

УДК 519.876.5:62-192

## АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.М. Демиденко, Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская, Ю.В. Жердецкий

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь*

## THE RELIABILITY ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS BASED ON THE PROBABILISTIC-ALGEBRAIC SIMULATION

O.M. Demidenko, E.I. Sukach, D.V. Ratobylskaya, Y.V. Zherdetsky

*F. Scorina Gomel State University, Gomel, Belarus*

Предлагается применение аппарата вероятностно-алгебраического моделирования для принятия решений при управлении электроэнергетическими системами. Излагается методика оценки вероятностных характеристик надёжности электросетевых структур, включающих множество элементов с вероятностными параметрами надёжности.

**Ключевые слова:** сетевая надёжность, вероятностные оценки надёжности, электроэнергетическая система.

The application of probabilistic-algebraic simulation is proposed to use in the control of the electro-power systems. The technique estimates the probabilistic characteristics of the reliability of the power grid structures including many elements with probabilistic reliability parameters.

**Keywords:** structurally-difficult system, network reliability, power systems.

### **Введение**

Электроэнергетические системы по ряду признаков можно отнести к классу многоэлементных сложных систем графовой структуры. Надёжность их функционирования во многом определяется надёжностью работы их элементов, (оборудования, линий связи), которым при графической интерпретации соответствуют вершины графа или его рёбра. Элементы по-разному влияют на работу сети в целом и своевременное управление их состоянием позволяет организовать устойчивое функционирование всей исследуемой системы.

Такое управление может быть реализовано по циклической схеме, основным звеном которой является вероятностное моделирование, гарантирующее оперативное получение целой линейки результатов при изменении исходных данных моделирования. При этом любой из последовательных этапов схемы управления, включающих уточнение цели и условий проведения моделирования, корректировку модели с учётом предпочтений лица принимающего решение, анализ полученных результатов, может повторяться до тех пор, пока не будет найдено лучшее решение, удовлетворяющее критерию поиска. Существенную роль при этом играет выбор инструмента, используемого при моделировании.

Известные расчётные методы [1], [2], решающие задачи оценки надёжности сетевых структур, применимы при определённых ограничениях. Как правило, не учитывается нелинейность изменений, происходящих с элементами,

которые в процессе взаимодействия могут решающим образом изменять состояние сопряжённых с ними элементов и всей системы в целом, анализируется два состояния элементов и всей системы (работа/отказ), отсутствует возможность рассмотрения множества терминальных вершин исследуемого электросетевого объекта. Очевидно, что такие предположения значительно сокращают возможности методов при решении практических задач анализа надёжности сетевых объектов.

Имитационное моделирование, основанное на использовании метода Монте-Карло, при решении задач анализа надёжности сетевых структур в ряде случаев позволяет получить приближённые оценки результирующих вероятностных характеристик либо определить возможные границы надёжности исследуемых объектов [3].

В статье излагается подход к анализу надёжности электросетевых объектов с использованием аппарата вероятностно-алгебраического моделирования. Универсальность подхода заключается в возможности его применения для расчёта характеристик надёжности электроэнергетических систем различного уровня сложности. В результате реализации одного из методов вероятностно-алгебраического моделирования (метода расчёта надёжности простой графовой структуры [4]; методики расчёта надёжности структурно-сложной системы со многими состояниями [5]; методики расчёта надёжности системы-четырёхполюсника [6] (системы-трёхполюсника [7]); метода расчёта надёжности

структурно-сложной системы большой размерности [8]), выбор которого обусловлен числом элементов объекта и видом связей между ними, определяющим в совокупности структурную сложность исследуемого объекта, формируется вектор вероятностей состояний надёжности объекта в случае статического моделирования либо набор векторов при рассмотрении объекта в динамике. Сформированные вектора характеризуют исследуемый показатель надёжности для различного числа и сочетаний терминальных вершин, учитывают динамику происходящих процессов взаимодействия структурных элементов исследуемого объекта, свидетельствуют о доле отказов системы, обусловленных разными причинами, в общей оценке вероятности отказа.

