

УДК 62-52-83:656.56

А.В. Серебряков

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОНОМНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Предложен подход к прогнозированию технического состояния автономного генераторного комплекса, основанный на применении аппарата искусственных нейро-нечетких сетей, которые позволяют предсказывать значение прогнозируемой величины с учетом внешних факторов, таких как условия эксплуатации и износ оборудования.

*Ключевые слова:* автономный генераторный комплекс, прогнозирование, нечеткая логика, техническое состояние.

### Введение

Большая территория РФ с различными климатическими поясами и низкой плотностью населения обуславливает необходимость обеспечения энергией удаленных от центральных электросетей районов. В отечественной и мировой электроэнергетике за многие годы накоплен достаточно большой опыт по созданию и использованию автономных генераторных комплексов на основе комбинированных источников энергии, имеющих высокие перспективы применения в настоящее время [1]. Применение автономных генераторных комплексов в отдаленных районах для питания потребителей первой и первой особой категории неминуемо приводит к высоким требованиям по надежности и бесперебойности работы [2, 3]. В связи с этим, задачи создания и/или усовершенствования системы диагностики и прогнозирования технического состояния создаваемого автономного генераторного комплекса являются, безусловно, актуальными [4].

Решение задач диагностики неразрывно связано с прогнозированием надежности на ближайший период эксплуатации, до следующего технического осмотра, капитального ремонта и т.д. В связи с возрастающей ролью автоматических и автоматизированных систем возрастает также значение прогнозирования их состояния. Без прогноза затруднительно управлять состоянием системы, нельзя своевременно предупреждать аварийные ситуации. Использование теории и методов прогнозирования для анализа надежности изделий создает возможность существенно повысить эффективность оценки надежности их на различных этапах разработки, изготовления и эксплуатации.

С появлением технических систем, выполняющих ответственные функции, возрастает роль предвидения технического состояния в некоторый будущий отрезок времени для своевременного принятия мер по предотвращению отказов. В процессе развития техники возникла задача управления техническим состоянием больших систем путем своевременного переключения на резерв, своевременного перехода на новые рабочие режимы и т. п. Таким образом, новые этапы развития техники вызвали к жизни новую техническую проблему - проблему прогнозирования технического состояния [5, 6].

В зависимости от прогнозируемых параметров и целевой направленности прогнозирования выбираются имеющиеся методы и математический аппарат.

Множество и размер классов определяются специфическими техническими особенностями прогнозируемых объектов. Методы, основанные на отнесении исследуемых объектов к одному из классов, будем называть методами статистической классификации. В них используется аппарат теории распознавания образов, а также теории искусственных нейронных сетей [7-9].

## Прогнозирование с помощью гибридной нейронной сети

Алгоритмы распознавания в технической диагностике частично основываются на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов. Важной частью проблемы распознавания являются правила принятия решений (решающие правила). Решение диагностической задачи, отнесение изделия к исправным или неисправным всегда связано с риском ложной тревоги или пропуска цели.

Нейро-нечеткая сеть представляет собой многослойную нейронную сеть специальной структуры без обратных связей, в которой используются обычные (нечеткие) сигналы, веса и функции активации, а выполнение операции суммирования основано на использовании фиксированной Т-нормы, Т-конормы или некоторой другой непрерывной операции. При этом значения входов, выходов и весов гибридной нейронной сети представляют собой вещественные числа из отрезка от 0 до 1.

Назначение нейро-нечетких сетей - извлечение знаний для реализации нечетких правил на базе нейронных сетей. Такой подход позволяет компенсировать один из главных недостатков нейронных сетей, который состоит в том, что ответ нейронных сетей является не прозрачным. Сама нейронная сеть - это черный ящик, т.е. объяснить ответ невозможно. Этот подход позволяет реализовать функцию объяснения для нейронных сетей.

Перспективным направлением в области решения задач прогнозирования является применение аппарата искусственных нейро-нечетких сетей.

Нечеткие нейронные, или гибридные, сети призваны объединить в себе достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода. С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, которые обладают наглядностью и простотой содержательной интерпретации. С другой стороны для построения правил нечетких продукций используются методы нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом для системных аналитиков.

