

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ¹

М.И.Успенский, И.В.Кызродев

*(Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера
Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар)*

Одним из основных показателей эксплуатационной надежности распределительных сетей является время восстановления электроснабжения потребителей при авариях и режимных ограничениях. Снизить его значение при комбинаторном характере выбора состояний связей (включена/отключена) с проверкой допустимости режима сети в условиях жесткого ограничения времени на принятие решения оперативному персоналу сейчас не просто. Применение вычислительной техники позволяет автоматизировать восстановление электроснабжения, сократить его время и снизить вероятность ошибочных действий персонала. При высокой степени автоматизации распределительных сетей главным является сокращение времени восстановления. В случае низкой квалификации оперативного персонала, что характерно для сельских районов, на первый план выдвигается недопущение развития аварий.

Автоматизации восстановления электроснабжения методами искусственного интеллекта за рубежом придается большое значение. Известные в этой области работы основываются на теории графов и комбинаторной математики [1-4], на создании базы знаний² моделированием набора режимов и конфигураций сети вне реального времени [6-9], на использовании генетических алгоритмов [10,11]. Обзор перечисленных работ сделан в работе [12]. Два первых направления требуют значительных вычислительных ресурсов, что увеличивает время решения. Третье направление устраняет этот недостаток, однако, реализовать его пока не удалось.

Ниже предложен *комплексный метод решения задачи восстановления электроснабжения потребителей* (рис.1), работающий на комбинации поиска решения по алгоритму обработки графов (АОГ) и применения искусственной нейронной сети (ИНС). Сравнительная простота используемого АОГ, с одной стороны, позволяет быстро находить решение для большинства узлов, с другой – не приводит к закликиванию поиска схемы в сложной конфигурации сети. ИНС быстрее работает при меньшем количестве неподключенных узлов. Такое сочетание позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам системы поиска схемы по сравнению с известными методами [12] и уменьшить время поиска решения. Восстановление схемы увязывается с информационной базой диспетчерского пункта и автоматикой управления режимами, в частности, по состоянию связей и уровням нагрузки на момент доаварийного режима. Отсутствующие данные восстанавливаются расчетными методами. Учет «утяжеления» режима до восстановления нормальных условий в сети осуществляется соответствующими коэффициентами «утяжеления» нагрузок. Кроме того,

¹ Электричество, №12, 2002. – С.36-40.

² Под базой знаний подразумевается определение Ю.Я.Любарского [5].