Применение методологии вероятностно-алгебраического моделирования, имеющей теоретическое обоснование в виде стохастических алгебр [9] и средства автоматизации в виде системы PALS [10], позволяет последовательно решить типовые задачи моделирования в ходе анализа электроэнергетических систем, результаты которого могут служить основой принятия решения при управлении объектами различной структурной сложности.

### **1 Формализация объекта исследования**

Объектом исследования являются существующие и проектируемые электроэнергетические системы, которые требуют проведения дополнительных исследований при вводе их в эксплуатацию.

В результате изучения класса электросетевых объектов с целью их моделирования были выделены его особенности:

- наличие множества потенциально ненадёжных элементов, к которым можно отнести как физические устройства, так и линии связи;
- существование множества режимов функционирования исследуемых электроэнергетических систем;
- потенциальная возможность возникновения отказов элементов, обусловленных различными причинами, определяющими состояния элементов;
- наличие восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов;
- необходимость учёта последовательности отключения исправных элементов в результате выведения из состава сети отказавших элементов.

Исследуемые объекты, даже в пределах ограниченного региона, включают большое число неоднородных по надёжности элементов, в качестве которых могут выступать как оборудование, имеющее вероятностные параметры надёжности, так и линии связи, которые подвержены износу и случайному воздействию факторов внешней среды. Они представляются в виде детальных схем, описывающих физическое расположение

структурных элементов электросетевых объектов, выполненных согласно установленным стандартам [11]. Упрощение подобных схем позволяет интерпретировать объекты в виде графов, в которых физическим элементам с вероятностными характеристиками надёжности ставятся в соответствие вершины или рёбра.

Графовая структура в силу перечисленных особенностей объекта исследования позволяет применить для исследования характеристик надёжности объекта аппарат вероятностно-алгебраического моделирования.

В качестве исходных данных при оценке надёжности электросетевых объектов используются вероятностные значения надёжности состояний отдельных узлов и линий связи, определяющих вероятность надёжного функционирования либо отказа с учётом его причины, вычисленные с учетом влияния случайных факторов за оговоренный период времени.

Для выделенных в процессе декомпозиции элементов системы с использованием накопленных статистических данных определяются значения вероятностей каждого из состояний (таблица 1.1). Состояние  $S_0$  характеризует работу элемента, а все остальные определяют состояния отказа, возникшие вследствие ряда различных причин.

В самом общем случае структурными элементами системы могут быть и единицы оборудования, и линии связи. В этом случае число состояний структурных элементов исследуемого объекта увеличивается до 13, вероятности которых задаются векторами.

Для решения менее общих задач могут быть использованы как схема формализации «элементы-рёбра», так и схема формализации «элементы-вершины» [12].

### **2 Методика расчёта вероятностных характеристик надёжности электроэнергетических систем по вероятностным характеристикам надёжности их элементов**

Применение методологии вероятностно-алгебраического моделирования для выбора решения при управлении электроэнергетическими системами достигается последовательностью следующих шагов.

*Шаг 1. Представление варианта схемы электроэнергетической системы в виде графовой структуры с выделением элементов, имеющих вероятностный характер функционирования. При формировании графа  $G(N, K)$  отмечаются элементы, определяющие места:*

- поступления электроэнергии;
- трансформаторных подстанций (ТПС);
- потребителей электроэнергии;
- места сопряжения с внешними линиями электропередач (ЛЭП);

