

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИХ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

MODEL OF FUNCTIONING OF SMART POWER SUPPLY GRID FOR CONTROL OF THEIR STRUCTURAL STABILITY BY THE MONTE CARLO METHOD

V. Obedkov

Summary. The structure and functioning processes of power supply networks are characterized by a diverse range of elements and a variety of information and energy flows, as well as the need to make decisions under limited time conditions, considering various aspects of the interaction of organizational and technical complexes with the environment, generation facilities and consumers. The article presents an adaptation of the most common method for modeling such systems, based on the integrated use of Monte Carlo statistical modeling technology and graph theory. The simulation approach to the statistical analysis of the structural stability of information chains of smart power supply networks allows, for a given level of the reliability indicator, to estimate the range of change in the output characteristics of the system elements, which does not take the system under consideration out of the state of stability.

Keywords: smart grid, simulation modeling, decision tree, Bernoulli variable.

Объедков Вячеслав Владимирович

Аспирант, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Поволжский институт управления имени П.А. Столыпина, г. Саратов
Ovv862@rambler.ru

Аннотация. Структура и процессы функционирования сетей электроснабжения, характеризуются разнотипной номенклатурой элементов и разнообразием информационно-энергетических потоков, а также необходимостью принятия решений в условиях ограниченного времени с учетом различных аспектов взаимодействия организационно-технических комплексов с окружающей средой, средствами генерации и потребителями. В статье представлена адаптация наиболее распространенного метода моделирования таких систем, основанного на комплексном использовании технологии статистического моделирования Монте-Карло и теории графов. Имитационный подход к статистическому анализу структурной устойчивости информационных цепей интеллектуальных сетей электроснабжения позволяет для заданного уровня показателя достоверности оценить диапазон изменения выходных характеристик элементов системы, который не выводит рассматриваемую систему из состояния устойчивости.

Ключевые слова: интеллектуальные сети электроснабжения, имитационное моделирование, дерево решений, бернуллиева переменная.

Конечная и основополагающая цель внедрения и совершенствования технологий интеллектуальных сетей электроснабжения — обеспечить устойчивое, надежное и эффективное электроснабжение с минимальными потерями энергии [1].

Структура и сложные процессы функционирования сетей электроснабжения, характеризуются разнотипной номенклатурой элементов и разнообразием информационно-энергетических потоков, необходимостью принятия решений в условиях ограниченного времени с учетом различных аспектов взаимодействия организационно-технических комплексов с окружающей средой [2, 3].

Наиболее распространенные методы моделирования таких структурно распределенных систем (рис. 1) основаны на комплексном использовании методов статистического моделирования Монте-Карло и деревьев решений.

В частности, на основе графа функциональных взаимосвязей между характеристиками элементов сети электроснабжения можно строить большие статистические схемы имитационного моделирования процессов управления и контроля, сколь угодно большой размерности.

Как правило, возникает необходимость определения функциональных зависимостей между регулируемыми характеристиками (параметрами процессов) и целевыми характеристиками, описывающими существенные свойства системы и изменяющимися опосредованно при изменении параметров.

Общая модель функциональной зависимости между характеристиками сети электроснабжения представляется в виде [4]:

$$Y = \varphi(X, Z), \quad (1)$$

где X — есть вектор регулируемых характеристик, Y — вектор целевых характеристик, а Z — случайный вектор.

