или технического устройства выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Надёжность любой электроэнергетической, как и любой технической системы, один из основных показателей, характеризующих ее эффективность.

Существующие расчетные методы [1], [2], позволяющие произвести оценки надёжности сетевых структур, применимы при определенных ограничениях. Как результат не учитывается нелинейность изменений, происходящих с элементами.

Для оценки и прогнозирования надёжности организации электроэнергетических объектов используются различные математические модели, позволяющие описать структуру объекта и оценить характеристики его функционирования одномоментно и с учётом динамически изменяющихся характеристик надёжности составляющих его элементов. Большой класс таких методов учитывает изменения, происходящие с каждым из элементов, их взаимное влияние и их влияние на систему в целом [3]. Одним из эффективных расчётных методов оценки надёжности организации электроэнергетических объектов является вероятностное моделирование [4], основанное на математическом аппарате стохастических алгебр и предполагающее учёт вероятностных связей между отказами системы и случайными событиями, от которых они зависят – отказами элементов.

Отказы элементов исследуемых объектов, возникающие при передаче электричества от электрической станции к подстанции, могут приводить к существенному снижению надёжности функционирования электроэнергетической сети, а в предельном случае служить причиной аварии.

В статье описывается один из подходов и программное средство, позволяющие оценить влияние характеристик надёжности отдельных участков на надёжность системы в целом и обосновать выбор варианта структурной организации электроэнергетической системы в результате расчета вероятностей состояний системы, характеризующих уровни её надёжности.

**Описание объекта исследования.** Любая электроэнергетическая система представляет собой план размещения электростанций и электросетевых объектов на основе оценки прогнозов электропотребления в виде детальных схем, описывающих физическое расположение структурных элементов электросетевых объектов, выполненного согласно установленным стандартам. Главная задача системы – формирование надёжной, экономически эффективной и оптимальной структуры генерирующих мощностей и электросетевых объектов, создание условий для предотвращения наиболее эффективным способом прогнозируемых дефицитов электрической энергии.

Упрощение подобных схем позволяет интерпретировать объекты в виде графов, в которых физическим элементам с вероятностными характеристиками надёжности ставятся в соответствие вершины или рёбра. Формализация электроэнергетических систем в виде графов позволяет оперативно и максимально точно отобразить структурную организацию объектов, а применение специальных методик расчёта их вероятностных характеристик надёжности (безопасности) обеспечивает получение оценочных данных надёжности их организации с учетом числа и состав терминальных вершин.

Предполагается, что электроэнергетическая система представляется совокупностью элементов  $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ , число которых выделяется в соответствии с уровнем детализации объекта. Это могут быть как неделимые элементы, представляющие самый высокий уровень детализации сложных систем, так и подсистемы, включающие совокупность неделимых элементов, которые рассматриваются как самостоятельные неделимые элементы системы выбранного уровня абстрагирования. Например, при исследовании надёжности электрической станции, считаем ее системой, а в качестве элементов рассматриваем генераторы, трансформаторы, выключатели, шины и т. д. При оценке надёжности генератора элементами будут статор, ротор, обмотки и др.

После выбора уровня детализации определяются численные значения совокупности параметров, изменяющиеся в процессе функционирования и характеризующие состояние надёжности элементов. Иными словами, формируется вероятность нахождения в определенном состоянии элемента в текущий момент времени, где вероятностная характеристика надёжной работы элемента 1, а вероятностная характеристика отказа элемента 0.

Анализ электроэнергетических систем позволил сделать вывод о том, что состояния элементов могут характеризовать различные уровни износа элементов, соответствовать различным видам отказов или определять возможные значения исследуемого свойства, имеющего вероятностную природу, и, зачастую, не всегда достаточно рассмотреть два состояния (1 и 0). В общем случае число состояний надёжности элементов определяется множеством, которое формируется с учётом особенностей объекта исследования и степени его детализации.

Выбор структурных элементов электроэнергетических систем: устройств (станций, подстанций, генераторов и т. д.) или линий связи (воздушные, подземные), при оценке их надёжности, определяет схему формализации исследуемого объекта, а именно: «элементы-вершины», «элементы-ребра» [5]. Разработанный математический аппарат, позволяет на любом этапе оценки надёжности модели системы изменить вариант схемы её формализации.

В качестве характеристик надёжности элементов при оценке надёжности организации участков электроэнергетической системы рассматриваются вероятности отказов, возникающих в ходе доставки электроэнергии, которые описываются векторами:

$$P^i = (p_0^i, p_1^i), \sum_{j=0}^1 p_j^i = 1, i = \overline{1, m} \quad (1)$$

Первые составляющие  $p_0^i$  векторов (1) определяют вероятность надёжной работы  $i$ -ых элементов, выделенных в процессе формализации. Вторые составляющие векторов  $p_1^i$  векторов (1) определяют вероятность отказа работы  $i$ -ых элементов системы.

