



УДК 681.518.5

© 2003 г. **В.В. Воронин**, канд. техн. наук,

А.С. Куминов

(Хабаровский государственный технический университет)

СТРУКТУРНАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассматривается алгоритм обучения диагностических моделей, приводится структурная диагностическая модель генератора постоянного тока в форме нейронной сети, анализируются результаты обучения данной модели.

Введение

Основное различие в подходах по разработке диагностических моделей (ДМ) на нейронных сетях (НС) заключается в особенностях используемых для моделирования знаний об объекте диагностирования (ОД). Эти особенности отражают степень изоморфизма модели объекту. Учитывая данный признак, можно создавать модели двух видов [1]. Первый вид – функциональные ДМ (ФДМ) в виде “черного ящика”. Они не обеспечивают свойство изоморфизма и используют формальный аппарат многослойных прямонаправленных НС прямого распространения. Второй вид – структурные диагностические модели (СДМ), элементы (ансамбли нейронов) которых соответствуют конструктивным блокам объекта. Такие модели поддерживают свойство изоморфизма, и их синтез ведется на базе иерархических, ядерных или рекуррентных нейронных сетей.

Алгоритм обучения структурных диагностических моделей

Хорошо зарекомендовавший себя для обучения ФДМ – метод обратного распространения ошибки [2] для СДМ применим ограниченно. Обучение СДМ по этому методу приведет к тому, что нейроны, соответствующие блокам ОД, будут неадекватно предсказывать дефекты, хотя сама сеть будет с достаточной надежностью оценивать степень работоспособности ОД.

Данное ограничение можно преодолеть. С этой целью известный алгоритм обратного распространения ошибки с “учителем” предлагается модифицировать. Сущность модификации заключается в том, что не используется обучение с “учителем” всей СДМ в целом, а обучаются отдельно и

поэтапно заранее определенные ансамбли нейронов. Каждый такой ансамбль взаимно однозначно соответствует определенному конструктивному блоку ОД. В теории нейронных сетей такие ансамбли называют ядрами. В СДМ допускаются разнообразные связи между ансамблями. Для каждого ансамбля на основе эксплуатационных данных формируется обучающая выборка.

Элементами обучающей выборки являются пары (набор значений диагностических показателей (ДП) блока, техническое состояние блока). Предлагаемая модификация ускоряет процесс обучения в сравнении с традиционным методом и снижает требования к обучающей выборке.

Формальное содержание процесса обучения СДМ с использованием механизма обучения ансамблей методом обратного распространения ошибки под управлением "учителя" оформлено как следующая процедура.

ШАГ 1. При заданной глубине поиска перечислить все диагностические блоки ОД. Объединить блоки в изоморфную СДМ.

ШАГ 2. Фиксировать i -й блок ОД и задать его ДП. Поставить в соответствие этому блоку подмножество M_i (ансамбль) нейронов СДМ.

ШАГ 3. Если входами подмножества M_i являются выходы подмножества M_j ($i \neq j$), учитывать их как обычные ДП.

ШАГ 4. Если выходы подмножества M_i являются входами другого подмножества M_j ($i \neq j$), с выходов которого получают данные (обратная связь), и все другие входы подмножества M_i заданы, перейти на *ШАГ 8*, иначе переход на *ШАГ 5*.

ШАГ 5. Если не все входы подмножества M_i заданы, следует перейти на *ШАГ 2*, иначе *ШАГ 6*.

ШАГ 6. Если подмножество M_i не обучено, обучить это подмножество методом обратного распространения ошибки либо на основе экспертных оценок изменений весов "учителем", иначе на *ШАГ 2*.

ШАГ 7. Если подмножество M_i обучено и является выходным в СДМ, перейти на *ШАГ 12*, иначе на *ШАГ 2*.

ШАГ 8. Получить текущие значения выходов подмножества M_j и использовать их как значения входов для подмножества M_i ($i \neq j$) вместе с набором его входных ДП. Обучить текущий ансамбль алгоритмом обратного распространения ошибки.

ШАГ 9. Полученные значения выходов обученного на *ШАГ 8* подмножества M_j использовать как значение входов для подмножества M_i ($i \neq j$) вместе с набором его входных ДП. Обучить его алгоритмом обратного распространения ошибки.

ШАГ 10. Если процесс обучения на *ШАГ 8* и *ШАГ 9* не сходится, выдать сообщение об ошибке, переход к *ШАГ 12*, иначе *ШАГ 11*.

ШАГ 11. Если приращения весов нейронов подмножеств достигли заданного значения точности – переход на *ШАГ 2*, иначе на *ШАГ 8*.