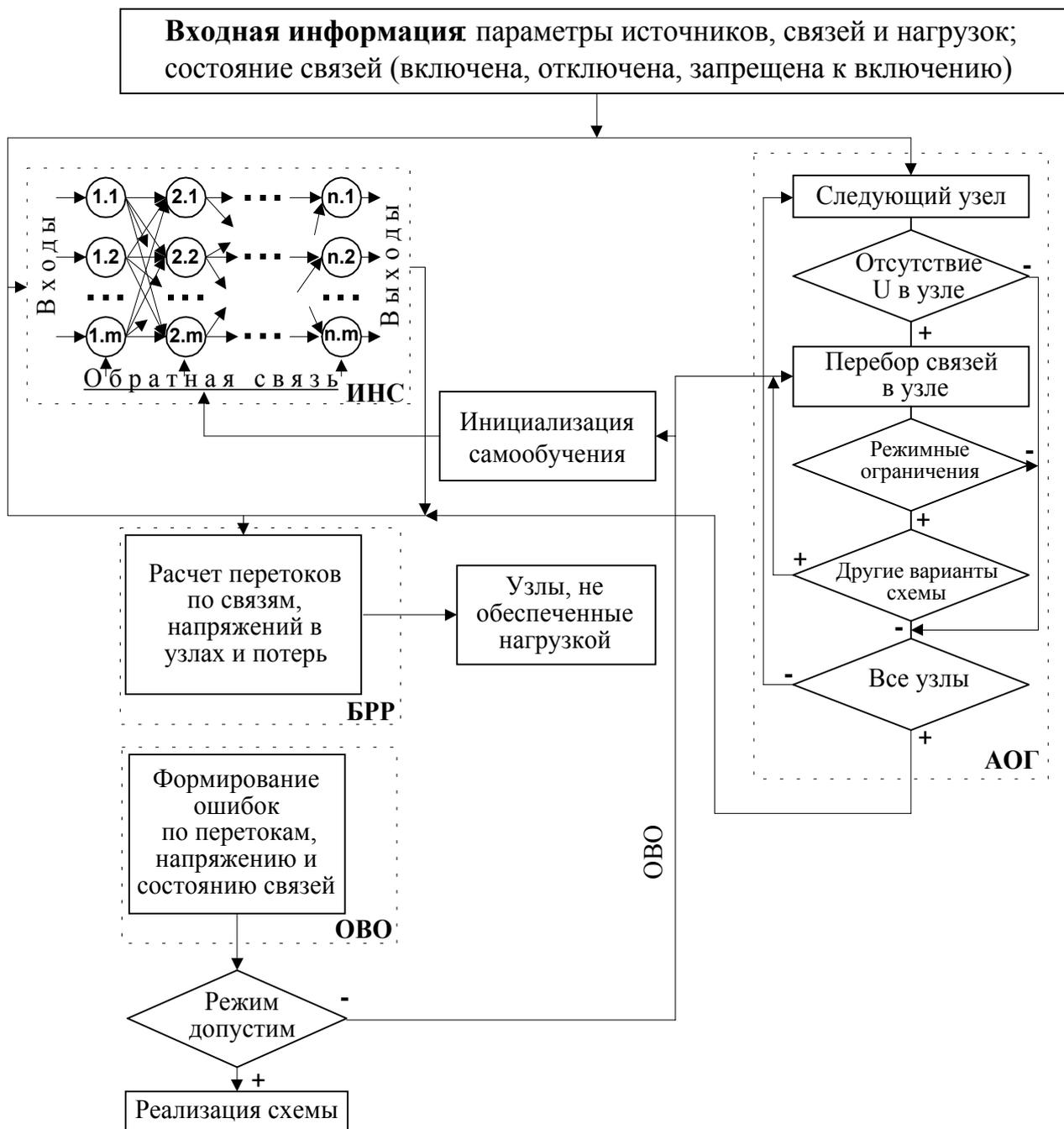


Рис.1. Блок-схема алгоритма восстановления питания потребителей электроэнергией

автоматика выступает инициализатором запуска программы поиска. Решение отыскивается после работы АПВ, АВР и другой автоматики с учетом сложившегося после их действия состояния связей. Условиями-ограничениями в поиске решения являются: режимные – недопустимость перегрузки связей и падения напряжения в узлах больше, чем на заданную величину; конфигурационные – структура сети должна быть цепочечной и должно отсутствовать одновременное двухстороннее питание отдельного потребителя (допустимость конфигурационных условий подтверждается опытом эксплуатации распределительных сетей); приоритетные – при необходимости ограничения нагрузок в первую очередь должны отключаться менее ответственные потребители [4].

АОГ в значительной степени моделирует действия оперативного персонала в конкретной ситуации с учетом перечисленных выше ограничений. Параллельно с ним ИНС на основе обучающей выборки пытается найти новую схему сети, удовлетворяющую указанным выше ограничениям. Все предложенные схемы проверяются блоком расчета режимов (БРР), который участвует в формировании обобщенного вектора ошибки (ОВО). ОВО указывает АОГ или ИНС приемлемость/неприемлемость предложенной схемы и направление поиска нового решения. АОГ ищет новую схему с учетом ограничений, указанных в векторе. ИНС переходит в режим самообучения, перенастраиваясь в соответствии с ОВО. Оба блока в конкурирующем режиме отыскивают схему электропитания, удовлетворяющую условиям допустимости режима. При этом учитывается перераспределение потребителей между источниками электроэнергии для выравнивания загрузки последних.

Преимуществом АОГ является определенность, завершенность решения вне зависимости от начального состояния связей. Узлы, которые могут быть обеспечены энергией, обеспечиваются ею. По тем узлам, которые не обеспечиваются энергией из-за режимных или конфигурационных условий, выводится информация о причинах такой ситуации. Недостатком метода является сравнительно большое по компьютерным меркам время поиска решения (от долей до десятков секунд в зависимости от сложности схемы).

Достоинство ИНС – практически мгновенное решение по состояниям связей, вошедших в выборку обучения. При отсутствии состояния в выборке обучения время поиска решения в процессе самообучения сравнимо с аналогичным временем АОГ. Выявление причин неподключения нагрузок сложнее, чем в методе АОГ. Однако, ввод решения для нового состояния схемы в выборку обучения при повторении состояния в дальнейшем приводит к быстрому определению решения.