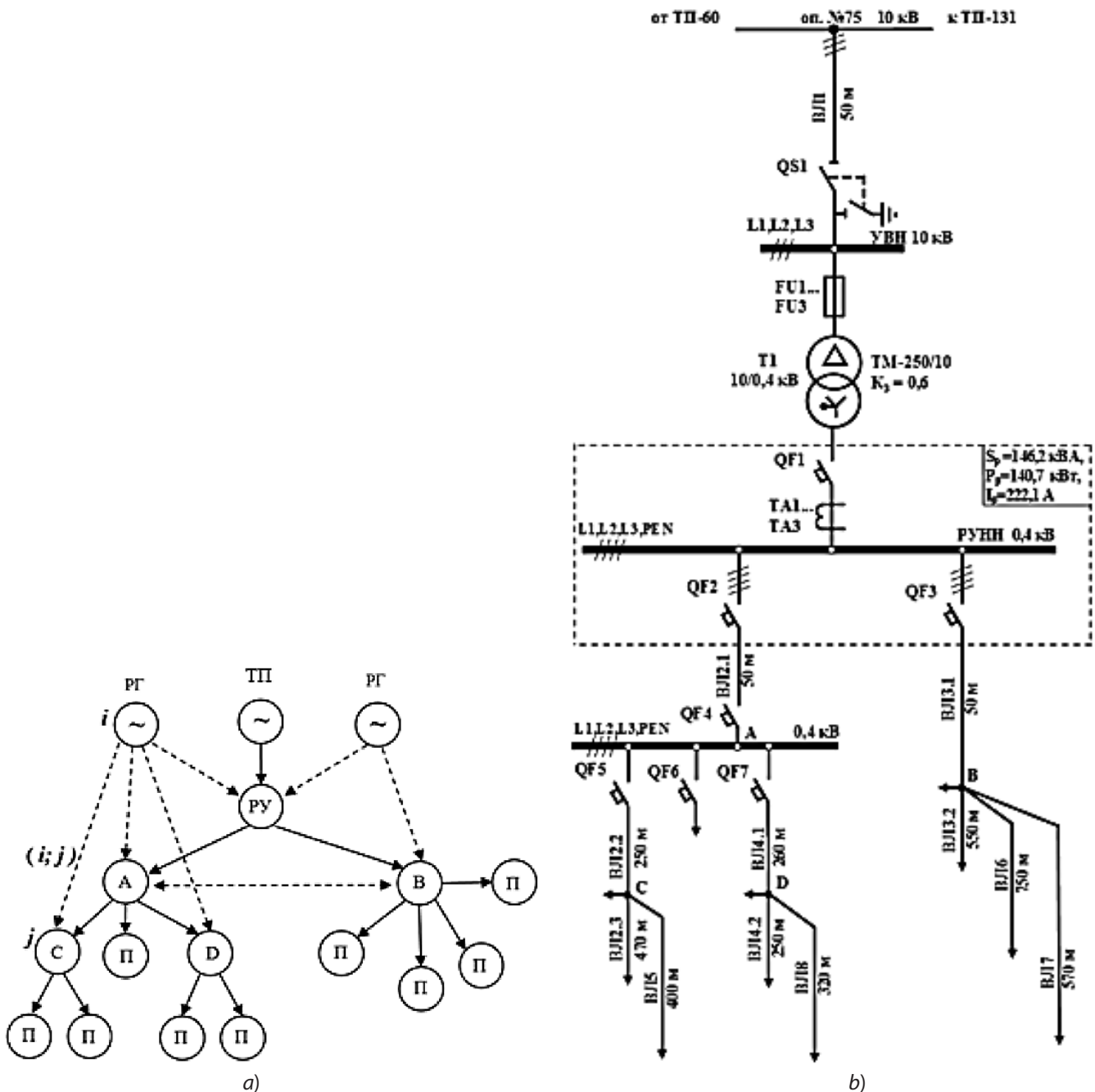


Рис. 1. Варианты построения графа (а) децентрализованной системы электроснабжения (b): i, j — узлы графа; (i, j) — ветвь графа между i -й и j -й вершинами, включающего распределительные устройства (РУ), распределительные пункты (А–Д), источники (ПГ, ТП) и потребители электроэнергии (П)

При определении вероятностных параметров регулируемых характеристик необходимо осуществить выбор среди вероятностных распределений (рис. 2). Данные, управления различными этапами в сфере контроля электросетей, образуют выборку [5]:

$$H = (X_i, Y_i), i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Удачная аналитическая модель на ее основе считается более ценной, чем имитационная, т.к. обладает важ-

ным свойством воспроизводимости на классе объектов (прототипов).