Таблица 1.1 – Описание состояний элементов электроэнергетической системы

Причины отказов элементов электроэнергетической системы	Тип элемента	Номер состояния элемента	Значение вероятности
Полностью работоспособен	любой	$S_0$	$P(S_0)$
Повреждение трансформаторной подстанции (ТПС)	узел	$S_1$	$P(S_1)$
Повреждение опоры воздушной линии (ВЛ) (6–10 Кв)	линия	$S_2$	$P(S_2)$
Повреждение концевой муфты кабельной линии (КЛ)	линия	$S_3$	$P(S_3)$
Отключение от внешних стихийных воздействий и грозовой деятельности	любой	$S_4$	$P(S_4)$
Перекрытие предохранителя (ПК) проходного изолятора (ПНБ)	узел	$S_5$	$P(S_5)$
Механическое повреждение КЛ, опоры ВЛ сторонними лицами	линия	$S_6$	$P(S_6)$
Завал дерева на провода ВЛ, перекрытие на технику	линия	$S_7$	$P(S_7)$
Пробой изолятора ВЛ, обрыв вязки, провода, шлейфа	линия	$S_8$	$P(S_8)$
Повреждение КЛ	линия	$S_9$	$P(S_9)$
Отключение питающих ВСЛ и ПС, 35–750Кв	узел	$S_{10}$	$P(S_{10})$
Причина не установлена	любой	$S_{11}$	$P(S_{11})$
Падение дерева, перекрытие на поросль	линия	$S_{12}$	$P(S_{12})$

– переключателей, определяющих места возможных разъединений в электроэнергетической сети.

Построение графа должно отражать условия и параметры взаимосвязей элементов  $h$ -го варианта организации электроэнергетической системы на выбранном уровне детализации.

*Шаг 2. Подготовка исходной информации* для проведения вероятностно-алгебраического моделирования  $h$ -го варианта электросетевого объекта в виде трёх наборов данных.

Первый набор данных определяет структуру объекта и включает описание:

– матрицы смежности графа  $G(N, K)$

$$G = \|g_{ij}\|, i, j = \overline{1, m};$$

- числа линий связи ( $M1$ );
- численного состава оборудования ( $M2$ );
- числа входов/выходов ( $N1$ );
- списка входов/выходов ( $N2$ );

– типа элементов с вероятностными параметрами надёжности (линии связи/оборудование);

– типа линий связи (ВЛ-воздушные линии, КЛ-кабельные линии).

Второй набор данных содержит численные данные о возможных  $n$  отказах (с классификацией их по типам в зависимости от причины повреждения)  $i$ -ых выделенных элементов электроэнергетической системы. В результате чего определяется число состояний  $S = \{S_j\}, j = \overline{0, n}$  элементов и рассчитываются значения векторов вероятностей состояний надёжности выделенных элементов:

$$P^i = (p_0^i, p_1^i, \dots, p_n^i), \sum_{j=0}^n p_j^i = 1, i = \overline{1, m} \quad (2.1)$$

Первые элементы векторов (2.1)  $p_0^i$  определяют вероятность работоспособности  $i$ -ых элементов,

остальные указывают на вероятности отказов  $n$ -ых типов, соответствующих  $i$ -ых элементов. Таким образом формируются функции плотностей вероятностей состояний надёжности выделенных элементов  $f_i(\xi)$ .

Третий набор данных предоставляет дополнительную информацию, необходимую для рассмотрения процесса функционирования исследуемой электроэнергетической системы в динамике. Для каждого  $i$ -го элемента системы, для которого учитывается возможность отказа, формируются функции плотностей вероятностей значений времени:

– безотказного функционирования элементов  $P_{i1}(\tau_{BO})$ ;

– восстановления работоспособности отказавших и сопряжённых с ними элементов  $P_{i2}(\tau_{BO})$ .

Перечисленные данные служат исходной информацией для построения совокупности вероятностных моделей, отображающих временные изменения состояний надёжности элементов исследуемой электросети (параметрических функций, марковских дискретных моделей). Результатом эксплуатации этих моделей являются вектора вида:

$$P^{it} = (p_0^{it}, p_1^{it}, \dots, p_n^{it}), \sum_{j=0}^n p_j^{it} = 1, i = \overline{1, m}, t = \overline{1, T}, \quad (2.2)$$

которые являются исходными при проведении динамического вероятностно-алгебраического моделирования.