Основная идея, положенная в основу модели гибридных сетей, заключается в том, чтобы использовать существующую выборку данных для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе нечеткого вывода. При этом для прохождения параметров функции принадлежности используются известные процедуры обучения нейронных сетей.

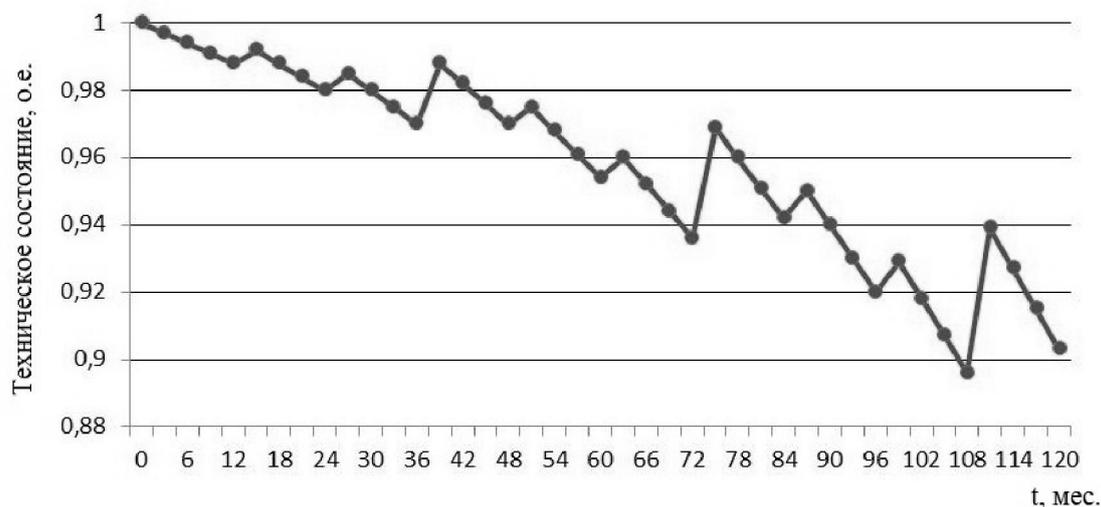
Гибридная сеть обучается с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Этот алгоритм представляет собой итеративный градиентный алгоритм минимизации среднеквадратичного отклонения значений выхода от желаемых значений (минимизации ошибок) в многослойных нейронных сетях.

Разработаем нечеткую модель гибридной сети для прогнозирования технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки. Суть данной задачи состоит в том, что зная динамику изменения состояния системы за фиксированный интервал времени, спрогнозировать значения состояния системы на определенный момент в будущем.

Традиционно для решения данной задачи применяются различные модели технического анализа, основанные на использовании различных индикаторов. В то же время наличие неявных тенденций в динамике изменения технического состояния позволяет применить модель адаптивных нейро-нечетких сетей.

В качестве исходных данных воспользуемся информацией о динамике изменения технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки за некоторый временной интервал. На рис. 1 представлена динамика состояния системы за десять лет эксплуатации, шаг проверки технического состояния автономной элек-

тростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки три месяца. График построен по результатам наблюдений за техническим состоянием автономной электростанции. Методика оценки фактического технического состояния подробно описана [10-12]. Следует отметить, что при оценке технического состояния системы использовано более 30 факторов, влияющих на состояние системы, а также учтено проведение профилактического ТО один раз в год и планового ТО один раз в три года.