Однако, применительно к сложным и распределенным системам аналитическое упрощение во избежание громоздкости влечет снижение адекватности описания реальных явлений и процессов [6]. В отличие от аналитического, имитационное моделирование формирует новые знания относительно поведения той или иной архитектуры моделируемого оригинала в процессе, как

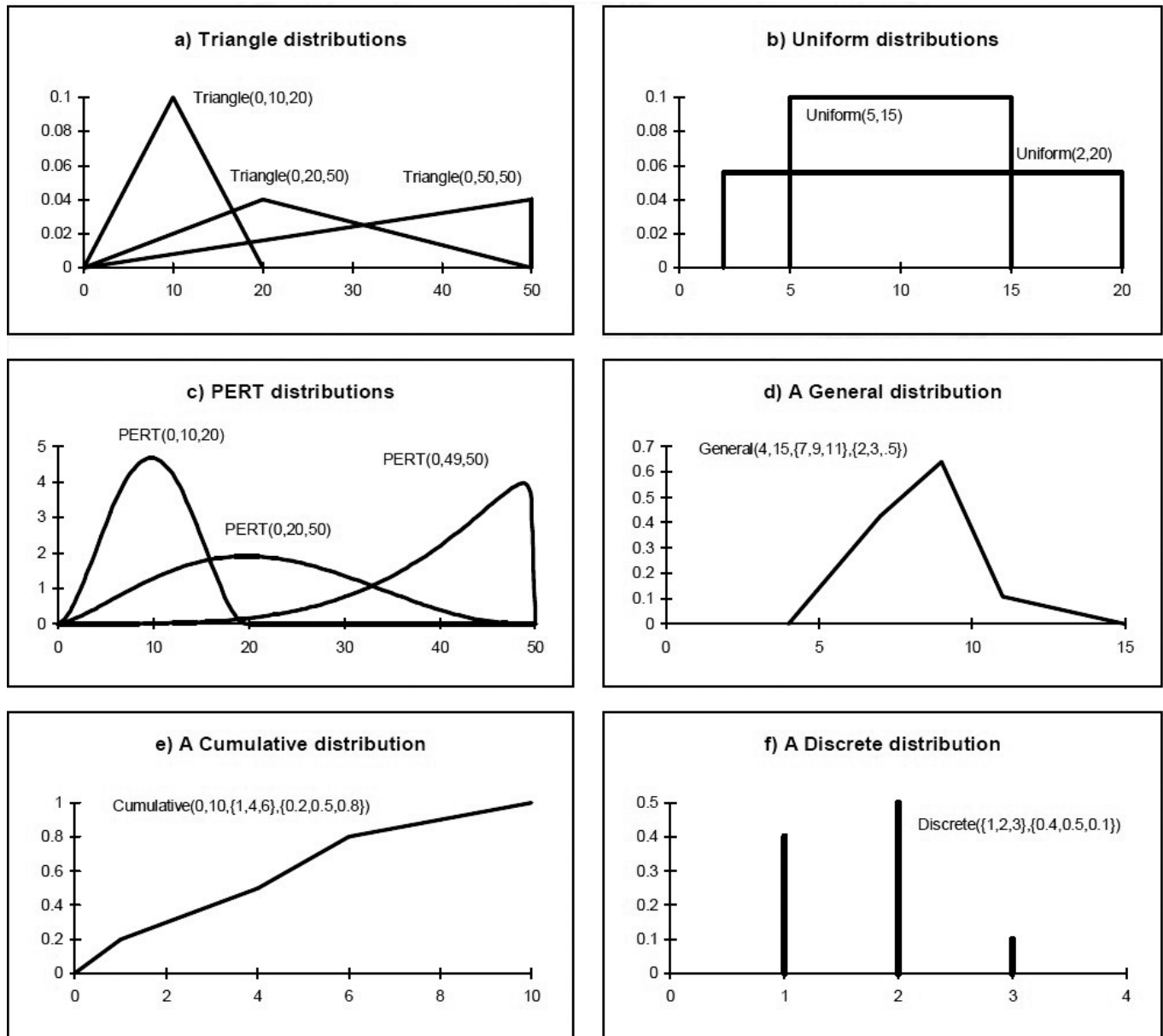


Рис. 2. Примеры распределений случайных величин, используемых в имитационном моделировании процессов в сетях электроснабжения

правило, множественной имитации его определенных аспектов.

В этом случае в схеме имитационного моделирования присутствует как модель имитации, так и модель ее применения и многократного запуска (рис. 3). В свою очередь, наличие таких программных составляющих снижает фундаментальную ценность имитационного моделирования, а в случае распределённых больших систем снижает и ценность по показателю «вычислительные затраты — стоимость» разработки модели и ее применения.

