

# СИСТЕМА ПОИСКА СХЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

*М.И. Успенский, И.В. Кызродев*

Показателями эксплуатационной надежности распределительных сетей в части восстанавливаемости являются время и полнота восстановления электроснабжения потребителей в послеаварийных режимах и режимах с ограничениями. Указанной проблеме посвящен ряд работ за рубежом [1-8] и в нашей стране [9-20], в том числе, авторов данной статьи [13-20]. Нами предложен комплексный метод восстановления электроснабжения на основе алгоритма обработки графа (АОГ) сети и искусственной нейронной сети с обучением и самообучением (рис.1). Статьи [13-20] посвящены отдельным сторонам разработки и функционирования системы поиска схемы восстановления электроснабжения потребителей. В данной работе сделана попытка показать функционирование системы в целом.

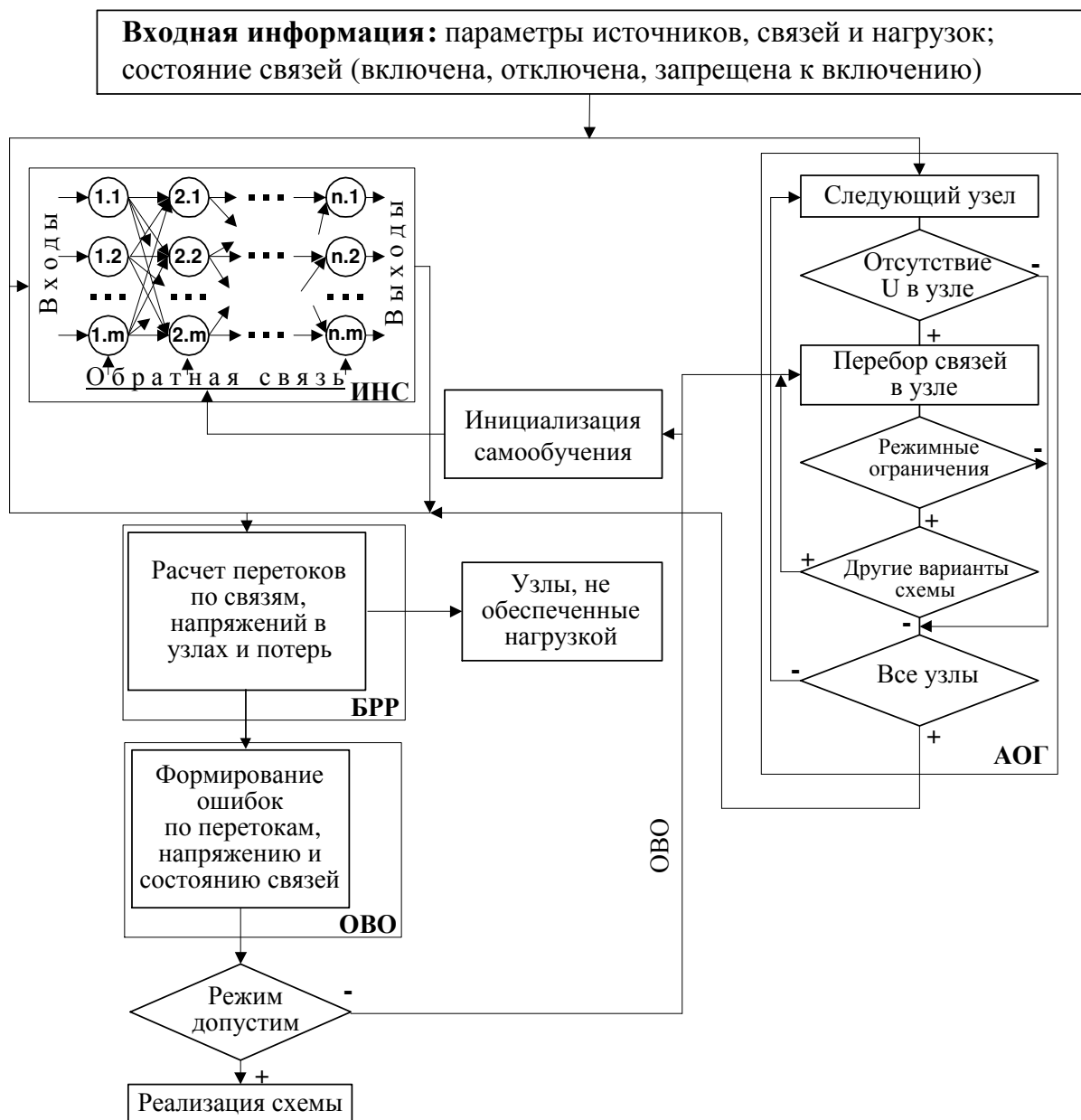


Рис.1. Блок-схема алгоритма восстановления питания потребителей электроэнергией.

