

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Дробов А.В.

УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Республика Беларусь, e-mail: electr_to@mail.ru

Имитационное моделирование – метод научного исследования систем, для которого характерно воспроизведение процессов функционирования элементов системы с сохранением их алгоритмов, причинно-следственных связей, последовательности протекания и вероятностного характера (детальное описание реализованных имитационных моделей представлено в справочнике [1]. Так, в процессе имитации с помощью генератора случайных чисел разыгрываются моменты наступления и виды отказов некоторых элементов и проверяются условия работоспособности системы в этот момент. Если, например, при моделировании надежности СЭС существующие отказы элементов не нарушают условий работоспособности системы, то разыгрываются очередные отказы. Наряду с моделированием отказов имитируются процессы восстановления отказавших элементов. В процессе имитации отслеживаются и фиксируются определенные события и состояния системы (наработка до отказа, продолжительность восстановления и др.), по которым оцениваются показатели надежности системы.

Многokrратно воспроизводя процесс функционирования имитационной модели системы до отказа, можно собрать статистический материал, достаточный для оценки интересующих показателей надежности системы с заданной точностью.

Ограничения имитационного моделирования:

- не предоставляется непосредственное решение задачи (как при использовании аналитических методов). Имитационная модель служит лишь средством для анализа поведения системы в условиях, определяемых экспериментатором;

- результаты имитационного моделирования зачастую носят вероятностный характер и требуют применения многочисленных методов статистического анализа данных;

- имитационная модель, как любая компьютерная программа, требует *верификации* – проверки соответствия фактического алгоритма функционирования имитационной модели замыслу исследования;

- задача *проверки адекватности* (характерная для любой модели) в имитационном моделировании стоит наиболее остро, что связано с вероятностным характером результатов моделирования;

- имитационное моделирование высоконадежных систем весьма ресурсоёмко. Так, для подтверждения вероятности безотказной работы системы 0,99999 с доверительной вероятностью 0,995 необходимо не менее 529830 реализаций имитационной модели до отказа.

Основу имитационного моделирования составляет *метод статистического моделирования (метод Монте-Карло)*.

Использование имитационного моделирования, например, для расчёта надёжности сложных технических систем основано на том, что процесс их функционирования представляется математической вероятностной моделью, отражающей в реальном масштабе времени все события (отказы, восстановления), происходящие в системе. С помощью такой модели программными средствами многократно моделируется процесс функционирования системы, и по полученным результатам определяются искомые статистические характеристики этого процесса, являющиеся показателями надёжности.

Применение методов имитационного моделирования позволяет учитывать зависимые отказы, произвольные законы распределения случайных величин и другие факторы, влияющие на надёжность. Однако эти методы, как и любые другие численные методы, дают лишь

частное решение поставленной задачи, соответствующее конкретным (частным) исходным данным, не позволяя получить показатели надёжности в функции времени. Поэтому для проведения всестороннего анализа надёжности приходится многократно моделировать процесс функционирования системы с разными исходными данными. В нашем случае – это прежде всего различная структура электрической системы, различные значения вероятностей отказа и длительностей безотказной работы, которые могут изменяться в процессе эксплуатации системы, и другие показатели функционирования.

Программный инструмент имитационного моделирования системы электроснабжения (ИМ СЭС) предназначен для выбора наиболее экономичного и надежного варианта и основных параметров системы электроснабжения железнодорожного предприятия. В качестве исходных данных используются сведения о основных параметрах внешнего электроснабжения, списке трансформаторных подстанций (ТП) с низковольтными нагрузками или перечень цехов и корпусов с их нагрузками и расположением.

При расчёте надёжности СЭС применяется логико-вероятностный метод. Под высказыванием X понимается любое предложение, относительно которого можно утверждать, ложно оно или истинно без учёта конкретного содержания. Переменная величина, которая устанавливает лишь два значения (1 и 0), называется двоичной. Функция, определяемая набором двоичных аргументов и принимающая лишь два значения (1 и 0), называется функцией алгебры логики.

В алгебре логики рассматриваются три основные логические операции: НЕ – отрицание ($\bar{1}=0, \bar{0}=1$); И – конъюнкция ($0 \cdot 0 = 0; 0 \cdot 1 = 0; 1 \cdot 0 = 0; 1 \cdot 1 = 1$); ИЛИ – дизъюнкция ($0 + 0 = 0; 0 + 1 = 1; 1 + 0 = 1; 1 + 1 = 1$).