Кроме этого, указываются управляющие правила, срабатывающие в процессе моделирования. Они формируются в соответствии с экспертными оценками, которые определяют направленные управляющих воздействий ( $U$ ), реализуемых

между итерациями моделирования ( $t$ ). Правила указывают как на изменение вероятностных параметров надёжности структурных элементов модели, так и на структурные изменения графа модели. В последнем случае корректирующие воздействия реализуют процесс адаптации графовой структуры модели под текущие изменения параметров надёжности элементов и всей системы.

**Шаг 3.** Построение вероятностно-алгебраической модели, описывающей процесс функционирования электроэнергетической системы путём визуализации графовой структуры  $h$ -го варианта организации системы, учитывающей состав элементов, их физическое расположение и типы соединения элементов, определяющих функции их взаимодействия.

**Шаг 4.** Инициализация вероятностно-алгебраической модели и ввод исходной информации, представленной в виде трёх наборов данных, с использованием оконного интерфейса программного обеспечения.

**Шаг 5.** Выбор вида моделирования: статическое; динамическое. Для динамического моделирования предполагается задание временного интервала моделирования (числа итераций  $T$ ).

**Шаг 6.** Реализация исходного варианта вероятностно-алгебраического моделирования для указанных данных с визуализацией и анализом результатов моделирования.

Результат моделирования  $h$ -го варианта вероятностно-алгебраической модели представляется в виде вектора вероятностей надёжности системы, имеющего вид:

$$P^s = (p_0^s, p_1^s, \dots, p_n^s), \quad \sum_{j=0}^n p_j^s = 1, \quad (2.3)$$

где  $p_j^s$  – вероятности состояний системы  $S = \{S_j\}$ ,  $j = \overline{0, n}$ , характеризующих либо работу системы, либо отказ одного из типов. Таким образом формируется функция плотности вероятности состояний надёжности исследуемой системы  $f(\xi)$  в выбранный момент времени.

В случае динамического вероятностно-алгебраического моделирования откликами являются вектора вероятностей состояний, характеризующие изменения надёжности  $h$ -го варианта организации системы во времени:

$$P^{st} = (p_0^{st}, p_1^{st}, \dots, p_n^{st}), \quad \sum_{j=0}^n p_j^{st} = 1, t = \overline{1, T}. \quad (2.4)$$

Кроме этого каждому вектору вероятностей (2.4), характеризующему надёжность системы на очередной итерации, соответствует вариант структурной организации системы  $G_{ht}$ .

### 3 Применение методологии вероятностно-алгебраического моделирования для решения типовых задач

**Задача 1.** Анализ надёжности  $h$ -го варианта организации электроэнергетической системы.

Рассматривается  $h$ -ый вариант организации электроэнергетической системы, представленный в виде графа  $G_h$ , в котором заданы элементы (линии связи, оборудование) с вероятностными параметрами надёжности (2.1).

В результате реализации одного из методов вероятностно-алгебраического моделирования формируется вектор вероятностей вида (2.3) в случае статического моделирования.

Значения вектора (2.3) определяют вероятность надёжной работы электросетевого объекта ( $p_0^s$ ), указывают на минимальное значение вероятности отказа  $p_{\min} = p_j^s$  и его тип, определяющий  $j$ -ое состояние системы  $S_j$ ; максимальное значение вероятности отказа  $p_{\max} = p_k^s$  и его тип, определяющий  $k$ -ое состояние системы  $S_k$ . По результатам моделирования вычисляются математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение вероятностных значений отказов ( $m, \sigma$ ) для исследуемого  $h$ -го варианта организации системы, указывающие на наиболее вероятный тип отказа и разброс случайной величины, определяющий тип отказа.

В случае рассмотрения системы в динамике вычисляются вектора вида (2.4) и рассчитываются аналогичные статистические характеристики.

Сформированные вектора вероятностей и статистические характеристики их изменения отображаются на графике и позволяют прогнозировать изменение надёжности системы при изменении надёжности составляющих её структурных элементов.

**Задача 2.** Оценка изменения надёжности организации электроэнергетических объектов в результате изменения параметров надёжности их структурных элементов.

