

# О СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЯ ПРИ САМООБУЧЕНИИ НЕЙРОСЕТИ В ПРОЦЕССЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

*И.В. Кызродев, М.И. Успенский  
(ИСЭПС КНЦ УрО РАН, Сыктывкар)*

Восстановление электроснабжения потребителей в аварийных ситуациях и при режимных ограничениях – важная составляющая эксплуатационной надежности распределительных сетей. Эта задача из-за большого количества источников, потребителей и коммутирующих аппаратов сложна для нахождения приемлемого решения в условиях жесткого ограничения времени. Использование в ее решении аппарата нейронных сетей совместно с алгоритмом обработки графов обсуждалось раньше [1-4]. Такое сочетание позволяет существенно ускорить поиск решения, а использование самообучения искусственных нейронных сетей (ИНС) расширяет область вариации режимов.

Не останавливаясь детально на основных положениях работы [4], отметим, что отбор предлагаемых ИНС комбинаций состояния выключателей связей распределительной сети выполняется блоком расчета режимов (БРР). Он проверяет допустимость полученной комбинации по режимным условиям и формирует обобщенный вектор ошибки, управляющий поиском решения в ИНС. Очевидно, что такой процесс не должен приводить к ситуации, когда последняя предложенная комбинация: а) повторяет одну из предыдущих; б) находится дальше от требуемого решения, чем предыдущая. Удовлетворение этих условий определяет устойчивость и сходимость решения задачи поиска. Постановка подобной задачи при указанных условиях авторам не известна.

Опираясь на алгоритм обратного распространения ошибки (ВР) обучения ИНС, можно утверждать, что при заданном входном векторе нейросеть будет стремиться настроить свои весовые коэффициенты таким образом, чтобы получить на выходе требуемый отклик, заданный в нашем случае как разность текущего отклика нейросети и ошибки [5]. Таким образом, для доказательства устойчивости решения требуется показать сходимость ошибки рассогласования текущего и требуемого откликов ИНС.

Доказательство сходимости решения начнем с рассмотрения элементарного случая из трех линий связи, объединенных в треугольную схему распределительной сети (рис. 1). Для упрощения ситуации положим, что в узле  $x_3$  нет источников и нагрузок. На основе схемы методом перебора всех возможных ее вариантов построим состояния связей в режиме самообучения ИНС. Поскольку доказательство проводится для состояния выключателей связей, то целевым параметром рассматривается обеспечение потребителя активной мощностью. Ограничения по уровням напряжения в узлах и токов в связях возлагаются на БРР.

В табл. 1 показана реакция алгоритма формирования ошибки на все возможные комбинации состояний выключателей распределительной сети и откликов на них ИНС. Здесь ООВ – оперативные ограничения на выключатели распределительной сети: 1 – операции над выключателем разрешены, 0 – операции над выключателем запрещены. ИНС – состояние выключателей, предложенное ИНС: 1 – выключатель включен, 0 – выключатель отключен. БРР – состояние распределительной сети после работы БРР: 1 – выключатель включен, 0 – выключатель отключен. Ошибка  $n$ -го приближения: 1 – недопустимое по режиму включение связи, выявленное блоком

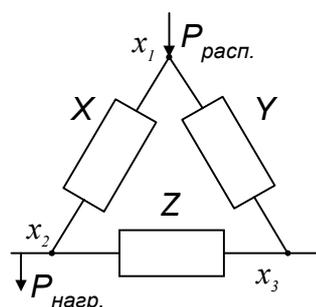


Рис. 1. Элементарная схема распределительной сети

формирования ошибки, входящим в БРР, после работы последнего.  $X, Y, Z$  – выключатели связей (рис.1).