ШАГ 12. Останов.

К очевидным достоинствам предложенного алгоритма можно отнести следующее: возможность обучения на малых выборках ДП; возможность для субъекта диагностической деятельности интерактивно отслеживать динамику изменений весов нейронов ансамбля; возможность внешней корректировки значений весов, позволяющей повысить показатели адекватности модели, не имея полного набора ДП.

Диагностическая модель генератора

Рассмотрим в качестве примера СДМ – модель электрической машины постоянного тока с независимым возбуждением в режиме генератора [3]. Результат разработки этой модели в форме нейронной сети приведен на рис. 1.

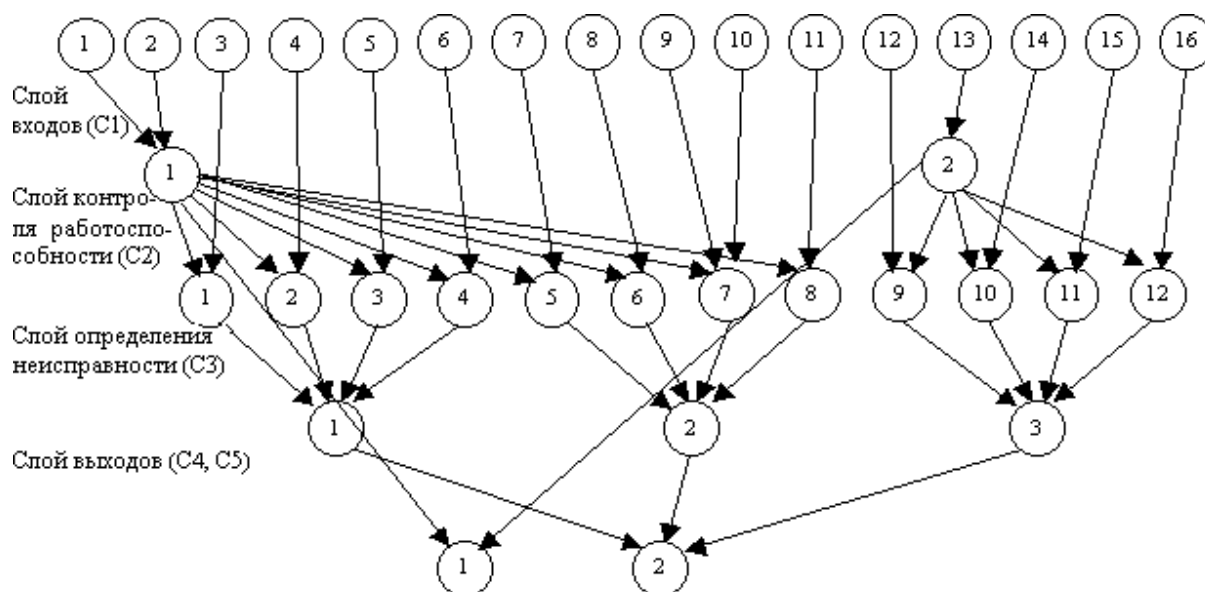


Рис. 1. Диагностическая модель генератора.

Выходами нейронов слоя C1 являются нормализованные текущие значения ДП генератора. Нейроны слоя C2 контролируют три критических ДП, они непосредственно влияют на нейроны выходного слоя C5. Нейроны слоя C3 позволяют фиксировать дефекты. Слой C4 введен для расширения информационной емкости механизма фиксации дефектов. Нейрон $H_{C5,1}$ – сигнализатор работоспособности ОД, а $H_{C5,2}$ – сигнализатор факта фиксации текущего дефекта. Таким образом, три критических ДП используются в СДМ для контроля работоспособности, а остальные – для фиксации дефектов.

Текущее значение выхода каждого нейрона нормализовано и принадлежит вещественному интервалу $[-5, 5]$, нижняя граница которого соответствует исправному ТС, а верхняя – неисправному ТС.