С целью быстрого нахождения ближайшего питающего узла для обесточенного потребителя в АОГ применен поиск от потребителя по графу сети сначала вширь, до ближайших узлов, а затем вглубь по всем узлам, от которых в каждом отдельном случае поиск также идет вширь. Обоснование такого подхода дано в [19]. Поиск выполняется до момента определения питающего узла, располагающего необходимой мощностью. Затем блок расчета режима (БРР) проверяет допустимость включения предложенной АОГ цепочки по уровням напряжений и токов. При положительном результате решение принимается, иначе выполняется поиск другого решения.

Параллельно в поиске схемы участвует ИНС [17]. Предварительное обучение, а также найденные ранее, в процессе самообучения, решения позволяют принять схему первого приближения, близкую к искомой. Предложенные ИНС решения проверяются БРР на допустимость режима. Блок обобщенного вектора ошибки (ОВО) учитывает возможности коммутации соответствующих устройств и режимные ограничения. БРР через ОВО формирует вектор, указывающий ИНС (при отрицательном результате) направление поиска решения. Правила формирования ОВО и его воздействие на ИНС изложены в [18].

Таким образом, оба алгоритма, каждый из которых имеет достоинства и недостатки [17], в конкурирующем режиме отыскивают схему электроснабжения, удовлетворяющую условиям допустимости режима. При этом учитывается перераспределение потребителей между центрами электропитания для выравнивания нагрузок последних. В случае отсутствия схемы с полноценным восстановлением питания используются заложенные в программу данные ограничения нагрузок потребителя с учетом его категоричности по надежности, и поиск схемы продолжается.

Применение алгоритма ИНС с самообучением для решаемой задачи связано с обоснованием сходимости ее решения. Такой анализ проведен на основе элементарной схемы из трех линий связи с тремя коммутирующими аппаратами (рис.2) перебором всех возможных состояний ее коммутирующих устройств и определением обобщенного вектора ошибки в каждом наборе состояний для воздействия на ИНС [20]. Показано, что после нескольких итераций (от одной до трех) ОВО становится нулевым, следовательно, для указанной схемы сходимость решения обеспечивается. Но поскольку в определении ОВО каждая связь рассматривается отдельно, то любые другие возможные схемы с различными сочетаниями состояний коммутирующих устройств и располагаемых или/и потребляемых мощностей сводятся к одному из рассмотренных на элементарной схеме случаев.

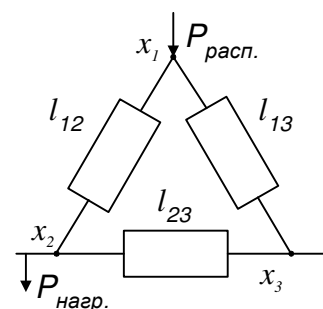


Рис.2. Элементарная схема распределительной сети.

Программную часть системы можно разделить на пять условно независимых блоков (рис.3). Основу поискового алгоритма составляют блоки АОГ и ИНС. Изначально в структуру алгоритма была заложена конкурентная обработка двух различных процессов при поиске решения. Процессы выполняются взаимно независимо, но используют одну и ту же входную информацию. Таким образом, среднее время нахождения решения при достаточно большой выборке искомых решений должно существенно сократиться. Программная реализация такого подхода основана на использовании MS Visual C++ версии 6.0. К настоящему времени удалось реализовать два независимых модуля АОГ и ИНС, которые в текущей реализации объединены в одну программу, однако могут параллельно исполняться на разных процессорах мультимикропроцессорных компьютеров или вычислительных кластеров. Одной из особенностей программного кода



Рис.3. Блок-схема программного обеспечения системы.

является удобство включения дополнительных модулей (конкурирующих процессов) для поиска решения с использованием других методов. Таким образом, можно не только постоянно модернизировать уже используемые алгоритмы, но и оценивать качество, вычислительные и временные затраты для новых алгоритмов. Еще одной положительной стороной выбранной архитектуры программного комплекса является то, что интерфейс пользователя по формированию, изменению и дополнению тестовых распределительных сетей полностью отделен от задач поиска решения, служит исключительно для подготовки входных данных и может изменяться независимо от указанных задач.