Блок расчета режимов использует информацию о необходимых нагрузках потребителей, располагаемых мощностях и напряжениях в корневых узлах сети, параметрах связей, их состояниях (включена, отключена, запрещена к включению) и ограничениях в конфигурации сети. Основа расчета режима ввиду его традиционности не приводится. Его результат – нахождение перетоков по связям и напряжений в узлах.

Структура работы АОГ отражена укрупненной блок-схемой (рис.1, блок АОГ). После отключения повреждения в АОГ вводится информация о состоянии выключателей и напряжениях на шинах узлов сети на момент расчета, а также нагрузок потребителей в узлах до нарушения сети. Определяются обесточенные узлы, и выявляется их число. При количестве отключенных узлов больше половины их подключение осуществляется алгоритмом начального подключения нагрузок [4], позволяющим быстро восстановить основную часть схемы с учетом категоричности электроснабжения узла. Если число отключенных узлов небольшое, то из их списка в первую очередь выбирается узел, имеющий наиболее высокую категорию надежности электроснабжения и наибольшую требуемую мощность нагрузки. От выбранного узла отыскивается цепь до ближайшего узла, располагающего необходимой мощностью. Алго-

ритм поиска цепи основан на поиске источника по графу схемы [4]. Отличием является то, что поиск ведется сначала в ширину, а потом в глубину. Такая перестройка алгоритма позволяет подключать узел к ближайшему, располагающему необходимой мощностью, узлу, что снижает потери на переток. Расчет режимных параметров происходит в БРР, а контроль режимных условий – блоком ОВО. Если необходимых связей не найдено, то информация об отключенном узле и причинах этого выводится на монитор. Как правило, такое положение имеет место при одноцепном питании узла и повреждении элемента (линии, выключателя, разъединителя и т.д.) питающей цепи.

Блок поиска схемы восстановления на ИНС (рис.1, блок ИНС) представляет собой многослойную полносвязанную нейросеть, в первый слой которой вводится информация о текущем состоянии связей. Выходной слой формирует предлагаемое решение состояния связей. Количество внутренних элементов и слоев выбирается при проведении исследований.

На этапе обучения ИНС настраивает весовые коэффициенты элементов с помощью алгоритма обратного распространения ошибки (BP – back propagation) [13] так, чтобы для входной функции $\mathbf{r}(\mathbf{k})$ аппроксимировать функцию решений $\mathbf{u}(\mathbf{k})$ обучающей функцией $\mathbf{u}^*(\mathbf{k})$ для $\mathbf{k} \in [1, \mathbf{N}]$, где \mathbf{N} – набор примеров обучающей выборки.

В процессе решения, получив текущую входную функцию, близкую к $\mathbf{r}(\mathbf{k})$, сеть восстанавливает на выходе функцию $\mathbf{u}(\mathbf{k})$. Для случаев, не попавших в выборку обучения, выходная функция не всегда приводит к допустимому режиму. Проверку на допустимость режима выполняет БРР, по результатам работы которого формируется вектор ошибки. Последний инициализирует самообучение ИНС.

Расчет *обобщенного вектора ошибки* (рис.1, блок ОВО) определяется следующими условиями (рис. 2, блок 1).

Если узел нагрузки подключен к источнику мощности с выполнением неравенств $U_i \geq 0.95 U_{ном.}$ и $I_j \leq I_{доп.}$, а также соблюдены конфигурационные условия, т.е. он подключен корректно, то ошибка его подключения $V_i = 0$. Здесь i – номер узла, j – номер питающей связи i -го узла, U_i и I_j – текущие значения напряжения узла и тока связи, $U_{ном.}$ и $I_{доп.}$ – номинальное напряжение и допустимый ток связи. При выполнении неравенства $0.95 U_{ном.} \geq U_i \geq 0.9 U_{ном.}$ значения ошибки по напряжению V_{Ui} должны находиться в диапазоне $0 \dots 1$, т.е. по формуле прямой через две точки получим $V_{Ui} = 19-20 U_i / U_{ном.}$. Следовательно, если напряжение узла находится в диапазоне $0.9 \dots 0.95 U_{ном.}$, то ошибка по напряжению определяется между единицей и нулем. При напряжении узла больше $0.95 U_{ном.}$ ошибка равна нулю, а при $U_i \leq 0.9 U_{ном.}$ – единице.