Таблица 1

**Стадии формирования вектора ошибки по отношению ко всем возможным комбинациям состояния выключателей распределительной сети и отклика ИНС**

ООВ	ИНС	БРР	Ошибка 1-го приближения	Ошибка 2-го приближения	Ошибка 3-го приближения	№ комбинации
$XYZ$	$XYZ$	$XYZ$				
000	000	000	000			0,0
001	000	000	001			0,1
010	000	000	010			0,2
011	000	000	011			0,3
100	000	000	000			0,4
101	000	000	001	100	000	0,5
110	000	000	010	100	000	0,6
111	000	000	011	000		0,7
000	001	000	001	000		1,0
001	001	001	001	000		1,1
010	001	000	011	000		1,2
011	001	001	011	000		1,3
100	001	000	001	000		1,4
101	001	001	101	000		1,5
110	001	000	011	100	000	1,6
111	001	001	011	000		1,7
000	010	000	010	000		2,0
001	010	000	011	000		2,1
010	010	010	000			2,2
011	010	010	001	000		2,3
100	010	000	010	000		2,4
101	010	000	011	000		2,5
110	010	010	100	000		2,6
111	010	010	001	000		2,7
000	011	000	011	000		3,0
001	011	001	010	000		3,1
010	011	010	001	000		3,2
011	011	011	000			3,3
100	011	000	011	000		3,4
101	011	001	110	000		3,5
110	011	010	101	000		3,6
111	011	011	000			3,7
000	100	000	100	000		4,0
001	100	000	101	000		4,1
010	100	000	110	000		4,2
011	100	000	111	000		4,3
100	100	000	100			4,4
101	100	000	101	100	000	4,5 (!)
110	100	000	110	100	000	4,6 (!)
111	100	000	111	000		4,7
000	101	000	101	000		5,0
001	101	001	100	000		5,1
010	101	000	111	000		5,2
011	101	001	110	000		5,3
100	101	000	101	000		5,4

ООВ	ИНС	БРР	Ошибка 1-го приближения	Ошибка 2-го приближения	Ошибка 3-го приближения	№ комбинации
XYZ	XYZ	XYZ				
101	101	101	000			5,5
110	101	000	111	100		5,6 (!)
111	101	101	000			5,7
000	110	000	110	000		6,0
001	110	000	111	000		6,1
010	110	010	100	000		6,2
011	110	010	101	000		6,3
100	110	000	110	000		6,4
101	110	000	111	100		6,5 (!)
110	110	110	000			6,6
111	110	110	000			6,7
000	111	000	111	000		7,0
001	111	001	110	000		7,1
010	111	010	101	000		7,2
011	111	011	100	000		7,3
100	111	000	111	000		7,4
101	111	101	010	000		7,5
110	111	110	001	000		7,6
111	111	011	100	000		7,7

Поскольку для всех рассмотренных случаев после нескольких итераций вектор ошибки становится нулевым, то предположение о сходимости решения для схемы распределительной сети (рис. 1) можно считать доказанным. Отдельно следует остановиться на случаях, отмеченных знаком «(!)». Здесь на начальном этапе ошибка указывает на недопустимое по режимным условиям включение линии связи, которая впоследствии все же будет включена, но при другом, допустимом сочетании состояния выключателей. Это происходит из-за того, что блок формирования ошибки в исследуемой комбинации запрещает включение связи из-за режимных ограничений, но поиск правильного решения остается за ИНС.

Теперь рассмотрим случай распределительной сети из произвольного числа линий связи, источников и потребителей энергии. Обозначим  $V_k = 1$ , если узел  $k$  без напряжения, и  $V_k = 0$ , если узел  $k$  подключен корректно. Функция  $f_{\text{mod}}$  определена как сумма  $V_k$  всех

узлов, т.е.  $f_{\text{mod}} = \sum_{k=1}^n V_k$ , где  $n$  – количество узлов, а  $\min(f_{\text{mod}})$  – сумма всех  $V_k$ , которые в текущей конфигурации распределительной сети не могут быть обеспечены электроэнергией в силу режимных и других ограничений, например, при запрещенной к включению единственной линии связи.