Отдельной проблемой в ходе разработки алгоритма была оценка времени его выполнения, так как в известных нам публикациях время на поиск решения резко увеличивалось при увеличении элементов распределительной сети [14]. Была опасность, что положительно зарекомендовавший себя по этому параметру при малом количестве узлов и межузловых связей алгоритм резко ухудшит свои результаты при увеличении элементов расчета.

Отладка программного комплекса проводилась на тестовой схеме [14]. Несмотря на простоту, схема давала возможность проверить все основные случаи, возникающие в реальных распределительных сетях, такие как: использование резервной линии при выходе основной в нерабочее состояние, переключение нагрузки на узел с большей располагаемой мощностью и/или наименьшими потерями, невозможность обеспечения потребителя электроэнергией в связи с режимными ограничениями или неисправностью всех связей данного узла. С другой стороны, именно простота схемы делала рабо-

ту программного комплекса наглядной, позволяя сразу проверять результаты работы алгоритма, сверяя их с данными, полученными вручную.

Следующим этапом тестирования программы был переход на более сложную схему. Решено было использовать схему одного из энергоузлов распределительной сети Коми энергосистемы. Общее число узлов выросло до 201, количество связей – до 227, семь источников питания, в том числе, пять дизель-генераторов, 165 коммутирующих устройств. Как уже отмечалось, авторы были готовы к росту временных задержек и повышению требований к ресурсам памяти, но, как показал эксперимент, серьезных изменений не произошло. Очевидно, что с увеличением элементов схемы, каждый из которых содержит некоторые данные о своей структуре и физических свойствах, объем памяти неминуемо возрастает, но зависимость эта имеет линейный характер, а ее коэффициент примерно равен единице (рассматриваются затраты оперативной памяти компьютера, необходимой для работы программы).

Оценить требования к памяти при усложнении схемы распределительной сети на один  $i$ -й элемент (узел, линию связи, коммутирующий элемент) можно исходя из формулы:  $\Delta M = k \cdot T_i$ , где  $k=1,07$  – коэффициент, определенный экспериментальным путем, а  $T_i$  – количество байт памяти, необходимое для хранения данных об  $i$ -м элементе схемы. При этом для узла ( $i=1$ )  $T_1=130$  байт; для линии связи ( $i=2$ )  $T_2=234$  байта; для коммутирующего элемента ( $i=3$ )  $T_3=30$  байт. Таким образом, в тестовой схеме общий объем используемой памяти для последней тестируемой схемы распределительной сети легко подсчитать по формуле:

$$M = 1,07 \cdot [201 \cdot (130 + 7) + 227 \cdot 234 + 165 \cdot 30] + R \approx 91598 + R,$$

где  $R$  – объем памяти, занимаемый вне зависимости от количества элементов, присутствующих в схеме. Эта память не является постоянной, ее размер колеблется в зависимости от того, какой размерности используется ИНС.

В ходе измерения скорости работы алгоритма на схемах различной размерности выяснилось, что рост временных затрат, как и в случае с ресурсами памяти, имеет практически линейный характер с умножением на постоянный коэффициент, близкий к двум. Это обусловлено, в первую очередь, неминуемым возрастанием размерности ИНС как по входному и выходному слоям, так и по внутренней структуре. Временные затраты на начальное обучение ИНС в расчетах не учитывались, так как имеют место в режиме offline с экспоненциальным ростом при увеличении размерности и числа примеров для обработки.

Особенностью интерфейса программы является многооконный интуитивно понятный подход как при создании схемы и ее обработке, так и при отражении текущих процессов в распределительной сети. Он позволяет отображать на мониторе как аварийное состояние схемы с соответствующими состояниями коммутирующих устройств, перетоками и нагрузками, так и предлагаемое решение по восстановлению схемы электроснабжения. Тем не менее, существуют правила, которых следует придерживаться при формировании и редактировании схемы. Некоторые условия не являются критичными, т.е. обязательными, в то же время могут в последующем существенно (на 5-10%) увеличить скорость нахождения решения, а также увеличить информативность отображения схемы.