**Рис. 1. Динамика технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки за 120 месяцев**

Для дальнейшего использования данных произведем оцифровку с графика и представим динамику в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Динамика технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки за 120 месяцев**

№	Т, мес.	sys	№	Т, мес.	sys
1	2	3	4	5	6
1	0	1	21	60	0,954
2	3	0,997	22	63	0,96
3	6	0,994	23	66	0,952
4	9	0,991	24	69	0,944
5	12	0,988	25	72	0,936
6	15	0,992	26	75	0,969
7	18	0,988	27	78	0,96
8	21	0,984	28	81	0,951
9	24	0,98	29	84	0,942
10	27	0,985	30	87	0,95
11	30	0,98	31	90	0,94
12	33	0,975	32	93	0,93
13	36	0,97	33	96	0,92
14	39	0,988	34	99	0,929

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
15	42	0,982	35	102	0,918
16	45	0,976	36	105	0,907
17	48	0,97	37	108	0,896
18	51	0,975	38	111	0,939
19	54	0,968	39	114	0,927
20	57	0,961	40	117	0,915

Предположим, что нечеткая модель гибридной сети будет содержать 4 входных переменных. При этом первая входная переменная будет соответствовать на текущий момент, вторая – на предыдущее время ( $t-1$ ), третья переменная на время ( $t-2$ ), а последняя - ( $t-3$ ).

Перед генерацией структуры системы нечеткого вывода типа Сугено после вызова диалогового окна свойств зададим для каждой из входных переменных по 3 лингвистических термина, а в качестве типа их функций принадлежности выберем треугольные функции.

Для обучения гибридной сети воспользуемся гибридным методом обучения с уровнем ошибки 0, а количество циклов обучения зададим равным 10. После окончания данной гибридной сети выполним анализ графика ошибки обучения и представим его на рис. 2.

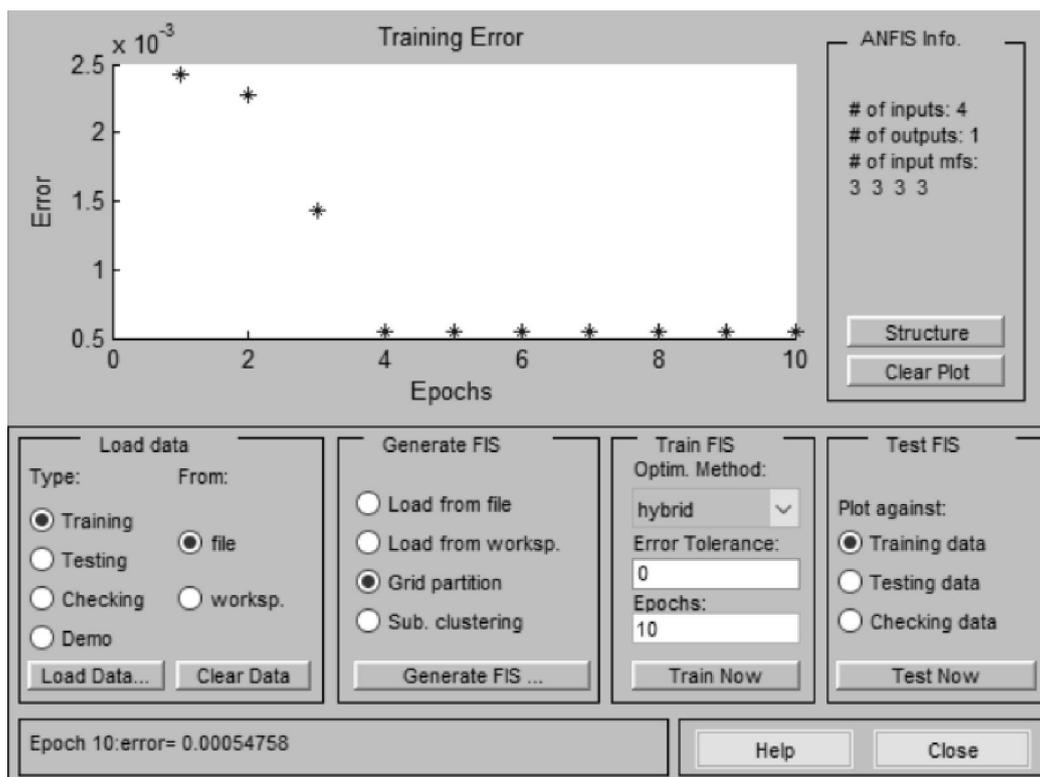


Рис. 2. График зависимости ошибки обучения от количества циклов обучения

Обучение гибридной нейронной сети завершилось после 4-го цикла. Графическая наглядность структуры нечеткой модели предельно затруднена, поскольку количество правил в разработанной адаптивной системе равно 81.