Число комбинаций малого числа архитектурных или процедурных параметров таких систем влечет экспоненциальный взрыв в количестве вариантов запусков модели на имитацию.

Выход из сложившегося противоречия находят в симбиозе аналитической и имитационной моделей, где первая является математическим базисом начального этапа моделирования (рис. 4).

Тем самым частично снимается проблема фундаментальной ценности и воспроизводимости, но не размерности и экспоненциального взрыва. Роль имитационного статистического моделирования в организации математического эксперимента по исследованию эффективности транспортных систем иллюстрирована на рис. 5.

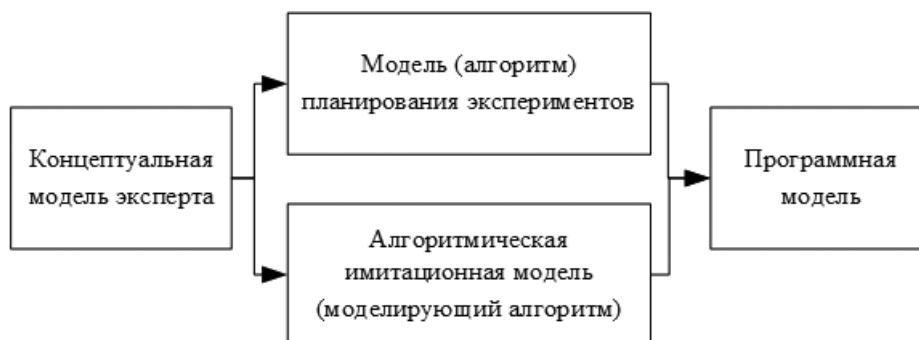


Рис. 3. Схема имитационного моделирования



Рис. 4. Схема аналитико-имитационного моделирования

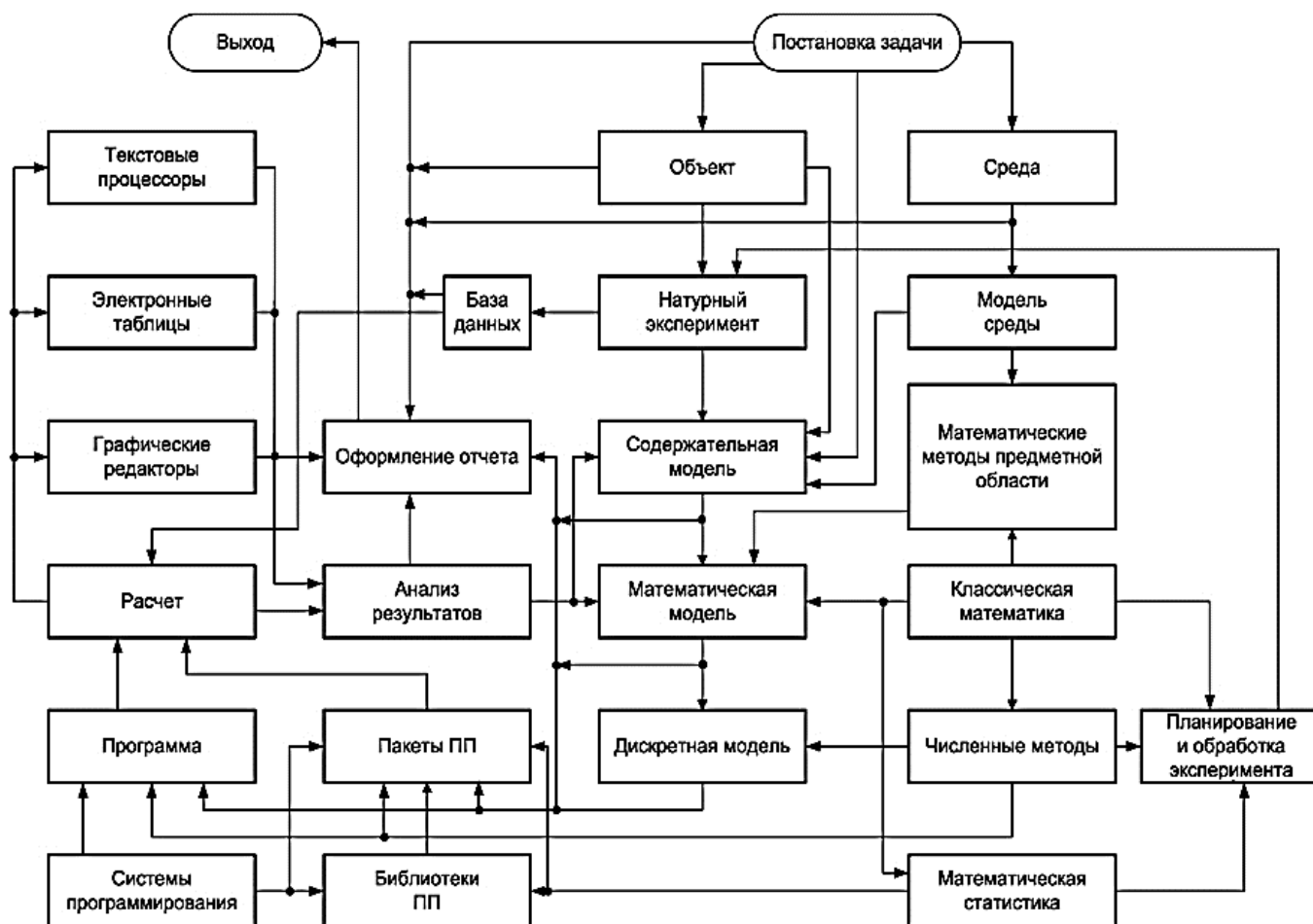


Рис. 5. Общая схема этапов и компонент моделирования в распределенных, сложных эмерджентных системах электроэнергетики

Имитационное моделирование — это методология исследования сложных систем для понимания их функционирования и для принятия обоснованных решений на задействование средств управления и адаптации. Имитационное моделирование безальтернативно для:

- реализации потенциальных возможностей повышения эффективности решения задач контроля, управления, поиска и оптимизации за счет использования новых данных;
- обоснования создания специализированных интегрированных систем поддержки принятия управленческих решений.

Представим задачу оценивания показателя какого-то конечного показателя P_g , например вероятности безаварийной работы источника генерации, нагруженного в сети произвольной топологии трансформаторных подстанций и промышленных и бытовых потребителей в течение заданного промежутка времени.

Принципы построения данной статистической модели поясним с использованием примера построения структуры элементов сети электроснабжения, граф которой изображен на рис. 6.

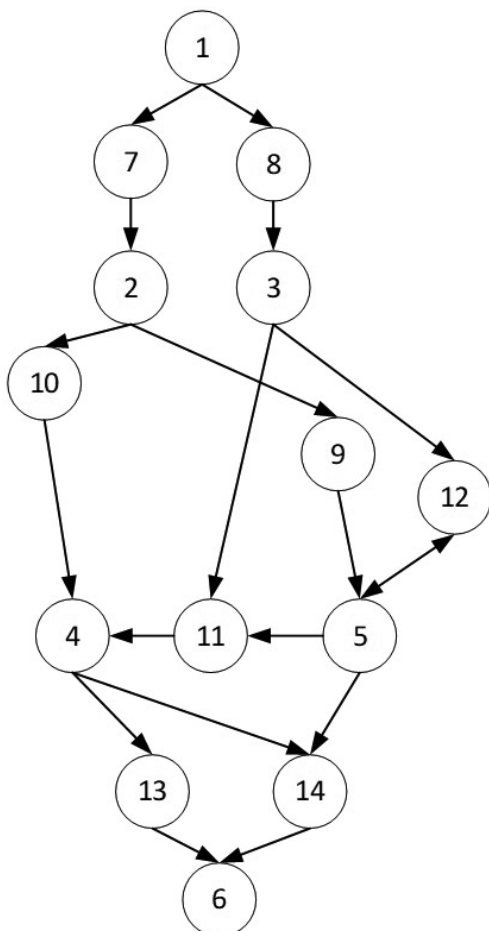


Рис. 6. Пример фрагмента графового представления процессов функционирования фрагмента структуры элементов сети электроснабжения

Каждому структурному элементу данной структуры, помеченному на рис. 6 номером ($j = \overline{1,14}$) поставим в соответствие бернуллиеву переменную [7]:

$$I_j = \begin{cases} 1, \\ 0. \end{cases} \quad (3)$$

где «1» означает, что j -й элемент, имитирующий целевую функцию элемента реальной сети электроснабжения — выполнен, совершен; 0 — в противном случае.