К обязательным условиям, связанным с редактированием исходных схем и данных, относятся:

1. Наличие двух коммутирующих элементов (выключателей) на каждой связи между шиной с генерируемой мощностью и любой другой.
2. Связь должна быть с обоих концов подсоединенной к узловым шинам и содержать не более трех прямых линий.
3. На любой линии связи может быть отмечено не более двух коммутирующих

элементов, причем если на линии два коммутирующих элемента, то они работают синхронно, т.е. оба одновременно включены, выключены или запрещены к включению. Отрезок линии между двумя отпайками в программах представлен как линия без коммутирующих устройств. В этом случае ее состояние определяется по наличию напряжений на ее концах и может либо отсутствовать на обоих концах, и тогда линия считается отключенной, либо присутствовать, и тогда линия считается включенной.

4. Шины на экране монитора могут располагаться только горизонтально, что связано со спецификой программирования узлов.

5. Коммутирующие элементы и линии связи могут располагаться только вертикально или горизонтально.

6. Узел с генерируемой мощностью задается как узел с отрицательной мощностью потребления.

К желательным, но не обязательным условиям редактирования относятся следующие:

- Линия связи должна начинаться в узле, который является обычно питающим, и заканчиваться в узле, который является обычно потребляющим, что ускоряет процесс нахождения схемы восстановления.

- Между шиной с генерацией и первым узлом с потреблением должна располагаться «пустая» шина, т.е. узел с нулевым потреблением и нулевой генерацией, что связано с программной технологией нахождения генерирующего узла.

- Должны задаваться по возможности все известные физические параметры элементов схемы, такие как: тип линии, длина и тип провода, а также уровни напряжений линий связи. Допустимые значения токов, активные и реактивные сопротивления линий определяются автоматически по справочным данным в редакторе схемы. Значения генерируемой и потребляемой активной и реактивной мощности в узлах, а также состояния коммутирующих устройств по возможности поступают по каналам телеизмерений и телесигнализации. Для узлов и связей, по которым текущие данные не могут быть получены указанным образом, имеется возможность задавать их таблично в зависимости от заданных условий, либо корректировать вручную. Полный список необходимых для расчета параметров и их размещение в таблицах исходных и текущих данных можно найти в [14].

- Элементы схемы должны располагаться по возможности компактно, поскольку, несмотря на встроенные возможности масштабирования схемы, при большом количестве элементов существенной проблемой становится удобство отображения всей схемы на экране монитора.

- Желательно уменьшить количество требуемой для отображения информации о каждом из элементов схемы, сократив ее до минимально необходимой.

Все режимы работы проверялись на компьютере класса Intel Pentium MMX-166, с объемом ОЗУ в 64 Мбайта. Замеры по времени осуществлялись при запуске программы из компилятора Visual C++ 6.0 в отладочном режиме. Даже в таких неоптимальных условиях программа показала хорошие результаты по времени нахождения решения, которое составляло не более 0,5 сек., где на долю отображения информации приходилось 0,3 сек. Исходя из статистики темпа роста временных затрат при увеличении количества элементов схемы с запуском программы в рабочем, а не отладочном режиме, можно сделать предположение, что время на решение задач в схемах с количеством элементов, отражаемых в программах, порядка 10 тысяч (в рассмотренном примере их более 600) может составить не более 6 сек. При увеличении мощности процессора и видео подсистемы втрое, что соответствует возможностям современных компьютеров, можно реализовать поиск схемы восстановления электроснабжения в сложных сетях в режиме реального времени.