При исследовании системы с тремя терминальными вершинами ставится задача определения вектора вероятностей состояний надёжности, который имеет вид:

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

При увеличении числа терминальных вершин увеличивается. В частности для систем с тремя терминальными вершинами рассчитывается вектор вероятностей вида

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

**Средство автоматизации расчёта надёжности электроэнергетических систем.** Разработка вероятностных моделей организации электроэнергетических объектов, функционирующих в условиях риска и неопределенности, представляет собой длительный, трудоёмкий процесс, и довольно часто к моменту эксплуатации реализованные модели оказываются непригодными из-за существенных изменений, произошедших в структуре и параметрах исследуемых объектов. Поэтому автоматизация процессов построения и эксплуатации вероятностных моделей электроэнергетических объектов, функционирующих в условиях риска и неопределенности, сокращает сроки выполнения проектных работ и обеспечивает выбор надёжного (безопасного) варианта организации электроэнергетических объектов, функционирующих в условиях риска и неопределенности, для заданного критерия оценки.

Выбор одной из моделей определяется структурной сложностью исследуемого объекта, числом его терминальных вершин и заданием типа элементов (элементы-вершины или элементы ребра) исследуемой электроэнергетической системы. Параметризованные модели в составе инструментария расчёта надёжности электроэнергетических систем (рисунок 1) ориентированы на выявление вероятностных предельных значений надёжности структурных элементов объектов, приводящих к авариям на уровне всей системы.

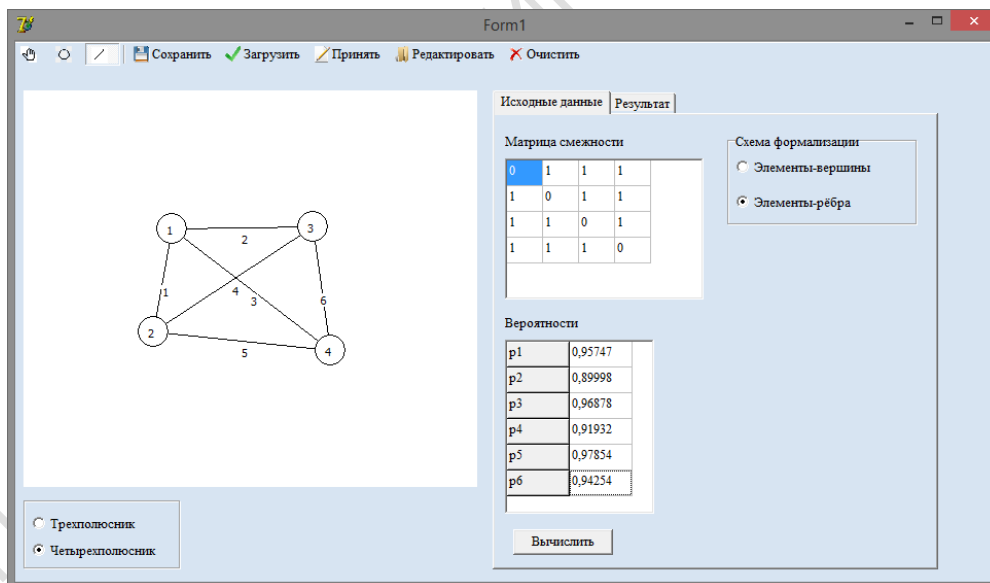


Рисунок 1 – Интерфейс программного средства автоматизации расчёта надёжности электроэнергетических систем

**Пример расчёта надёжности фрагмента электроэнергетической системы районного центра.** На рисунке 1 представлен фрагмент электроэнергетической сети районного центра (рисунок 2). А на рисунке 3 фрагмент системы представлен в виде графа  $G(N, K)$ , где  $N = \{N_v\}, v = \overline{1,9}$ ,  $K = \{K_i\}, i = \overline{1,10}$ . Система может быть формализована в виде структуры-трёхполюсника и структуры-четырёхполюсника. В качестве терминальных вершин выступают  $N_1, N_2 \in N$  (источники электроэнергии) и два выхода  $N_3, N_4 \in N$  (потребители электроэнергии).