Вероятность события $\bar{A}_j = \{I_j = 0\}$ считается заданной и равна P_j .

Буквами a, b, c, d, e — обозначим возможные пути реализации энергообеспечения потребителей от первого элемента к шестому, и для каждого из путей также введем соответствующую бернуллиеву переменную (I_f, I_g, I_c, I_d, I_e). Очевидно, можно записать

$$\begin{aligned} I_d &= I_1 \cdot I_7 \cdot I_2 \cdot I_{10} \cdot I_4 \cdot I_{13} \cdot I_6; \\ I_g &= I_1 \cdot I_7 \cdot I_2 \cdot I_9 \cdot I_5 \cdot I_{11} \cdot I_4 \cdot I_{13} \cdot I_6; \\ I_c &= I_1 \cdot I_7 \cdot I_2 \cdot I_9 \cdot I_5 \cdot I_{12} \cdot I_5 \cdot I_{14} \cdot I_6; \\ I_d &= I_1 \cdot I_8 \cdot I_3 \cdot I_{11} \cdot I_4 \cdot I_{13} \cdot I_6; \\ I_e &= I_1 \cdot I_8 \cdot I_3 \cdot I_{12} \cdot I_5 \cdot I_{14} \cdot I_6; \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда, вероятность выполнения всего процесса функционирования фрагмента сети электроснабжения (рис. 6) в i -той реализации процесса моделирования можно характеризовать бернуллиевой переменной I_i равной

$$I_i = 1 - (1 - I_d) \cdot (1 - I_g) \cdot (1 - I_c) \cdot (1 - I_d) \cdot (1 - I_e) \quad (5)$$

Вероятность полной реализации процесса функционирования фрагмента сети электроснабжения P_g (сигнала) от начального события (вершина 1 на рис. 6) до заключительного этапа (на рис. 6 вершина 6) оценивается по зависимости

$$P_g^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i. \quad (6)$$

С учетом рассмотренных положений укрупненный алгоритм расчёта вероятности P_i в каждой i -той реализации модели включает следующие операции [8, 9]:

- 1) моделирование случайного события, состоящего в реализации своего функционала (A_j) (j -го структурного элемента графа. Используется программный датчик, генерирующий случайные числа, распределенные на интервале $[0,1]$ в соответствии с одним из априорно известным законом распределения (рис. 5). Данная операция осуществляется для всех j . При этом, если полученное с датчика число $x_j \leq P_j$, то событие $\bar{A}_j$ считается наступившим, а бернуллиевой

переменной I_j присваивается значение 0 (в противном случае $I_j = 1$).

- 2) соответствии с зависимостями (4) вычисляются значения всех бернуллиевых переменных, описывающих состояние различных способов реализации моделируемого процесса функционирования сети электроснабжения от итогового события к исходному, т.е. $1_a, 1_b$ и т.д.
- 3) с использованием выражения (5) определяется значение переменной I_p посредством которой описывается случайное событие, состоящее в существовании хотя бы одного пути от высшего элемента энергетической схемы к исполнительному элементу в i -той реализации процесса.

Определение количества реализаций статистической модели N может быть осуществлено с учетом следующих положений. Известно, что частота P^* представляет собой случайную переменную, описываемую β -распределением с плотностью вероятности

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(\lambda, \eta)} x^{\lambda-1} (1-x)^{\eta-1}, \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

$\frac{1}{B(\lambda, \eta)} x^{\lambda-1} (1-x)^{\eta-1}$ — при $0 < x < 1$; 0 — при $x \geq 1, x \geq 0$, где λ, η — параметры формы; $B(\lambda, \eta)$ — бета-функция.

Математическое ожидание и дисперсия β -распределения выражаются соответственно зависимостями:

$$m_x = \frac{\lambda}{\eta + \lambda}, \quad (8)$$

$$D_x = \frac{\eta\lambda}{(\eta + \lambda)^2 (\eta + \lambda + 1)}.$$

Непосредственное использование β -распределения для определения объёма статистических экспериментов является затруднительным. Вместе с тем, в силу центральной предельной теоремы частота P^* при достаточно большом N имеет распределение близкое к нормальному. Поэтому при $n \rightarrow \infty$ справедливы выражения:

$$P(|P^* - P| \leq E) = d; \quad (9)$$

$$E = t_\alpha \sigma,$$

где α — доверительная вероятность;

t_α — квантиль нормального распределения, соответствующий заданному значению α и определяемый по таблицам.