В самом общем случае элементами электросетевых объектов являются одновременно линии связи и оборудование, которые подвержены отказам в ходе их эксплуатации. Очевидно, что при замене или реконструкции структурных элементов электросетей, уровень надёжности объектов повышается, что в свою очередь сказывается на надёжности и безопасности работы всей системы и её отдельных подсистем.

Для решения задачи проводится два модельных эксперимента. Первый эксперимент предполагает расчёт надёжности  $h1$ -го варианта организации объекта исследования, в котором оценивается надёжность системы при условии существующих параметров надёжности её структурных элементов (например, при наличии воздушных линий передачи электроэнергии). Результатом расчёта является вектор  $P_{h1}$  вида (2.3), для которого вычисляются математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение ( $m_{h1}, \sigma_{h1}$ ). Второй эксперимент проводится для обновлённых параметров надёжности структурных

элементов (например, при замене воздушных линий передачи на кабельные), которые в целом обеспечивают организацию работы  $h2$ -го варианта. Результатом расчёта является вектор  $P_{h2}$  вида (2.3), для которого вычисляются математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение ( $mh2, \sigma h2$ ).

Для каждого из вариантов рассчитывается обобщённый показатель эффективности организации электроэнергетической системы ( $W_h$ ), значение которого должно быть максимальным. Он имеет следующий вид:

$$W_h = \delta_{1h} \cdot P_h + \delta_{2h} \cdot \frac{1}{Q_h}, \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=1}^2 \delta_i = 1,$$

где  $0 \leq \delta_{ih} \leq 1$  переменные, которые являются весовыми коэффициентами важности значения вероятности работоспособности  $h$ -го варианта системы ( $\delta_{1h}$ ) и стоимости работ по техническому обслуживанию  $h$ -го варианта организации исследуемой системы ( $\delta_{2h}$ ),  $P_h$  – вероятность надёжного функционирования  $h$ -го варианта, а  $Q_h$  – материальные затраты на техническое обслуживание и ликвидацию последствий отказов  $h$ -го варианта системы.

Сравнение полученных показателей эффективности обеспечивает математически обоснованный выбор варианта организации исследуемого объекта.

При этом рассчитывается выигрыш по эффективности при переходе от  $h1$ -го варианта организации системы к  $h2$ -му варианту, а именно:

$$W = W_{h2} - W_{h1}; \quad (3.2)$$

оценивается выигрыш по надёжности, при переходе от первого варианта структурной организации ко второму, а именно:

$$P = P_{h2} - P_{h1}; \quad (3.3)$$

определяется разность в стоимости технического обслуживания двух вариантов, включая материальные затраты на модификацию первого варианта:

$$Q = Q_{h2} - Q_{h1}. \quad (3.4)$$

Следует учитывать, что материальные затраты на ликвидацию последствий отказов исходного варианта объекта возрастают по мере роста суммарной вероятности отказов. Обновление же структурных элементов системы, требующее материальных затрат на ввод в эксплуатацию нового оборудования и линий связи позволит сэкономить расходы на обслуживание и поддержание на заданном уровне надёжности (безопасности) электросетевого объекта.

*Задача 3. Сравнительный анализ надёжности вариантов структурной организации электроэнергетических объектов.*

Аналогично задаче 2 проводится два модельных эксперимента. Первый эксперимент

предполагает расчёт надёжности  $h1$ -го варианта структурной организации объекта при заданном составе элементов и их параметров надёжности. Второй эксперимент проводится для  $h2$ -го варианта структурной организации объекта. Результатом расчёта является вектора  $P_{h1}$  и  $P_{h2}$  вида (2.3). Для каждого из вариантов рассчитывается интегральный показатель эффективности организации системы (3.1), определяющий выбор решения по изменению структуры объекта.

*Задача 4. Выявление «узких мест» в электроэнергетической системе для  $h$ -го варианта структурной организации.*

На основе экспертных оценок специалистов-предметников для исследуемого  $h$ -го варианта электроэнергетического объекта составляется список  $l$ -ых элементов  $L$ , являющихся потенциальными «узкими местами», снижение надёжности которых решающим образом сказывается на надёжности всей электроэнергетической системы.