Содержательное описание функционального назначения каждого нейрона сети приведено в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение нейрона	Описание назначения
$H_{C1,1}$	Нейрон контроля ДП «Возбуждение генератора»
$H_{C1,2}$	Нейрон контроля ДП «Выходное напряжение генератора»
$H_{C1,3}$	Нейрон контроля ДП «Направление вращения якоря»
$H_{C1,4}$	Нейрон контроля ДП «Частота вращения якоря»
$H_{C1,5}$	Нейрон контроля ДП «Напряжение при разомкнутой обмотке возбуждения»
$H_{C1,6}$	Нейрон контроля ДП «Включение обмотки возбуждения»
$H_{C1,7}$	Нейрон контроля ДП «Сопротивление цепи обмотки возбуждения»
$H_{C1,8}$	Нейрон контроля ДП «Сопротивление изоляции обмотки возбуждения относительно корпуса и других обмоток»
$H_{C1,9}$	Нейрон контроля ДП «Сопротивление изоляции обмотки якоря относительно корпуса, проверенного методом падения напряжения»
$H_{C1,10}$	Нейрон контроля ДП «Наличие короткозамкнутых витков»
$H_{C1,11}$	Нейрон контроля ДП «Наличие обрыва в обмотке, проверенное методом падения напряжения»
$H_{C1,12}$	Нейрон контроля ДП «Зависимость напряжения генератора от нагрузки»
$H_{C1,13}$	Нейрон контроля ДП «Положения щеток относительно отметок на траверсе и щите машины»
$H_{C1,14}$	Нейрон контроля ДП «Температура щеток»
$H_{C1,15}$	Нейрон контроля ДП «Величина тока под нагрузкой генератора»
$H_{C1,16}$	Нейрон контроля ДП «Скорость вращения якоря под нагрузкой»
$H_{C2,1}$	Нейрон контроля проявления дефектов, вызывающих отсутствие возбуждения генератора либо выдачу им пониженного напряжения
$H_{C2,2}$	Нейрон контроля проявления дефектов, вызывающих сильное падение напряжения генератора при нагрузке
$H_{C3,1}$	Нейрон фиксации дефекта «Неправильное направление вращения»
$H_{C3,2}$	Нейрон фиксации дефекта «Недостаточная частота вращения»
$H_{C3,3}$	Нейрон фиксации дефекта «Потеря остаточного магнетизма в активном железе»
$H_{C3,4}$	Нейрон фиксации дефекта «Неправильное включение обмотки возбуждения»
$H_{C3,5}$	Нейрон фиксации дефекта «Обрыв цепи обмотки возбуждения»

Продолжение табл. 1

$H_{C3,6}$	Нейрон фиксации дефекта «Замыкание обмотки возбуждения на корпус или на другие обмотки»
$H_{C3,7}$	Нейрон фиксации дефекта «Замыкание между витками обмотки якоря или замыкание обмотки на корпус в двух или более местах»
$H_{C3,8}$	Нейрон фиксации дефекта «Обрыв в обмотке якоря»
$H_{C3,9}$	Нейрон фиксации дефекта «Неправильно установлены (сдвинуты) щетки»
$H_{C3,10}$	Нейрон фиксации дефекта «Плохой контакт в щетках и соединениях»
$H_{C3,11}$	Нейрон фиксации дефекта «Перегрузка генератора»
$H_{C3,12}$	Нейрон фиксации дефекта «Снижение скорости вращения приводного двигателя под нагрузкой»
$H_{C4,1}$	Нейрон повышения информационной емкости нейрона $H_{C5,2}$ выходного слоя сети
$H_{C4,2}$	То же
$H_{C4,3}$	То же
$H_{C5,1}$	Выходной нейрон контроля работоспособности объекта
$H_{C5,2}$	Выходной нейрон контроля факта фиксации дефекта

Значения возможных комбинаций выходов нейронной сети генератора представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение выхода		Текущее техническое состояние
$H_{C5,1}$ (Работоспособность)	$H_{C5,2}$ (Дефект)	
-5	-5	Объект работоспособен, дефектов нет
5	-5	Объект неработоспособен, дефекты не найдены
-5	5	Объект работоспособен, найден некритичный дефект
5	5	Объект неработоспособен, найден дефект
- 2.5 ÷ 2.5	–	Неопределенное состояние работоспособности
–	- 2.5 ÷ 2.5	Неопределенное состояние определения дефекта

В предложенной нейронной сети используется аналоговая модель формального нейрона с сигмоидной функцией активации [4], в которой пороговый коэффициент имеет фиксированное значение, равное “1”.

Для обучения сети необходимо подобрать такие данные, которые по-

зволят достичь четкого различения состояния работоспособности и четкой фиксации дефектов. Кроме того, данные должны уменьшать вероятность нечетких состояний нейронов (диапазон значений – от -2.5 до 2.5). В настоящий момент нет универсальных методов обучения нейронных сетей, поэтому обучение с "учителем" происходит на основе эмпирического анализа текущего состояния сети, динамики изменения ее коэффициентов, учета точности оценки входных значений, а также подбором скорости обучения. Используемый для обучения нейронной сети генератора алгоритм соединяет в себе автоматический метод задания набора входных параметров, оценку динамики изменения коэффициентов нейронов и эмпирическую оптимизацию параметров сети "учителем" (см. выше – алгоритм обучения СДМ).