С учетом данного положения необходимое число реализаций статистической модели оценивается по зависимости:

$$N \geq t_\alpha^2 \frac{P_g^{**} (1 - P_g^{**})}{E^2}, \quad (10)$$

где P_g^{**} — предварительная оценка P_g по количеству реализаций статистической модели $N^{**} \geq 30$.

Перейдем в выражении от абсолютной точности E к относительной точности $\delta = E / P$. Тогда выражение (10) примет следующий вид [68–70]:

$$N = \frac{t_\alpha^2 (1 - P)}{P \delta^2} \approx \frac{t_\alpha^2}{P \delta^2}, \quad (11)$$

откуда видно, что при малых P очень значительно возрастает N .

Оценка среднего значения показателя W по множеству реализаций N определяется как

$$m_w^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N W_j, \quad (12)$$

где W_j — значение показателя эффективности в j -м эксперименте.

Как и в предыдущем случае имеем

$$P(|W - m_w^*| \leq t_\alpha \delta_w / \sqrt{N}) = \alpha, \quad (13)$$

Откуда

$$N = \frac{t_\alpha^2 \delta_w^{**2}}{E^2}, \quad (14)$$

где δ_w^{**2} — оценка дисперсии δ_w^2 при $N^{**} \geq 30$.

После проведения установленного количества N реализаций по зависимости (6) определяется искомая статистическая оценка P_g^* .

Основным преимуществом рассмотренной модели является её простота, универсальность (исследуются ориентированные и неориентированные графы), а также возможность распространения её на случай исследования процессов, содержащих значительное количество структурных элементов (путем последовательной декомпозиции исходной структуры).

Возможности данного подхода иллюстрируют графики, полученные с использованием варианта информационной структуры, изображенной на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены зависимости, позволяющие оценить значительность вклада различных типов структурных элементов сети электроснабжения (1 — вершин, соответствующих вероятностям безотказной работы сети в прямых связях между уровнями, 2 — линий связи между элементами уровней иерархии и 3 — элементов, связывающих вершины одного уровня