Для каждого  $l$ -го элемента из списка  $L$  потенциальных «узких мест» проводится серия модельных экспериментов, предполагающих расчёт надёжности  $h$ -го варианта структурной организации объекта при неизменных текущих параметрах надёжности всех элементов, кроме параметров оцениваемого  $l$ -го элемента. Вероятность надёжной работы  $l$ -го элемента ( $p_0^l$ ) варьируется с выбранным шагом  $hr$  в пределах от текущего ( $p_0^{actual}$ ) до минимального допустимого значения ( $p_0^{min}$ ). Как и в задаче 2, для проведенной серии экспериментов рассчитываются значения обобщённого показателя эффективности (3.1) при  $\delta_2 = 0$ . В том случае, если значение обобщённого показателя снижается на  $D\%$  ( $D \geq 70$ ), считается, что  $l$ -ый элемент является выявленным «узким местом».

Таким образом формируется список  $L1$  «узких мест», требующих организационных и технических мер по повышению их надёжности. Элементы списка  $L2 = L - L1$  не оказывают существенного влияния на надёжность исследуемого объекта и их эксплуатационные параметры можно оставить без изменения.

*Задача 5. Сравнительный анализ мер по повышению уровня надёжности электроэнергетических объектов за счёт ликвидации «узких мест».*

Устранение «узких мест» в электроэнергетическом объекте возможно двумя способами: путём повышения надёжности контрольных элементов; путём изменения структурной организации исследуемого объекта (использование резервирования энергоузлов без ограничения максимальной нагрузки).

При первом способе для  $l$ -ых элементов из списка  $L1$  «узких мест», выявленных при решении

задачи 4, требующих мер по повышению их надёжности, проводится серия модельных экспериментов, предполагающих расчёт надёжности  $h$ -го варианта структурной организации объекта при неизменных текущих параметрах надёжности всех элементов, кроме параметров оцениваемого  $l$ -го элемента. Вероятность надёжной работы  $l$ -го элемента ( $p_0^l$ ) варьируется с выбранным шагом  $hr$  в пределах от текущего ( $p_0^{l \text{ actual}}$ ) до максимально возможного значения ( $p_0^{l \text{ max}}$ ). Для проведенной серии экспериментов рассчитываются значения обобщённого показателя эффективности (3.1). Определяются номер эксперимента и параметры надёжности контрольного элемента, дающие максимальный рост обобщённого показателя.

Второй способ реализуется путём изменения структурной организации исследуемой системы при неизменных параметрах надёжности структурных элементов. Для контрольного элемента рассматриваются различные  $v$ -варианты резервирования (холодного, горячего, схемы мажоритарной логики). Для выбранных вариантов проводятся модельные эксперименты, результатом которых являются вектора  $P_{h1}, P_{h2}, \dots, P_{hv}$  вида (2.3). Для каждого из  $v$ -вариантов рассчитывается интегральный показатель эффективности организации системы (3.1). Максимальное значение показателя эффективности определяет искомый  $v$ -вариант организации электроэнергетической системы, обеспечивающий высокий уровень надёжности при ограниченной стоимости реконструкции объекта.

*Задача 6. Сравнительный анализ надёжности  $k$ -ых вариантов организации трансформаторной подстанции.*

Способ формализации энергосетей в виде графовых иерархических структур позволяет рассчитать надёжность организации электрической части подстанций и оценить степень влияния их надёжности на надёжность организации сети в целом с учетом норм технологического проектирования, определяющих основные требования по проектированию электроэнергетической сети района (электрической части подстанций переменного тока энергосистем Республики Беларусь с высшим напряжением 35–750 кВ) [11].

Сравнение осуществляется на основе сопоставления значений обобщённых откликов (3.1), полученных для множества моделей  $k$ -ых вариантов организации исследуемой подстанции, и анализа состава исходных структурных элементов и их параметров надёжности, отвечающих требованиям по проектированию трансформаторных подстанций.