Аналогично для тока связи при допустимом коэффициенте ее перегрузки k_{nj} условие $k_{nj} I_{доп.} \geq I_j \geq I_{доп.}$ преобразуется в ошибку $V_{Ij} = (I_j / I_{доп.} - 1) / (k_{nj} - 1)$ по то-

ку. Если одновременно присутствуют ошибки по напряжению в узле и по току питающей связи, то принимается бóльшая из них.

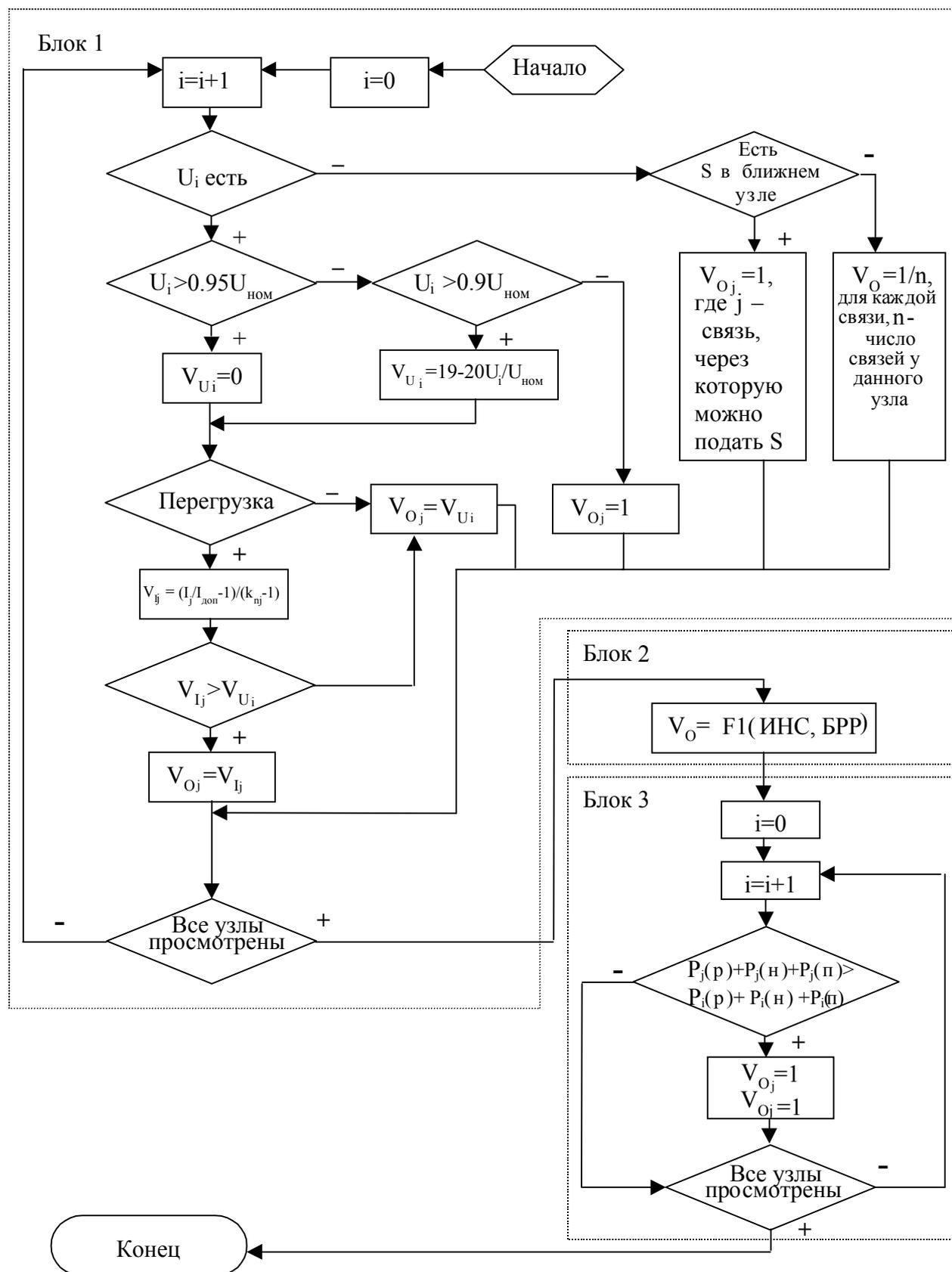


Рис.2. Блок-схема формирования составляющих обобщенного вектора ошибки

Ошибка состояния связи определяется из условий: 1) $V_{oj}=q$, если нейросеть предлагает включить запрещенную к включению связь; 2) $V_{oj}=q$, если нейросеть предлагает отключить разрешенный к включению выключатель, через который можно передать неподключенному потребителю необходимую мощность; 3) $V_{oj}=q/n$, если потребитель запитан от n источников (эта ошибка формируется для каждой связи, по которой может снабжаться потребитель); q – вес ошибки, определяющий приоритет подключения узла. При равных приоритетах $q=1$. Например, если узел нагрузки при равных приоритетах связей подключен к источникам по трем связям, каждая из которых позволяет обеспечить нагрузку необходимой мощностью, то $V_{oj}=1/3$ для каждой связи. Если же одна из связей не может этого сделать, то ее ошибка $V_o=1$, а двух других – $V_{oj}=1/2$. Подробнее примеры расчета ошибок состояния связей приведены в работе [14].

В блоке 2 по результатам сравнения состояний схем ИНС и БРР корректируется ошибка состояния связей в соответствии таблицей.

Корректировка ошибки состояния связей

Состояние связи, предложенное ИНС	Возможные сочетания связей и их коэффициент ошибки					
	0	1	1	0	1	0
Состояние связи, полученное после БРР	0	1	3	3	0	1
Коэффициент ошибки состояния связи	V	V	1	0	1	н/к