Проверка адекватности построенной нечеткой модели гибридной сети проводится при помощи ретроспективного прогноза значения технического состояния на будущее время, например, на 120-й месяц, считая для этого случая текущим 108-й месяц.

Разработанная нечеткая модель прогнозирует значение выходной переменной для будущего времени, а именно, 120-го наблюдения, равное 0.862

Сравнивая полученное значение с соответствующим значением из табл. 1, которое равно 0.903, оцениваем точность прогнозирования по формуле (3).

$$OO = \frac{|Z(t) - Z^{\wedge}(t)|}{Z(t)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $Z(t)$  – фактическое значение в момент времени  $t$ ;  $Z^{\wedge}(t)$  – прогнозное значение.

Вычислим относительную ошибку прогнозирования:

$$OO = \frac{|0.903 - 0.862|}{0.903} \cdot 100\% = 4,5\%. \quad (2)$$

### Выводы

Предложен подход к прогнозированию технического состояния автономных генераторных комплексов, основанный на применении аппарата искусственных нейро-нечетких сетей, которые позволяют предсказывать значение прогнозируемой величины с учетом внешних факторов, таких как условия эксплуатации и износ оборудования. Построена нейро-нечеткая модель гибридной сети для прогнозирования технического состояния автономного генераторного комплекса. Проведена проверка адекватности построенной нечеткой модели гибридной сети при помощи ретроспективного прогноза, показавшая относительную ошибку прогнозирования, не превышающую 5%.

### Библиографический список

1. **Макриденко, Л.А.** Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики / Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, А.П. Сарычев. – М., 2017 – 146 с.
2. **Thorsen, V.** Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry // Proc 8a IEE Int Conf, EMD'97, University of Cambridge. – № 444. – P. 109–113.
3. **Серебряков, А.В.** Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 3. – С. 39–46.
4. **Серебряков, А.В.** Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2015. – № 2 (109). – С. 203–209.
5. **Серебряков, А.В.** Энергоэффективные ветроэнергетические установки с оперативной диагностикой для автономных систем электроснабжения: дисс. ... канд. техн. наук по спец. 05.09.03 / ИГЭУ. – Н.Новгород, 2013. – 171 с.
6. **Васенин, А.Б.** Как повысить энергоэффективность ветроэнергетической установки / А.Б. Васенин, В.Г. Титов // Главный энергетик. – 2015. – № 1. – С. 58–6.
7. **Стеклов, А.С.** Система диагностики технического состояния судового синхронного генератора // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 60–64.
8. **Стеклов, А.С.** Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 97–104.
9. **Лукьянов, С.И.** Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2014. – №1(45). – С. 129–134.
10. **Стеклов, А.С.** Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 97–104.

11. **Стеклов, А.С.** Нейро-нечёткое моделирование степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – №3. – С. 39–43.
12. **Стеклов, А.С.** Новый алгоритм технического диагностирования гребных электродвигателей / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник южно-уральского государственного университета. Сер.: энергетика. – 2017. – № 2. – С. 82–88.

*Дата поступления  
в редакцию 16.04.2018*

**A.V. Serebryakov**

### **FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF AUTONOMIC GENERATOR COMPLEXES**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

**Purpose:** An approach to forecasting the technical state of an autonomous generator complex.

**Design/methodology/approach:** The approach is based on the use of the device of artificial neural-fuzzy networks, which allow predicting the value of the predicted value taking into account external factors, such as operating conditions and equipment wear.

**Findings:** A neuro-fuzzy model of a hybrid network was constructed to predict the technical state of an autonomous generator complex. The adequacy of the constructed fuzzy hybrid network model was checked with the help of the retrospective forecast, which showed a relative error of forecasting not exceeding 5%.

**Research limitations/implications:** The proposed method of prediction can be applied to various electrical systems.

**Originality/value:** The purpose of further research is to improve the accuracy of predicting the technical state of autonomous generator complexes.

*Key words:* Autonomous generator complex, forecasting, fuzzy logic, technical condition.