Формирование вариантов организации трансформаторных подстанций предполагает рассмотрение различных схем, включающих меры, как

по повышению надёжности элементов, так и изменению структуры объектов.

*Задача 7. Динамическое моделирование электроэнергетической системы, функционирующей в условиях накопления повреждений структурными элементами (линиями связи, оборудованием).*

Задача решается путём реализации многошаговой итерационной процедуры моделирования, включающей статическое вероятностно-алгебраическое моделирование на каждой итерации, и динамическое управление, позволяющее учесть при моделировании корреляционную зависимость элементов электроэнергетических систем.

Результатом моделирования является множество векторов вероятностей (2.4) и совокупность вариантов изменения структуры  $\{G_{ht}\}$ , позволяющих спланировать меры по управлению и адаптации исследуемого электроэнергетического объекта на предстоящий период эксплуатации с учётом изменений вероятностных характеристик надёжности, как отдельных элементов системы, так и групп элементов, образующих энергоузлы исследуемого объекта.

При этом установлено, что возрастание числа отказов элементов электроэнергетических систем и ликвидация последствий отказов оборудования и повреждений линий связи снижает показатели надёжности организации сетевого объекта в целом и увеличивает стоимость функционирования объекта по отношению к запланированным величинам. Это сказывается на обобщённых показателях эффективности (3.1), рассчитанных на каждом шаге моделирования. Переход к моделированию с управлением позволит избежать снижения обобщённого показателя эффективности и обеспечить функционирование объекта на приемлемом уровне.

*Задача 8. Подбор параметров надёжности структурных элементов, обеспечивающих заданный уровень надёжности (безопасности) электроэнергетической системы.*

Вероятностно-алгебраический аппарат позволяет решать не только прямые задачи 1–7, но и обратные. С этой целью задаётся вектор вероятностей (2.3) надёжности функционирования исследуемой электроэнергетической системы и рассчитываются вектора вероятностей структурных элементов вида (2.1). Значения полученных векторов позволяют разработать конкретные варианты технической реализации исследуемых энергообъектов.

*Задача 9. Сравнительный анализ организации электроэнергетических систем со множеством входов/выходов.*

Все задачи 1–8, планируемые для исследуемой электроэнергетической системы, могут быть решены как для двух терминальных вершин, определяющих поступление электроэнергии и её потребление, так и для случая трёх или четырёх

терминальных вершин, каждая из которых может соответствовать месту поступления и потребления энергии. Итогом выбранной схемы формализации является фрагмент графа, имеющий набор терминальных вершин  $i = 3, 4$ . Сама система в таком случае интерпретируется как система-трёхполюсник или система-четырёхполюсник, для расчёта надёжности которой может быть применена универсальная методика, реализованная в рамках вероятностно-алгебраической методологии.

Для исследуемой системы рассматриваются альтернативные  $v$ -варианты, отличающиеся числом и местом расположения терминальных вершин, при неизменном составе элементов, их структурной организации и параметрах надёжности. Результаты моделирования представляются в виде векторов вероятностей вида

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

$$P^s = (p_1^s, p_2^s, \dots, p_{15}^s), \quad \sum_{j=1}^{15} p_j^s = 1, \quad (3.5)$$

соответственно, для вариантов-трёхполюсников и вариантов-четырёхполюсников. Анализ вероятностей 5 состояний для вариантов-трёхполюсников и 15 состояний для вариантов-четырёхполюсников позволяет принять решение о предпочтительности одного из вариантов.

*Задача 10. Оценка надёжности электроэнергетической системы большой размерности.*

Задача решается поэтапно. Вначале граф исследуемой электроэнергетической системы представляется в виде совокупности подструктур  $n$ -полюсников ( $n = 2, 3, 4$ ), выступающих в качестве элементов агрегированных объектов, надёжность которых оценивается путём решения задач 1, 9. Таким образом формируются значения векторов вероятностей (2.3), (3.5) для выделенных подсистем. Далее реализуется метод вероятностно-алгебраического моделирования систем большой размерности, в результате работы которого рассчитываются значения векторов (2.3) и (3.5), но уже для всей системы. С использованием обобщённого показателя (3.1) оценивается эффективность организации исследуемого варианта организации сетевого объекта.