Здесь: V – составляющая вектора ошибки по состоянию связи, полученная в блоке 1; н/к – невозможная комбинация, поскольку сам блок не может влиять на связи (например, включить связь); 1 – связь включена; 0 – отключена; 3 – запрещена к включению. Такая корректировка запрещает ИНС работать со связями, запрещенными к включению либо с недопустимыми параметрами.

Блок 3 корректирует вектор ошибки, перераспределяя потребителей между источниками электроэнергии таким образом, чтобы максимизировать располагаемую в источнике мощность при условии обеспечения нагрузки.

С помощью ОВО можно ввести дополнительно условия оптимизации схемы восстановления, что частично выполняется при его формировании (блок 3 рис.2).

При самообучении ИНС ее текущее решение u^* поступает на вход БРР (рис.3). Последний определяет текущий вектор x режимных несоответствий. Далее оба сигнала вводятся в блок ОВО, выявляющий, состояние

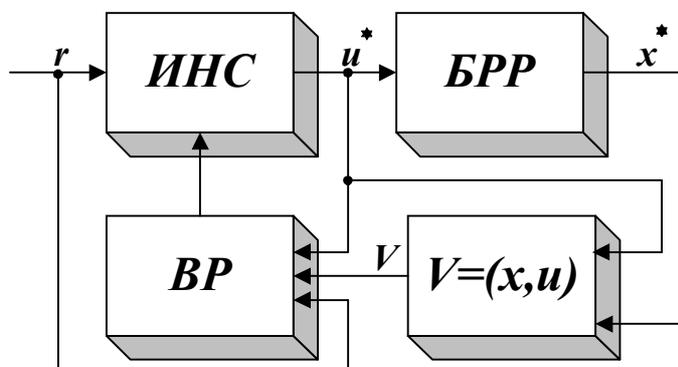


Рис.3. Структурная схема самообучения ИНС с использованием вектора ошибки

каких связей и с каким коэффициентом ошибки некорректно. Сформированный вектор ошибки V через алгоритм ВР инициализирует ИНС к уточнению решения, минимизируя свое значение.

В простейшем случае $V_u = u^* - u$, где u – допустимое по режиму решение. Но здесь требуется явное задание u , которое неизвестно. Обойти это условие позволяет сигнал $V_p = (u^*, x^*)$ рассогласования, определяющий позицию связи и уровень воздействия на нее для выявления корректного решения. Поскольку $F_{BP} = L\{r, u(t), V\}$, то новое решение находится с минимальным V . Динамический оператор L определяет класс обобщенных ошибок, что позволяет обучать сеть в реальном времени. Обобщенная ошибка $V = L\{V_p\}$ содержит информацию как об исходном состоянии объекта (распределительной сети) u^* , так и его изменениях $u(t)$ под воздействием V , что позволяет использовать стандартный алгоритм обучения ВР. Важным свойством алгоритма формирования ошибки V является обеспечение устойчивости решения при любой начальной ошибке.