По получению первого отклика ИНС ( $\bar{I}$ ) он проверяется в БРР, затем формируется вектор обобщенной ошибки ( $\bar{E}$ ) для текущего отклика. В итоге формируется некоторое решение (требуемый отклик)  $\bar{R}$ , к которому нужно привести текущий отклик, т.е.  $\bar{R} = \bar{I} - \bar{E}$ . Определение  $\bar{R}$  инициализирует алгоритм ВР. Весовые коэффициенты ИНС изменяются таким образом, чтобы  $\bar{I} \rightarrow \bar{R}$ . Как только  $\bar{I}$  изменится (изменится состояние хотя бы одной связи распределительной сети), процесс обучения останавливается, и по новому отклику ИНС  $\bar{I}_1$  формируется  $\bar{E}_1$  и  $\bar{R}_1$ , после чего снова запускается алгоритм обучения. Цикл обучения повторяется, пока  $f_{\text{mod}} > \min(f_{\text{mod}})$ .

Фактически при формировании  $\bar{E}$  происходит постоянное уточнение  $\bar{R}$ , пока  $\bar{R}$  не станет допустимым решением, т.е. выполнится равенство  $f_{\text{mod}}(\bar{R}) = \min(f_{\text{mod}}(\bar{R}))$ . Если доказать, что  $f_{\text{mod}}$  постоянно стремится к  $\min(f_{\text{mod}})$ , то будет доказано, что любую задачу можно решить за конечное число итераций, т.е. вычислительный процесс устойчив.

Исходя из структуры алгоритма формирования вектора ошибки [4], очевидно, что одновременно рассматривается только одна связь. Обозначим ее как связь  $X$ , в которой одну вершину назовем  $X_1$  а вторую –  $X_2$ . Тогда на период формирования вектора ошибки рассматриваемой связи весь остальной граф распределительной сети можно упростить одним из следующих способов:

1) если связь  $X$  (включена) имеет источник располагаемой мощности  $P_{\text{расп.}}$  (допустим в узле  $X_1$ ), а в узле  $X_3$  возможна некоторая располагаемая/потребляемая мощность  $P_{\pm}$ , то граф сворачивается до представленного на рис. 2. Таким образом, вся остальная распределительная сеть может быть свернута до условной связи  $Y$ , характеризующей возможность подать на  $X_1$  мощность из  $X_3$  (при наличии  $P_{\text{расп.}}$  и  $P_{\pm}$  операции над  $Y$  запрещены); связи  $Z$ , учитывающей возможность обеспечения нагрузки узла  $X_2$  через узел  $X_3$ , а также мощности  $P_{\pm}$ , которую можно получить/доставить через  $Z$  или  $Y$ . Здесь под  $P_{\pm}$  подразумевается то, что узел может быть источником электроэнергии, потребителем либо их комбинацией.  $P_{\pm}$  и  $P_{\text{расп.}}$  могут иметь как один корневой источник, так и разные. В таком виде сходимость графа распределительной сети рассмотрена в табл.1

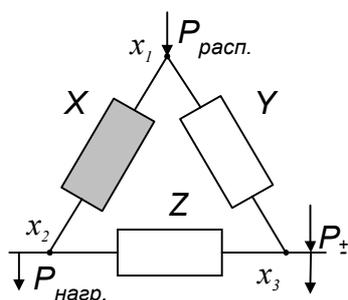


Рис.2. Схема распределительной сети из трех линий связи с располагаемой мощностью в  $X_1$ .

(комбинация 2,7). Если отсутствует/ запрещена к включению связь  $Z$ , то из табл.1 этому случаю соответствует комбинация 2,3; если отсутствует/ запрещена к включению связь  $Y$ , то из табл.1 – комбинация 2,6; а если отсутствуют/ запрещены к включению связи  $Z$  и  $Y$ , то из табл.1 – комбинация 2,2.

2) Если в узле  $X_1$  имеется  $P_{\text{расп.}}$ , а узел  $X_2$  обеспечен электроэнергией через связь  $Z$ , то распределительная сеть может быть свернута до представленной на рис. 3. В этом случае связь  $Y$  характеризует возможность передачи мощности в узлы  $X_1$  или  $X_2$  другим способом. Он рассмотрен в табл.1 (комбинация 4,7). Если отсутствует/ запрещена к включению связь  $Z$ , то из табл.1 – комбинация 4,6; если отсутствует/ запрещена к включению связь  $Y$ , то из табл.1 – комбинация 4,3; а если отсутствуют/ запрещены к включению связи  $Z$  и  $Y$ , то из табл.1 – комбинация 4,2.