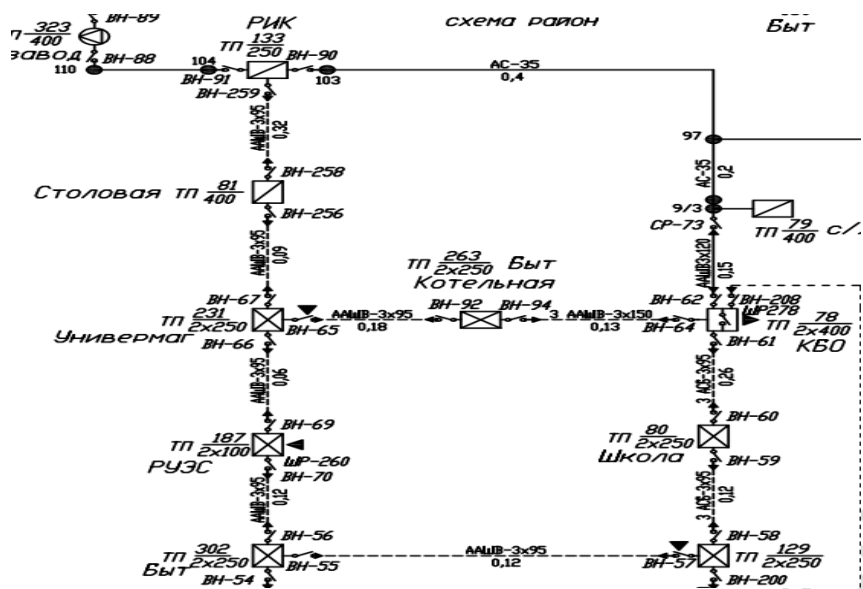


Рисунок 2 – Схема фрагмента электроэнергетической сети

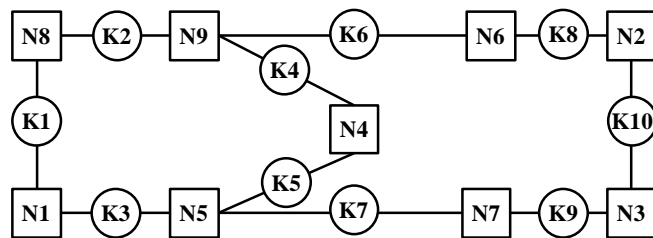


Рисунок 3 – Граф модели фрагмента электроэнергетической сети

В виду того, что представленная модель электроэнергетической системы является примером, позволяющим продемонстрировать возможности разработанного математического аппарата, исходные данные (значения векторов (1)) были выбраны случайным образом в рабочей точке области параметров элементов, выделенных в процессе формализации объекта исследования (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Показатели надежности вершин графа модели электроэнергетической системы

Элемент	Надежность	Элемент	Надежность	Элемент	Надежность
N1	0,8730	N4	0,8985	N7	0,9000
N2	0,8685	N5	0,8970	N8	0,8880
N3	0,8880	N6	0,8745	N9	0,8685

В таблице 2 приведены показатели надежности ребер графа модели электроэнергетической системы, на основе данных из таблицы 1, для оценки надежности электроэнергетической системы по элементам-ребрам.

Таблица 2 – Показатели надежности ребер графа модели электроэнергетической системы

Элемент	Надежность	Элемент	Надежность
K1	0,8625	K6	0,8625
K2	0,8910	K7	0,8625
K3	0,8625	K8	0,8625
K4	0,8625	K9	0,8625
K5	0,8625	K10	0,8625

В результате модельных экспериментов были получены следующие вероятностные оценки надежности организации электроэнергетической системы (таблицы 3, 4), формализованной в виде структуры-трёхполюсника.

Таблица 3 – Вероятностные оценки результирующих состояний графа модели электроэнергетической системы на основе параметров надёжности ее ребер, формализованной в виде структуры-трехполосника

Состояния системы	Вероятностные оценки
Состояние S1	6,7579689588E-06
Состояние S2	2,73913492942E-5
Состояние S3	1,68285224562E-5
Состояние S4	0,030609456390761
Состояние S5	0,96933956576853

Таблица 4 – Вероятностные оценки результирующих состояний графа модели электроэнергетической системы на основе параметров надёжности ее вершин, формализованной в виде структуры-трехполосника

Состояния системы	Вероятностные оценки
Состояние S1	4,23908958435058E-5
Состояние S2	0,0002659065284729
Состояние S3	0,00246567871856689
Состояние S4	0,00814756166077
Состояние S5	0,98907846219635

Имея высокие показатели надёжности элементов электроэнергетической сети, наибольшую вероятность имеет последнее состояние системы S5, описывающее ситуацию, когда все три терминальные вершины соединены. Среди остальных вероятностных оценок можно выделить S4. Остальные состояния электроэнергетической системы маловероятны. Результаты расчёта оценок надёжности при формализации фрагмента электроэнергетической системы в виде системы-четырёхполосника представлены на рисунках 4 и 5, соответственно для схем формализации «элементы-рёбра» и «элементы-вершины».