Комплексный метод восстановления питания потребителей распределительной сети реализован на MS Visual C++, включает редактор визуального задания, отображения и корректировки схемы с вводом необходимых ее параметров и управлением процессами (рис. 4), а также нейронную сеть Neuro (разработана в Санкт-Петербургском электротехническом университете, руководитель – В.А.Терехов [15]). В окне отражаются собственно схема наблюдаемой

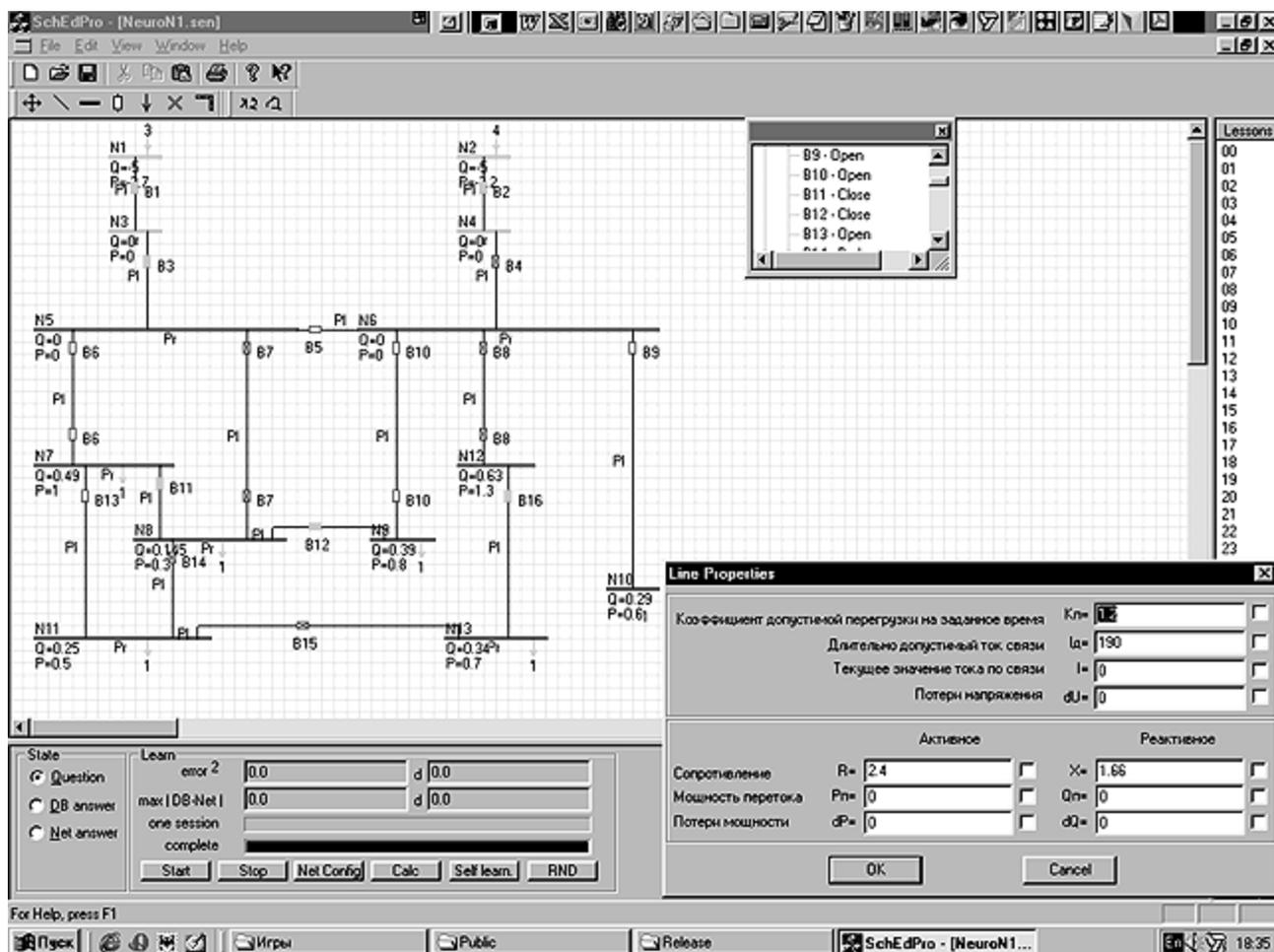


Рис. 4. Окно комплекса восстановления питания потребителей распределительной сети