### Заключение

Представленная методология в виде совокупности методов вероятностно-алгебраического моделирования эффективна как при анализе вероятностных характеристик надёжности функционирующих электроэнергетических систем, так и при проектировании новых электросетевых объектов, предполагающих подключение новых линий электропередачи, оценку характеристик надёжности вариантов организации трансформаторных подстанций с целью повышения надёжности и безопасности организации всей системы.

Она позволяет адаптировать исследуемые электросетевые объекты под случайным образом изменяющуюся нагрузку и условия внешней среды, а также оперативно решить следующие задачи, возникающие при управлении электросетевыми объектами:

- анализ надёжности вариантов структурной организации электроэнергетической системы по заданному критерию эффективности;
- оценка изменения надёжности организации электроэнергетических объектов в результате изменения параметров надёжности их элементов;
- выявление «узких мест» в электроэнергетической системе;
- анализ надёжности вариантов организации трансформаторных подстанций;
- расчёт параметров надёжности элементов, обеспечивающих заданный уровень надёжности и безопасности электроэнергетической системы установленной структурной организации;
- сравнительный анализ вариантов внешнего резервирования фидеров электроэнергетической системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Рябинин, И.А.* Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. – 276 с.
2. *Можаев, А.С.* Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем / А.С. Можаев // Труды третьей Международной научной школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска (МА БР – 2003)», 20–23 августа, 2003. – СПб – 517 с.
3. *Демиденко, О.М.* Имитационное моделирование процессов отказов и восстановлений работоспособности оборудования вычислительной системы / И.В. Максимей, О.М. Демиденко, Е.И. Сукач // Реестрация, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2000. – Т. 2, № 1. – С. 33–46.
4. *Сукач, Е.И.* Использование логического моделирования для исследования сложных систем / Е.И. Сукач // Известия Гомельского государственного университета имени Ф.Скорины. – 2004. – № 4 (25). – С. 60–64.
5. *Сукач, Е.И.* Методика расчета показателей надёжности многокомпонентных структурно-сложных систем со многими состояниями / Е.И. Сукач // Информатика. – 2011. – № 3. – С. 13–22.
6. *Сукач, Е.И.* Методика оценки вероятностных характеристик надёжности систем-четырёхполюсников / Е.И. Сукач // Доклады БГУИР. – 2012. – № 7 (69). – С. 71–77.
7. *Сукач, Е.И.* Вероятностная оценка надёжности сетевых структур-трёхполюсников /

Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская, С.Ф. Маслович // Информационные технологии в промышленности (ИТ\*2012): тезисы докладов седьмой Международной научно-технической конференции (30-31 октября 2012 г., Минск). – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – С. 139–140.

8. Сукач, Е.И. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е.И. Сукач; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.

9. Сукач, Е.И. Моделирование вероятностных характеристик сложных систем с использованием стохастических алгебр / Д.В. Ратобильская, В.Н. Кулага, Е.И. Сукач // V Международная конференция-форум «Информационные системы и технологии», Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 16–17 ноября 2009 г. – Минск : А.Н. Варахсин. – 2009. – Ч. 1. – С. 178–181.

10. Система вероятностно-алгебраического моделирования «Probability Algebraic Simulation (PALS)»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 450 / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская. – Минск: НЦИС, 2012. – Заявка № С20120049. – Дата подачи: 25.06.2012.

11. СТП 09110.20.524-12. Инструкция по разработке нормальных схем основной сети РУП-облэнерго, схем электрической сети 35–750 кВ РУП-облэнерго и нормальных схем электрических соединений энергообъектов. – Минск, ГПО «Белэнерго», 2012.– 47 с.

12. Способ формализации объектов графовой структуры с вероятностными параметрами функционирования / Е.И. Сукач [и др.] // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 5 (74). – С. 195–202.

Поступила в редакцию 28.03.14.