Обученная нейронная сеть генератора способна устойчиво распознавать как одиночные, так и кратные дефекты в условиях зашумленности значений прямых показателей. Однако исследования модели показали, что ошибки в процессе локализации дефектов возможны. Такая ситуация возникает при значительных отклонениях ДП от номинальных значений, например, в области верхней границы долговечности объекта. Пример диагностического эксперимента на различных входных наборах ДП представлен в табл. 3.

Таблица 3

Выходы, нейроны слоя 5		Входы, нейроны слоя 1															
1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
-4.254	2.900	-4.7	-5.0	-4.8	-4.0	-5.0	3.9	-4.8	-4.5	-4.2	-4.9	-5.0	-4.2	-3.7	-4.4	-3.7	-4.6
-3.111	4.926	-3.7	-3.0	-3.8	-4.0	4.0	-3.9	-4.8	-3.5	-4.2	-4.9	-4.0	-4.2	3.7	-4.4	-3.7	-4.6
-3.771	-4.027	-3.7	-4.1	-3.8	-4.0	-2.7	-3.9	-4.3	-3.5	-4.2	-4.9	-4.0	-4.2	-3.7	-4.4	-3.7	-4.6
3.494	-0.234	-3.7	4.1	-3.8	-4.2	-4.7	-4.9	-4.4	-4.5	-4.2	-4.9	-4.0	-4.2	-3.7	-4.4	-3.7	-4.6
3.494	4.970	-3.7	4.1	-3.8	-4.2	-4.7	4.9	-4.4	-4.5	-4.6	-3.9	-3.0	-4.2	-3.7	-4.4	-3.7	-4.6

Проанализируем часть результатов моделирования процесса диагностирования из табл. 3. Первая строка таблицы имеет значения для выходных нейронов $НС_{5,1}=-4.254$, $НС_{5,2}=-2.900$. Значение $НС_{5,2}$ близко к границе неопределенного состояния нейрона -2.5. Этот результат на наборе входных ДП ($НС_{1,1}-НС_{1,16}$) может характеризовать сильную степень разрегулированности либо изношенности ОД. С другой стороны, значение $НС_{5,1}$, характеризующее общую работоспособность объекта, находится в пределах нормы. В целом для текущего технического состояния ОД можно сделать вывод о необходимости проведения технического обслуживания.

Во второй строке $НС_{5,1}=-3.111$, $НС_{5,2}=4.926$ состояние ОД характеризуется как работоспособное с фиксированным дефектом, а именно: недос-

таточная частота вращения якоря. Это состояние при повышенной нагрузке может перевести объект в неработоспособное состояние. Объект требует проведения незапланированного обслуживания и устранения дефекта.

В третьей строке $HC_{5,1}=-3.771$, $HC_{5,2}=-4.027$. ОД исправен.

В четвертой строке $HC_{5,1}=3.494$, $HC_{5,2}=-0.234$. Объект неработоспособен, дефект не найден. Значение выходного нейрона $HC_{5,2}$ находится в диапазоне неопределенного значения. Все прямые ДП в пределах нормы, но с сильными отклонениями от номинальных значений, что указывает на две возможные причины: объект изношен либо разрегулирован; объект эксплуатируется в недопустимых условиях окружающей среды. Требуется вмешательство оператора.

В пятой строке $HC_{5,1}=3.494$, $HC_{5,2}=4.970$. ОД неработоспособен, так как не соответствует норме выходное напряжение; фиксированный дефект – неправильное включение обмотки возбуждения.

Заключение

Разработанный алгоритм обучения позволяет настроить коэффициенты нейронной сети, выполняющей функции структурной ДМ. Такая модель обеспечивает хорошие показатели качества процесса поиска дефектов в диагностическом эксперименте. Алгоритм обучения сети предлагается использовать для настройки ДМ в рамках экспертных диагностических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронин В.В.* Диагностирование технических объектов. Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002.
2. *Нейронные сети. Введение в современную информационную технологию /И.С.Суровцев, В.И.Клюкин, Р.П.Пиоварова.* Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 1994.
3. *Общее руководство по ремонту ракетно-артиллерийского вооружения. Часть 1. Общая часть.* М.: Ордена Трудового Красного Знамени военное изд-во Министерства обороны СССР, 1983.
4. *Сигеру Омату.* Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. М.: ИПРЖР, 2000.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.