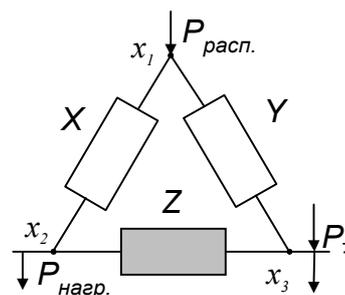


Рис.3. Схема распределительной сети с располагаемой мощностью в  $X_1$  и в  $X_2$ .

Очевидно, что два описанных выше случая являются почти идентичными и легко переходят один в другой заменой связи  $X$  на  $Z$  и наоборот, но в паре они демонстрируют, как будет вести себя обучение ИНС при нахождении лучшего варианта передачи мощности к уже обеспеченному энергией потребителю.

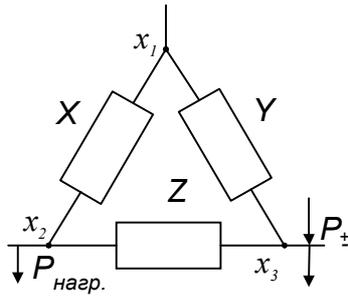


Рис.4. Схема распределительной сети без располагаемой мощности в  $X_1$  и  $X_2$ .

3) Если узлы  $X_1$  и  $X_2$  не подключены к источнику, то упрощенное представление графа распределительной сети соответствует рис. 4, где связь  $Y$  позволяет подключить узел  $X_1$ , а связь  $Z$  – узел  $X_2$ . Этот случай представлен в табл.1 (комбинация 0,7). Если отсутствует/ запрещена к включению связь  $Z$ , то из табл.1 ему соответствует комбинация 0,6; если отсутствует/ запрещена к включению связь  $Y$ , то из табл.1 – комбинация 0,3; а если отсутствуют/ запрещены к включению связи  $Z$  и  $Y$ , то из табл.1 – комбинация 0,2.

После формирования ошибки связи  $X=X_i$  программа переходит к формированию ошибки другой связи  $X=X_k$ , для которой снова рассматривается

упрощенное представление графа распределительной сети, причем  $X_i$  может теперь принадлежать как связи  $Y$ , так и  $Z$  нового свернутого графа.

Подобное выполняется для всех связей графа распределительной сети, после чего процесс формирования ошибки заканчивается и выполняется процедура обучения ИНС до изменения ее отклика. Таким образом, функция  $f_{\text{mod}}$  изменится в сторону уменьшения.

Далее процедура формирования обобщенной ошибки и обучения ИНС повторяется необходимое количество раз, пока не будет выполнено условие  $f_{\text{mod}} = \min(f_{\text{mod}})$ .

### Заключение

На основе анализа элементарной схемы и вариантов приведения схемы распределительной сети к элементарной схеме доказано, что каждая комбинация состояния выключателей в процессе поиска схемы восстановления распределительной сети не повторяется, и каждое последующее решение не увеличивает функцию поиска комбинаций  $f_{\text{mod}}$ , следовательно, решение устойчиво и сходится к  $\min(f_{\text{mod}})$ .

### Литература

1. Успенский М.И., Старцева Т.Б., Шумилова Г.П. Компьютеризация управления режимами на подстанциях. – Сыктывкар: изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1996. – 77 с.
2. Успенский М.И., Кызродев И.В. Совместное использование искусственных нейронных сетей и алгоритмов обработки графов при поиске схемы питания потребителей распределительной сети // В кн. «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Вып. 51. – Сыктывкар: изд-во Коми НЦ УрО РАН, 2000. – С. 274-278.
3. Успенский М.И., Кызродев И.В. 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.
4. Кызродев И.В., Успенский М.И. Самообучение искусственных нейронных сетей при восстановлении электроснабжения потребителей распределительной сети // В кн. «Труды Сыктывкарского лесного института». Т.3. – Сыктывкар: СЛИ, 2002. – С. 151-155.
5. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин, В.Н. Антонов. – С-Пб.: изд-во С-Пб. университета, 1999. – 265 с.