

Таким образом, индукция магнитного поля, создаваемого током, текущим по бесконечно длинной цилиндрической поверхности, на расстоянии  $\rho$  от оси цилиндра равна

$$\vec{B}(\rho) = \begin{cases} \mu_0 J \sin \theta \vec{e}_3, & \rho < \rho_0; \\ \frac{\mu_0 J \sin \theta}{2} \vec{e}_3 - \frac{\mu_0 J \cos \theta}{2} \vec{e}_1, & \rho = \rho_0; \\ -\frac{\mu_0 J \rho_0 \cos \theta}{\rho} \vec{e}_1, & \rho > \rho_0. \end{cases} \quad (23)$$

Стоит отметить, что в некоторых источниках [1]–[3] приводятся решения частных задач и отдельные авторы приводят другой результат для случаев  $\rho = \rho_0$ , например в [3].

### Литература

- 1 Электричество и магнетизм. Методика решения задач / Д. Ф. Киселев [и др.]; Москва: Физический факультет МГУ, 2010. – 223 с.
- 2 Магнетизм: учебное пособие по курсу физики / А. Э. Васищев [и др.]; СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – С. 14–17.
- 3 Андреев, А. Д. Физика. Магнетизм: конспект лекций / А. Д. Андреев, Л. М. Черных; СПб.: ГОУВПО СПбГУТ, 2009. – 19 с.

УДК 519.174

*М. А. Бужан, Ю. В. Жердецкий*

### АППАРАТ ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*В статье приводится описание программного продукта, позволяющего проводить автоматизированный расчет надежности сложных технических систем, анализ и расчет безопасности их структурной организации, технического риска, готовности и ремонтпригодности. Представлен реализованный программный модуль, автоматизирующий построение и эксплуатацию вероятностных моделей надёжности электроэнергетических систем различной структурной организации.*

На сегодняшний день, в мире разработаны десятки программных продуктов в области автоматизации расчета надежности электроэнергетических объектов, позволяющих проводить автоматизированный расчет надежности сложных технических систем, для анализа и расчета безопасности, определения технического риска, готовности и ремонтпригодности, отличающихся между собой наличием встроенных аналитических средств, производительностью математических операций, применением к конкретным предметным областям, графическими интерфейсами, стоимостью лицензий, простотой освоения.

Одним из программных продуктов, направленных на решение задач оценки надежности электроэнергетических систем, является АСОНИК-К, используемый для проектирования РЭС.

Авторами разработан и реализован инструментарий, расширяющий список задач и область применения программного продукта АСОНИК-К. Программное обеспечение реализовано в составе программно-технологического комплекса автоматизации

проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst».

Представленный программный модуль, ориентированный на оценку вероятностных характеристик надежности многоэлементных электроэнергетических систем, элементами которых являются трансформаторные подстанции; точки поступления и потребления электроэнергии; линии связи и др., в ряде случаев удобно использовать методику расчёта надёжности систем ( $n$ -полосников), 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 [1]. 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.

В ряде случаев, при рассмотрении многоэлементных потоковых систем [2], требуется учет не только наличия связи между вершинами, но и направления связи между двумя вершинами. Исходя из этого, задача сводится к оценке связности графов с учетом наличия связности между их вершинами (ребрами), при этом расчетный алгоритм [3], включающий создание матрицы смежности и циклического транзитивного перемножения всех возможных реализаций графа с расчетом их вероятностных характеристик, требует доработки – унификации полученных вариантов и удаления дубликатов [4]. Таким образом, предложенная методика расширяет свойство прогностичности моделей структурно-сложных систем, формализуемых в виде ненаправленных графов с несколькими входами и выходами.

Программный модуль обладает современным интерфейсом, понятен и интуитивен. Нет множества лишних панелей. Не требователен к железу, на котором работает. 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.

На рисунке 2 представлен фрагмент электроэнергетической сети районного центра. А на рисунке 3 данный фрагмент системы представлен в виде графа  $G(N, K)$ , где  $N = \{N_v\}, v = 1, 9, K = \{K_i\}, i = 1, 10$ .

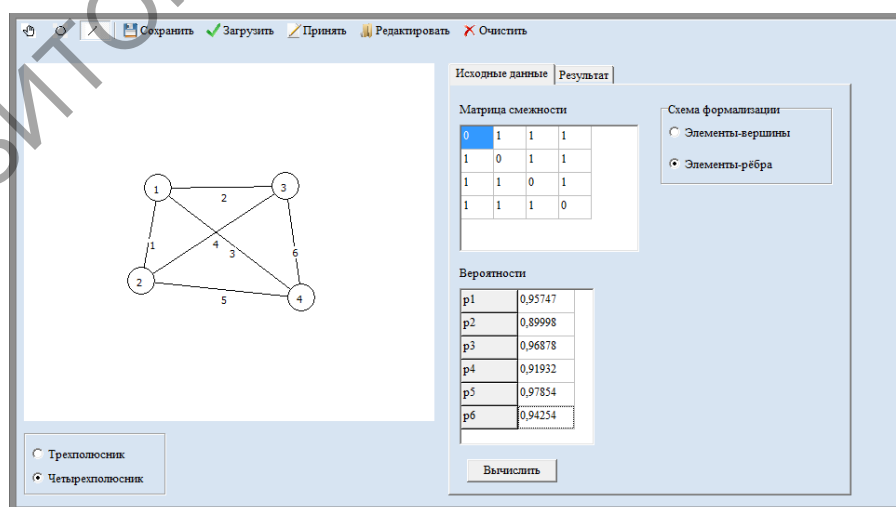


Рисунок 1 – Интерфейс ПМ автоматизации расчёта надёжности электроэнергетических систем