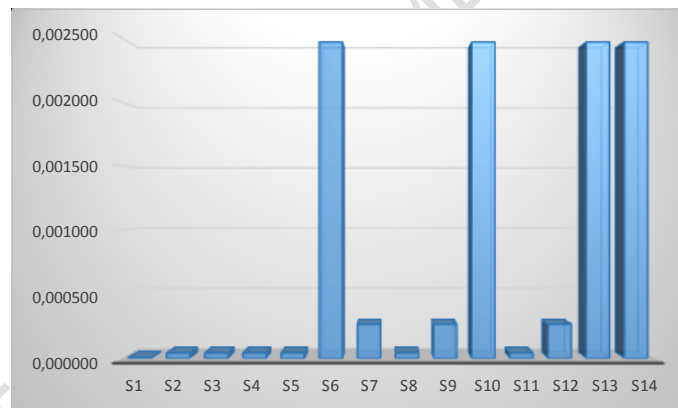


Рисунок 4 – Вероятности результирующих состояний надёжности (S1–S14) для схемы формализации «элементы-вершины»

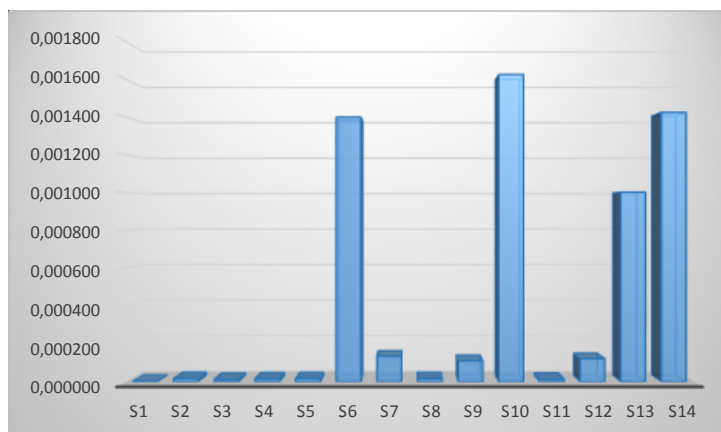


Рисунок 5 – Вероятности результирующих состояний надёжности (S1–S14) для схемы формализации «элементы-рёбра»

В обоих случаях для заданных исходных данных наибольшую вероятность имеет последнее состояние системы S15, описывающее ситуацию, когда 4-е терминальные вершины соединены.

Представленные данные свидетельствуют о том, что общая структура исследуемого фрагмента электроэнергетической системы, функционирующей в условиях риска и неопределенности, указанного района, с инженерной точки зрения имеет надежную и безопасную структуру, а так же обеспечивает бесперебойной подачей электроэнергии всех потребителей.

**Заключение.** Для оценки вероятностных характеристик надежности многоэлементных электроэнергетических систем, элементами которых являются трансформаторные подстанции; точки поступления и потребления электроэнергии; места сопряжения с внешними линиями электропередач; переключатели, определяющие места возможных разъединений в электроэнергетической сети, линии связи и др., в ряде случаев удобно использовать методику расчёта надёжности систем (n-полюсников), имеющих множество входов и выходов, разработанную в рамках вероятностно-алгебраического подхода и позволяющую оценить вероятностные характеристики показателей надежности системы по вероятностным характеристикам показателей надежности её элементов. Она обеспечивает получение точных вероятностных оценок характеристик исследуемого показателя надёжности системы, представляющих собой вектора вероятностей результирующих состояний систем для различных сочетаний заданных входов и выходов. Программное средство, автоматизирующее расчёты, представляет собой инструментарий, имеющий удобный графический интерфейс создания моделей и реализующий алгоритмы, которые позволяют сформировать оценки надежности функционирования вероятностных моделей электроэнергетических систем. Универсальность алгоритмов заключается в возможности однотипного описания характеристик элементов и системы, в универсальности производимых расчётов для различных схем формализации, в возможности одномоментного получения вероятностных характеристик надёжности всех элементов и системы в целом за один шаг моделирования.

### Литература

1. Рябинин, И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. – 276 с.
2. Можаяев, А.С. Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем / А.С. Можаяев // Труды третьей Международной научной школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска (МА БР-2003)», август 20–23, 2003 г. – СПб., 2003. – 517 с.
3. Сукач, Е.И. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е.И. Сукач. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.
4. Демиденко, О.М. Анализ надёжности электроэнергетических систем на основе вероятностно-алгебраического моделирования / О.М. Демиденко, Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская, Ю.В. Жердецкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (13). – С. 87–94.
5. Бужан, М.А. Вероятностно-алгебраическое моделирование технологических систем производства с элементами потенциальной опасности / Е.И. Сукач, Ю.В. Жердецкий, М.А. Бужан // Десятая международная научно-практическая конференция «Математическое и имитационное моделирование систем. МОДС'2015», 23–27 июня 2015 г. – Киев-Жукин, 2015. – С. 198–202.