## Заключение

Предложенная система позволяет на основе вычислительной техники автоматизировать восстановление электроснабжения потребителей распределительной сети при авариях и режимных ограничениях. Принятые в системе восстановления схемы методы обоснованы теоретически и реализованы программно. Рост количества элементов схемы не приводит к существенному увеличению объема памяти и времени поиска решения. Условно независимые интерфейс и редактор схемы позволяют легко отслеживать и корректировать процессы как в распределительной сети, так и, собственно, в системе восстановления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Artificial Intelligence Techniques in Power Systems** / Edited by K. Warwick, A. Ekwue R. Aggarwal // IEE Publishing, London, 1997. – 320 p.
2. **Ching-Tzong Su, Chu-Sheng Lee.** Network Reconfiguration of Distribution Systems Using Improved Mixed-Integer Hybrid Differential Evolution // IEEE Trans. on PWRD, 2003. – Vol.18, No 3. – Pp. 1022-1027.
3. **Dai Seub Choi, Hasegawa J.** Improvement of Genetic Algorithm Convergence Characteristics for Distribution System Loss Minimization Reconfiguration// IEE Japan Power and Energy 94. Proc. of 5<sup>th</sup> Annual Conf, Tokio,1994. – Vol.1 – Pp.19-24.
4. **DeDermott T.E., Drezga I., Broadwater R.P.** A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration // IEEE Trans. on PWRD, 1999. – Vol. 14, No 2. – Pp. 478-483.
5. **Popovic D.S., Ciris R.M.** A multi-objective algorithm for distribution network restoration // IEEE Trans. on PWRD, 1999. – Vol.14, No3. – Pp.1134-1141.
6. **Sarma N.D.R., Prasad V.C., Prakasa Rao K.S., Sankar V.** A new network reconfiguration technique for service restoration in distribution network // IEEE Trans. on PWRD, 1994. – Vol. 9, No 4. – Pp. 1936-1942.
7. **Sarma N.D.R., Prasad V.C., Prakasa Rao K.S., Srinivas Manda.** Realtime service restoration in distribution network // IEEE Trans. on PWRD, 1994. – Vol. 9, No 4. – Pp. 2064-2070.
8. **Siqing Sheng, Youjiang Sun et al.** Random Adaptive Optimizer Restores Distribution Service // IEEE Comp. Appl. in Power, 2000. – Vol.13, No 2. – Pp.48-51.
9. **О восстановлении электроснабжения** потребителей в схемах распределительных сетей 6-35 кВ / В.И. Идельчик, Ю.Г. Кононов, В.Х. Кужев, А.И. Ушаков // Электричество, 1998. – № 9. – С.15 -21.
10. **Любарский Ю.Я.** Интеллектуальные информационные системы. – М.: Наука, 1990. – 232 с.
11. **Советчики диспетчера по оперативной коррекции режимов работы ЭЭС** / Под ред. В.М. Чебана и др. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1984. – 192 с.
12. **Фокин Ю.А., Хозяинов Н.А.** Об одном из способов решения задачи корректирующих переключений в послеаварийных режимах // Надежность при управлении развитием и функционированием электроэнергетических систем. – Иркутск, 1988. – С. 149-155.
13. **Успенский М.И., Старцева Т.Б., Шумилова Г.П.** Компьютеризация управления режимами на подстанциях. – Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1996. – 80 с.
14. **Новые** информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами / Н.А. Манов, Ю.Я. Чукреев, М.И. Успенский и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 205 с.
15. **Успенский М.И., Кызродев И.В.** Совместное использование искусственных нейронных сетей и алгоритмов обработки графов при поиске схемы питания потребителей распределительной сети // Методич. вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 51. – Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2000. – С. 274-278.
16. **Успенский М.И., Кызродев И. В.** Использование искусственных нейронных сетей при поиске схемы восстановления электроснабжения // Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2000. – С. 161-167.
17. **Успенский М.И., Кызродев И. В.** Комплексный метод восстановления схемы электроснабжения потребителей распределительной сети // Электричество, 2002. – № 12. – С.36-40.
18. **Кызродев И.В., Успенский М.И.** Самообучение искусственных нейронных сетей при восстановлении электроснабжения потребителей распределительной сети. – Сыктывкар: СЛИ, 2002. – С. 151-155. (Гр. Сыктывкарского лесного института. Т.3).
19. **Успенский М.И., Кызродев И. В.** Алгоритм обработки графа схемы при восстановлении питания потребителей распределительной сети. – Там же, С. 212-216

20. **Кызродев И.В., Успенский М.И.** О сходимости решения при самообучении нейросети в процессе восстановления электроснабжения потребителей // Информацион. технологии в электротехнике и электроэнергетике. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2002. – С.160-163.

*Об авторах.*

**Успенский Михаил Игоревич**, 1943 г. р. Окончил в 1971 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 1984 г. там же защитил кандидатскую диссертацию на тему «Защита генератора от внутренних коротких замыканий на базе микроЭВМ». Ведущий научный сотрудник ИСЭиЭПС Коми НЦ УрО РАН. Область научных интересов связана с проблемами оперативного управления объектами электроэнергетических систем и распределительных сетей в аварийных и послеаварийных режимах. Имеет 75 печатных работ, в том числе три монографии.

**Кызродев Илья Валерианович**, 1974 г. р. Окончил в 1996 г. физико-математический факультет Сыктывкарского государственного университета. Работает в центральной диспетчерской службе АЭК «Комиэнерго». Область научных интересов – управление электроэнергетическими системами на основе искусственных нейросетей. Имеет 10 печатных работ, в том числе одну монографию.