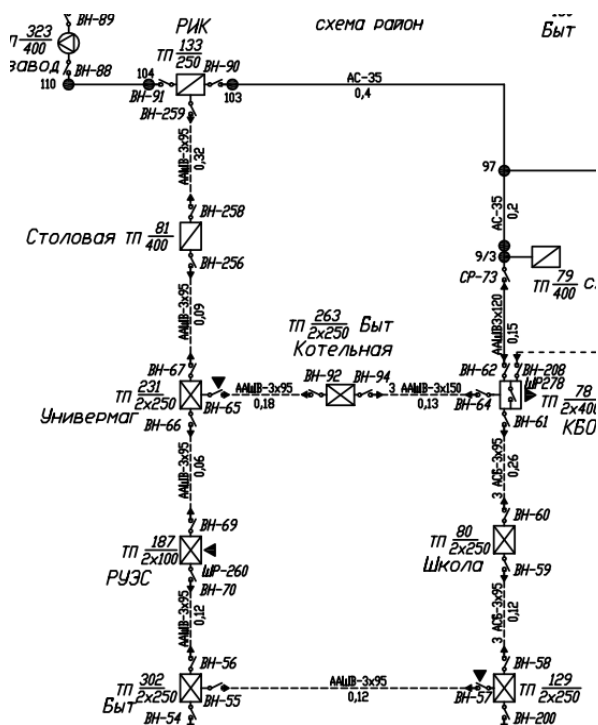


Рисунок 2 – Фрагмент электроэнергетической сети

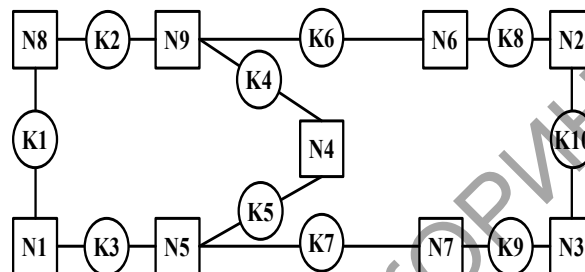


Рисунок 3 – Граф фрагмента электроэнергетической сети

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).

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 (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели надежности вершин графа модели электроэнергетической системы

| Элемент | Надежность | Элемент | Надежность | Элемент | Надежность |
|---------|------------|---------|------------|---------|------------|
| N1      | 0,8 730    | N4      | 0,8 985    | N7      | 0,9 000    |
| N2      | 0,8 685    | N5      | 0,8 970    | N8      | 0,8 880    |
| N3      | 0,8 880    | N6      | 0,8 745    | N9      | 0,8 685    |

В результате модельных экспериментов были получены следующие вероятностные оценки надежности организации электроэнергетической системы (таблица 2), формализованной в виде структуры-четырёхполюсника.

Результаты расчёта оценок надёжности при формализации фрагмента электроэнергетической системы в виде системы-четырёхполюсника представлены на рисунке 4, соответственно для схемы формализации «элементы-рёбра».

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

Таблица 2 – Вероятностные оценки результирующих состояний графа модели электроэнергетической системы на основе параметров надежности ее вершин, формализованной в виде структуры-четырёхполюсника

| Состояние | Вероятностные оценки | Состояние | Вероятностные оценки | Состояние | Вероятностные оценки |
|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|
| S1        | 1,9323721438E-6      | S6        | 0,0013985760284496   | S11       | 1,34650154562E-5     |
| S2        | 1,73913492942E-5     | S7        | 0,0001356243752 313  | S12       | 0,0001211851391058   |
| S3        | 1,27624730562E-5     | S8        | 1,68285224562E-5     | S13       | 0,0010019691887751   |
| S4        | 1,53209505687E-5     | S9        | 0,0001111450323438   | S14       | 0,0014234683128876   |
| S5        | 1,71057770562E-5     | S10       | 0,0016236066805371   | S15       | 0,994089618782638    |

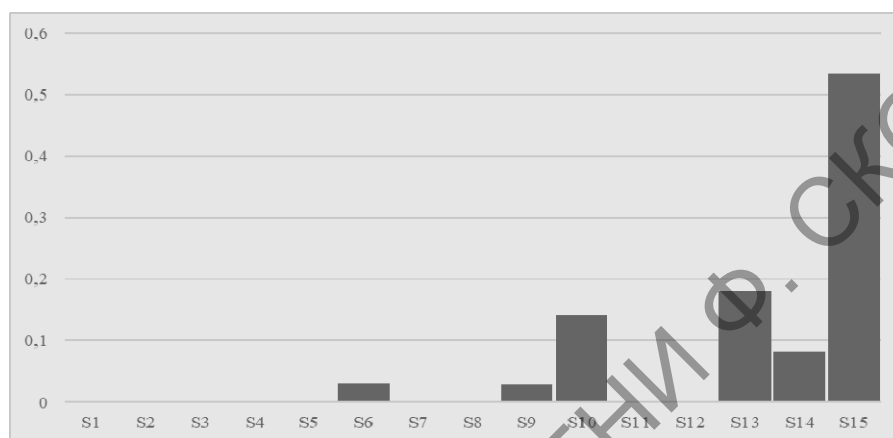


Рисунок 4 – Вероятности результирующих состояний надёжности для схемы формализации «элементы-вершины»

Программное средство, автоматизирующее расчёты, представляет собой инструментальный, 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 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.
- 3 Демиденко, О. М. Анализ надёжности электроэнергетических систем на основе вероятностно-алгебраического моделирования / О. М. Демиденко, Е. И. Сукач, Д. В. Ратобылская, Ю. В. Жердецкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (13). – С. 87–94.
- 4 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. – С. 198–202.