Основные правила преобразования:

$$X \cdot 1 = X; \quad X + 1 = 1; \quad X + 0 = X; \quad X \cdot 0 = 0; \\ X \cdot X = X; \quad X + X = X; \quad X \cdot \bar{X} = 0; \quad X + \bar{X} = 1.$$

Ассоциативный закон:

$$X_1 \cdot (X_2 \cdot X_3) = (X_1 \cdot X_2) \cdot X_3 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \\ X_1 + (X_2 + X_3) = (X_1 + X_2) + X_3 = X_1 + X_2 + X_3.$$

Коммутативный закон:

$$X_1 \cdot X_2 = X_2 \cdot X_1; \quad X_1 + X_2 = X_2 + X_1.$$

Дистрибутивный закон:

$$X_1 \cdot (X_2 + X_3) = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3; \quad X_1 + (X_2 \cdot X_3) = (X_1 + X_2) \cdot (X_1 + X_3).$$

Закон инверсий:

$$\overline{X_1 \cdot X_2} = \bar{X}_1 + \bar{X}_2, \quad \overline{X_1 + X_2} = \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2.$$

Операция поглощения:

$$X_1 + X_1 \cdot X_2 = X_1, \quad X_1 \cdot (X_1 + X_2) = X_1.$$

Рассмотрим СЭС, схема замещения которой представлена на рисунке 1.

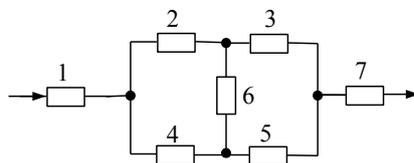


Рисунок 1 – Схема замещения по надёжности СЭС

Требуется определить логическую функцию работоспособности Z и логическую функцию неработоспособности \bar{Z} :

$$Z = (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_7) + (X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_7) + (X_1 \cdot X_2 \cdot X_6 \cdot X_5 \cdot X_7) + (X_1 \cdot X_4 \cdot X_6 \cdot X_3 \cdot X_7).$$

Каждое слагаемое – это один из возможных путей передачи мощности от источника к потребителю, обеспечивающих работоспособность СЭС. Причём это кратчайшие пути успешного функционирования СЭС, когда нельзя изъять ни одну из компонент, не нарушив функционирования СЭС.

$$\bar{Z} = (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \bar{X}_7) \cdot (\bar{X}_1 + \bar{X}_4 + \bar{X}_5 + \bar{X}_7) \times \\ \times (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_6 + \bar{X}_5 + \bar{X}_7) \cdot (\bar{X}_1 + \bar{X}_4 + \bar{X}_6 + \bar{X}_3 + \bar{X}_7).$$

После преобразований получаем

$$\bar{Z} = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 \cdot \bar{X}_4 + \bar{X}_3 \cdot \bar{X}_5 + \bar{X}_2 \cdot \bar{X}_6 \cdot \bar{X}_5 + \bar{X}_4 \cdot \bar{X}_6 \cdot \bar{X}_3 + \bar{X}_7.$$

Каждое слагаемое включает в себя те элементы, неработоспособное состояние которых приводит к тому, что передачу мощности от источника к потребителю осуществить нельзя. Причём нельзя изъять ни одно слагаемое, не нарушив условия неработоспособности СЭС.

Вероятность работоспособного и неработоспособного состояния СЭС. Если потребуется найти вероятность P успешного функционирования СЭС, тогда, имея выражение Z , необходимо найти P_I – вероятность безотказного функционирования первого пути передачи мощности от источника потребителю через вероятности безотказной работы элементов, образующих этот путь. Для схемы замещения по надежности СЭС, представленной на рисунке 1, получим следующие выражения:

$$P_I = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_7; \\ P_{II} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_7; \\ P_{III} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_6 \cdot P_5 \cdot P_7; \\ P_{IV} = P_1 \cdot P_4 \cdot P_6 \cdot P_3 \cdot P_7.$$

Тогда результирующая вероятность успешного функционирования СЭС

$$P = 1 - (1 - P_I) (1 - P_{II}) (1 - P_{III}) (1 - P_{IV}).$$

Вероятность Q неуспешного функционирования СЭС находится как

$$Q = 1 - P = (1 - P_I) (1 - P_{II}) (1 - P_{III}) (1 - P_{IV}).$$

Описание имитационной модели. Любую электрическую систему можно представить структурной схемой надежности (ССН), на которой оборудование заменяют элементом с определенными параметрами надежности. В свою очередь ССН можно сопоставить графу, в котором один или несколько последовательно соединенных элементов представлены ребрами графа, а узлы схемы – вершинами графа (рисунок 1).