части распределительной сети, цветом выделяются состояния: выключателей (включен, выключен, запрещен к включению), связей и шин (под напряжением, без напряжения, а для связей дополнительный цвет при их работе с допустимой перегрузкой), значения перетоков мощностей по связям и мощности нагрузок в узлах. По двойному щелчку мышкой на элементе сети в дополнительном окне выводятся напряжения и располагаемые мощности в узлах, а также длина, тип провода, сопротивления, допустимые и текущие значения токов по связям.

Тестовая схема включает 13 узлов (из них два головных питающих) и 16 связей (рис. 4, окно редактора). Простая ее конфигурация позволяет вручную проверить предлагаемые описанным методом решения, так как выбор необходимых схем подключения нагрузок не представляет труда. Реализация данного метода предполагается в Южных сетях АЭК «Комиэнерго».

Заключение

Предложенный метод позволяет с помощью средств вычислительной техники автоматизировать восстановление электроснабжения потребителей распределительной сети при авариях и режимных ограничениях и снизить вероятность ошибок персонала.

Особенностью метода является совместное применение конкурирующих процессов поиска решения алгоритмом обработки графов и нейросетью, использующих в конкретной ситуации преимущества каждого из них и снижающих время поиска.

При отсутствии готового решения в выборке обучения ИНС динамическое ее самообучение производится в реальном времени на основе разработанных методики и алгоритма определения обобщенного вектора ошибки. Найденное новое решение пополняет указанную выборку.

Опробование метода на тестовых схемах распределительной сети показало его работоспособность.

Дальнейшие методические исследования связаны с оптимизацией внутренней структуры ИНС для ускорения поиска решения при динамическом самообучении в реальном времени.

Литература

1. **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, N 4.- P. 136-1942.

2. **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, N 4. – P. 2064-2070.

3. **Popovic D.S., Ciris R.M.** A multi-objective algorithm for distribution network restoration // IEEE Trans. on PWRD. – 1999. – Vol.14, N3. – P.1134-1141.

4. **Успенский М.И., Старцева Т.Б., Шумилова Г.П.** Компьютеризация управления режимами на подстанциях. – Сыктывкар: изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1996. – 80 с.

5. **Любарский Ю.Я.** Интеллектуальные информационные системы.– М.: Наука, 1990. – 232 с.

6. **Hsu Yuan-Yih, Li-Ming Chen, Jian-Liang Chen.** Application of microcomputer-based database management system to distribution system reability evaluation // IEEE Trans. on PWRD. – 1990. – Vol. 5, N 1. – P. 343-350.
7. **Zhang Z.Z., Hope G.S., Malik O.P.** A knowledge-based approach to optimize switching in substations // IEEE Trans. on PWRD. – 1990. – Vol. 5, N 1. – P. 103-109.
8. **Dabbaghchi Iraj, Gursky Richard J.** An abductive expert system for interpretation of realtime data // IEEE Trans. on PWRD. – 1993. – Vol. 8, N 3. – P. 1061-1069.
9. **DeDermott T.E., Drezga I., Broadwater R.P.** A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration // IEEE Trans. on PWRS. – 1999. – Vol. 14, N 2. – P. 478-483.
10. **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 5th Annual Conf, vol.1, Tokio,1994. – P.19-24.
11. **Siqing Sheng, Youjiang Sun et al.** Random Adaptive Optimizer Restores Distribution Service // IEEE Comp. Appl. in Power, vol.13, N 2, 2000. – P.48-51.
12. **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: изд-во Коми НЦ УрО РАН, 2000. – С.274-278.
13. **Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.** Learning integral representations by error propagation // Parallel Distributed Processing, vol.1, N 8, 1986. – P.318-362.
14. **Успенский М.И., Кызродев В.И.** Использование искусственных нейронных сетей при поиске схемы восстановления электроснабжения // В кн. «Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием». – М.: ГУП изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2000. – С. 161-167.
15. **Нейросетевые системы управления/ В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин, В.Н. Антонов.** – СПб.: изд-во СПб университета, 1999. – 265 с.