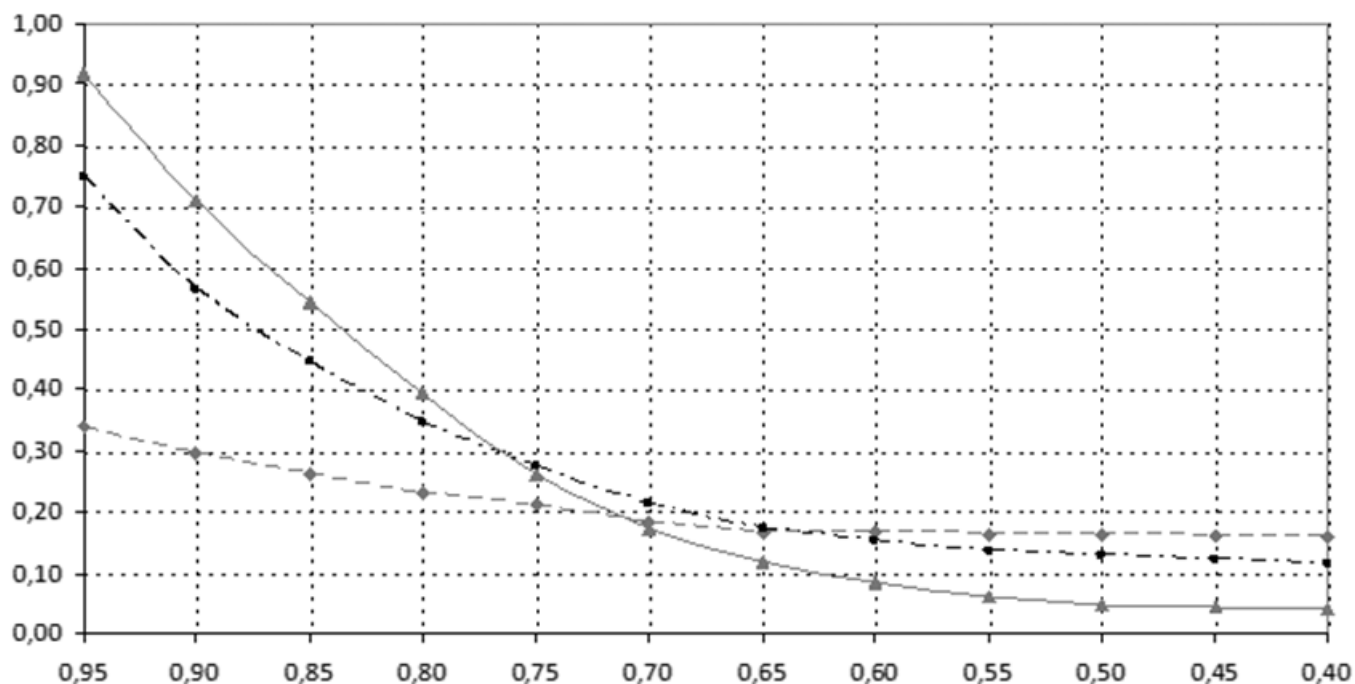


Рис. 8. Зависимость вероятности правильного функционирования всей сети электроснабжения от вероятностей безотказной работы и правильного функционирования элементов модели инфраструктуры сети, отображенной на рисунке 7

в показатель эффективности системы (в нашем случае — вероятность функционирования всей сети не ниже заданной и электрические параметры сети используются в целях распознавания) при различных вероятностях элементов 3-х типов и прочих равных условиях.

Для инициации входов использовался датчик случайных чисел в интервале (0,1), моделирующий случайное событие, состоящее в появлении или не появлении на одном из входов модели выхода значения электрического параметра за пределы двустороннего допуска.

Из анализа графических зависимостей на рисунке 8 следует, что в оценочных расчетах вкладом структурных элементов третьего типа (линий связи между элементами одного уровня) в показатель эффективности системы

электроснабжения можно пренебречь, что свидетельствует о достаточной энерго-обеспеченности по прямым связям, которые оказываются резервированными, а надежность элементов сети существенно влияют на вероятность правильного функционирования всей сети.

Таким образом, представленная модель статистического имитационного анализа информационных цепей и процессов функционирования электросети позволяет для заданного уровня частных показателей эффективности каких-либо формализованных этапов процесса электроснабжения оценить (в статистическом смысле) диапазон изменения характеристик элементов данного процесса (или его структурных характеристик), который обеспечивают заданные значения итоговых показателей эффективности системы электроснабжения, в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Августевич И. В. Терминологический справочник по электроэнергетике / И.В. Августевич, Э.К. Аракелян, А.Г. Фишов. — М.: КЕМ, 2008. — 912 с.
2. Интеллектуальные электрические сети: компьютерная поддержка диспетчерских решений / Ю.Я. Любарский, А.Ю. Хренников. — М.: ИНФРА-М, 2021. — 160 с.
3. Умные сети и интеллектуальные энергетические системы. [Электронный ресурс]. — URL: <http://venture-biz.ru/energetika-energobezrezhenie/290-intellektualnye-seti> (дата обращения: 26.06.2025).
4. Вережкин А. П., Муртазин Т. М. Искусственный интеллект в задачах моделирования, управления, диагностики технологических процессов. — М.: Вологда: Инфра-инженерия, 2023. — 232 с.
5. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. М.: Физматлит, 2022. — 816 с.
6. Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures: Deterioration Processes and Standard Test Methods. Vol. 1 / eds C. Maierhofer, H. W. Reinhardt, G. Dobmann. Berlin: BAM, 2020. — 624 p.
7. Ломоносов М. В. Схема Бернулли с замыканием, Пробл. передачи информ., 1974, том 10, вып. 1. — С. 91–101.
8. Райгородский А.М. Случайные графы // Математика в задачах, М.: МЦНМО, 2009. — С. 312–315.
9. Bollobás B. Riordan O. The diameter of a scale-free random graph // Combinatorica. 2004. V. 24, №1. — P. 5–34.

© Обьедков Вячеслав Владимирович (Ovv862@rambler.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»