В качестве входных вершин m выступают вторичные обмотки трансформаторов распределительных подстанций, выходными вершинами n – потребители электроэнергии (цеха, отдельные мощные электроприемники и пр.), узлы схемы – распределительные шкафы, ребра графа – линии электропитания 0,4 кВ (кабельные, воздушные).

На основании исходных данных составляется матрица надежности СЭС для различных вариантов в следующем виде (рисунок 2)

	1	2	...	n
1				
...				
m				

Рисунок 2 – Матрица надежности СЭС

Каждая из ячеек матрицы надежности СЭС представляет собой вероятность безотказной работы для i -го трансформатора подстанции и j -го потребителя. При отсутствии связи между потребителем и трансформатором ячейка не заполняется.

При заполнении ячеек для оценки надежности данной информации используется графоаналитический (рисунок 3) способ, либо на основе последовательно-параллельных связей элементов (для упрощения схем используется приближенный метод преобразования треугольника в звезду и обратно). В качестве источника информации может быть использован Комплекс автоматизированного диспетчерского управления (рисунок 4) и другие программы, использующиеся для анализа текущего электроснабжения.

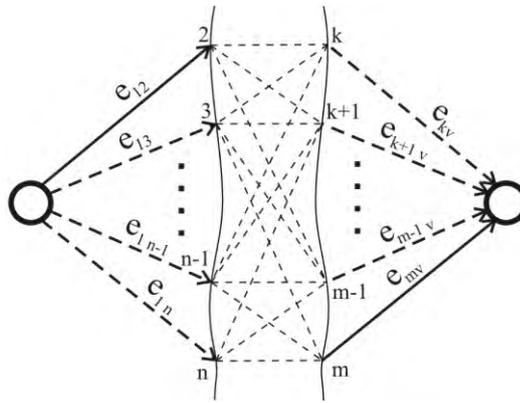


Рисунок 3 – Граф произвольной электрической системы с входной вершиной m и выходной n

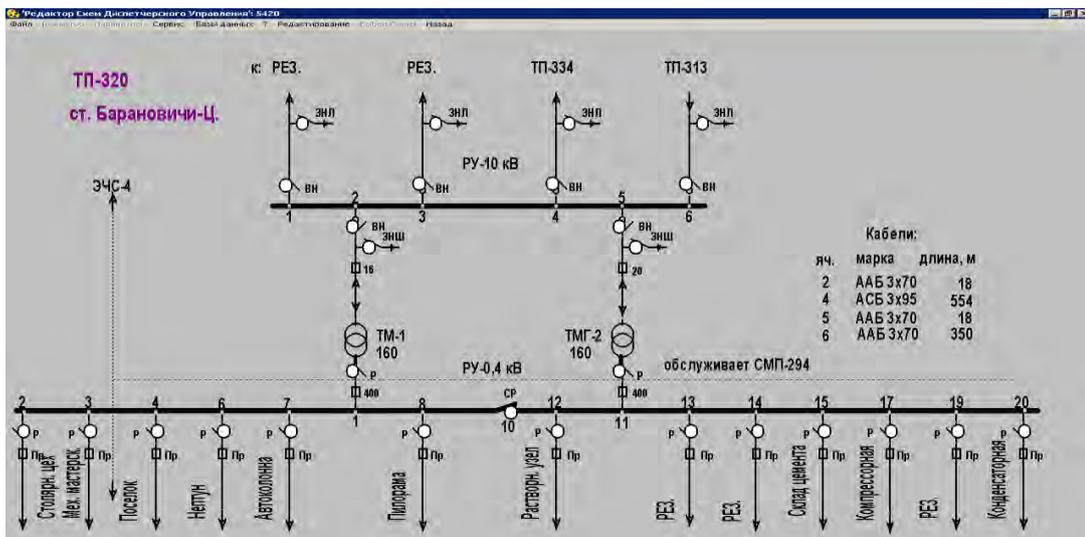


Рисунок 4 – Пример составления связи источник – потребитель на основе Комплекса автоматизированного диспетчерского управления

После заполнения ячеек матрицы, для каждого элемента ее содержимого, характеризующегося определенной вероятностью безотказной работы, с помощью генераторов псевдослучайных чисел на каждый элемент разыгрывается случайное число, определяющее его состояние. После розыгрыша каждый элемент схемы (системы) принимает одно из двух логических значений, а именно исправен ($a_i = 1$) или не исправен ($a_i = 0$). Таким образом

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{если значение розыгрыша} \geq p_{in}; \\ 1, & \text{если значение розыгрыша} < p_{in}, \end{cases}$$

где p_{in} – нормативная вероятность безотказной работы i -го элемента.

Любой i -ый элемент системы может принадлежать нескольким j -ым путям и занимать в них одно l -ое место. Тогда логическое состояние j -ого пути определяется как

$$T_j = \bigwedge_{l=1}^{K_j} a_{j,l}, \quad (1)$$

где K_j – количество элементов в j -ом пути; $a_{j,l}$ – логическое состояние l -го элемента в j -ом пути.

Формула (1) представляет собой перемножение логических состояний элементов, входящих в путь, и означает, что j -ый путь исправен только тогда, когда работоспособны все элементы принадлежащие пути.

Логическое состояние всей системы R в s -м розыгрыше будет представлять собой сумму логических состояний минимальных путей полученных в

$$R_s = \bigwedge_{j=1}^M T_j, \quad (2)$$

где M – максимальное число минимальных путей для выбранной схемы; T_j – логическое состояние j -го минимального пути.

Это означает, что если исправен хотя бы один путь, то работоспособна система в целом.

Полученные в (2) для каждого розыгрыша результаты, позволяют определить вероятность безотказной работы системы для определенного промежутка времени работы системы на основании N имитационных экспериментов

$$\lambda_p = \frac{\sum_{s=1}^N R_s}{N},$$

где D – число произведенных розыгрышей методом Монте-Карло; s – номер розыгрыша.

На основе выше изложенных методик была построена математическая модель определения показателей надежности сложных электрических систем.

Основные допущения при имитационном моделировании:

1 Перерывы электроснабжения, ликвидируемые работой автоматики (АПВ, АВР), не учитываются. Устройства релейной защиты считаются действующими безотказно.

2 Расчетные схемы для всех видов отключений составляются отдельно для каждого потребителя или (и) групп потребителей.

Этап анализа результатов модельных экспериментов на имитационной модели СЭС при анализе различных альтернативных вариантов электроснабжения реализуется следующей последовательностью шагов: оценка надежности всей системы и каждого потребителя в отдельности с помощью множества откликов при изменении параметров процесса; выбор рационального варианта организации СЭС с точки зрения надежности; поиск «узких» мест в СЭС. Опишем технологию решения каждой из перечисленных задач:

В качестве входных данных задаются: количество трансформаторов и потребителей; параметры элементов графа СЭС; данные о параметрах надежности элементов; количество проводимых автоматически модельных экспериментов. В качестве откликов ИМ использовались:

вероятность безотказной работы для каждого источника и потребителя;
 вероятность безотказной работы для всех источников;
 вероятность безотказной работы для всех потребителей;
 вероятность безотказной работы для всей системы с учетом важности влияния каждого из элементов СЭС, за счет использования весовых коэффициентов.

По вектору интегральных откликов определяется значение обобщенного показателя W_h , вычисляемое аналогично [2] по способу весовых коэффициентов с помощью формул:

$$W_h = \sum_j \delta_j Y_{jh}^*,$$

где $0 \leq \delta_j \leq 1$; $\sum_j \delta_j = 1$; Y_{jh}^* – нормированные значения j -ых откликов h -го варианта

модели; δ_j – весовые коэффициенты важности для исследователя j -го отклика

При поиске «узких мест» исследовалось распределение «узких мест» для трех групп компонентов: источников, потребителей, вариантов организации СЭС.

Основные научные результаты данной работы заключаются в следующем:

1. Предложен метод имитационного моделирования надежности СЭС сетей 0,4 кВ.
2. Разработан программно-технологический комплекс имитационного моделирования, обеспечивающего реализацию метода.
3. Апробирована технология использования программно-технологического комплекса, обеспечивающая реализацию предложенного метода имитации функционирования СЭС.

Практическое применение программного инструментария заключается в оптимизации технических решений по обеспечению надежности при проектировании и эксплуатации сложных электрических систем. Результаты исследования позволят: прогнозировать показатели надежности электрооборудования СЭС; установить “узкие места” в обеспечении надежности; разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования.

Список литературы

1. Жаднов, В. В. Современные проблемы автоматизации расчетов надежности / В. В. Жаднов, И. В. Жаднов, С. Н. Полесский // Надежность. – 2007. – № 2 (21). – С. 3–12.
2. Максимей, И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И. В. Максимей. – М. : Радио и связь, 1988. – 232 с.