

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 62-52-83:656.56

Крюков О.В., Серебряков А.В.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРО-ПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрены вопросы проектирования эффективных и достоверных систем оперативной диагностики электродвигателей электроприводных компрессорных станций. Представлены архитектура и методология искусственных нейронных сетей для получения прогнозных моделей электрических машин мегаваттного класса, а также результаты анализа ожидаемых состояний объектов магистрального транспорта газа.

Ключевые слова: электроприводные компрессорные станции, газоперекачивающие агрегаты, электродвигатели мегаваттного класса, искусственные нейронные сети, тесты селекционированных сетей, нечеткая модель Бокса-Дженкинса, метод анализа динамики спектральных составляющих, прогнозирование величин тока и температур статора.

ВВЕДЕНИЕ

Как показали данные статистики и нормативно-технической документации, все технологические установки компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов относятся к опасным производственным объектам [1], и поэтому разработка систем мониторинга их состояния – задача первого приоритета при проектировании газотранспортных систем. Современные электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) как объекты диагностики представляют собой сложную и пространственно-распределенную техническую систему с разнородными элементами [2-4]. Статистика 131 случаев отказов ЭГПА на 6 КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» в 2006-2014 гг. показала, что наиболее тяжелым ЭГПА по затратам и времени восстановления является выход из строя приводного электродвигателя и, особенно, пробой изоляции статора [5-9].

Для 60 электродвигателей типа СТД-12500-2 и СДГ-12500 за период эксплуатации с 1987 по 2014 год выполнены измерения основных параметров их работы в различных режимах работы в условиях действующих компрессорных цехов и выявлены наиболее характерные виды повреждений. Проведен комплексный анализ и определены 4 группы эксплуатационных факторов [6-9], влияющих на ресурс электродвигателей ЭГПА: нагрев изоляции обмоток статора, изменения параметров питающего напряжения, электродинамические нагрузки в стержнях и частичные разряды в изоляции обмоток.

МЕТОДОЛОГИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭГПА

В настоящее время существует хорошо апробированный в некоторых технических системах математический аппарат автоматизированной настройки параметров диагностических алгоритмов на основе применения *искусственных нейронных сетей* (ИНС), объединенных в систему принятия решений (СПР) по идентификации различных дефектов [1-5].

Особенностью ИНС является то, что она обладает характеристиками, позволяющими автономно решать проблемы классификации переменных объекта и их

форм, а также самообучения алгоритмам прогнозирования, исходя из опыта отказов. ИНС позволяет разработать непараметрическую модель, которая может воспроизвести любое исправное/неисправное техническое состояние (ТС) ЭГПА и аппроксимировать свою идентификацию.

Такая модель способна запоминать примеры событий, распределяя на их основании веса соединений структуры, вплоть до устранения нейронов или соединений, которые не влияют на запоминание этих примеров.

Архитектура встроенных систем мониторинга и прогнозирования (ВСМП) ТС ЭГПА на ИНС представляет собой 2 подсистемы:

- подсистема приема и обработки информации, которая соответствует ВСМП работы СТД-12500-2 ЭГПА с приемом данных по ТС приводного высоковольтного синхронного двигателя (ПВСД) и их последующую обработку (распределение данных и оценку переменных);
- подсистема интерпретации полученной информации о ТС с использованием алгоритмов ИНС с распознаванием неисправностей и рекомендациями по реализации дальнейших ее действий (**рис. 1**).

Порядок построения ИНС ПВСД

Применение при прогнозировании ТС ЭГПА большого числа контролируемых переменных ПВСД (напряжений, токов, частичных разрядов и температуры обмоток статора) позволяет увеличить достоверность процедуры мониторинга и сделать ее более эффективной. Для реализации модуля ИНС вначале определяют его размеры, т.е. число ее входов и выходов (у нас целесообразно эти значения выбрать равными 3 и 1).

Затем архитектура сети формируется исходя из алгоритма обучения и минимизации среднеквадратической ошибки результатов мониторинга и перспектив прогнозирования ТС ПВСД с определением остаточного ресурса.

Прежде чем встраивать блок ИНС (рис. 1) в подсистему интерпретации информации в структуре ВСМП, необходимо изучить функционирование трех ИНС с входами различной архитектуры. При этом входы данных трех ИНС не одного и того же размера, а следовательно, и их структуры, выбранные после фазы

обучения, будут отличаться и иметь разное число внутренних слоев и число нейронов в этих слоях. В результате выбора наиболее целесообразной сети ВСМП ТС ПВСД на основе объемного параметрического исследования трех ИНС необходимо принять следующие 4 решения.

1. *Окончательный выбор диагностируемых переменных.* Наиболее информативными входными переменными, характеризующими ТС изоляции обмотки статора СТД-12500-2, являются температура меди, интенсивность частичных разрядов (ЧР) и уровень перенапряжений питающей сети. Это обусловлено тем, что, как показали экспериментальные исследования в натурных условиях различных компрессорных станций (КС), именно эти параметры могут адекватно оценить ТС и заранее спрогнозировать наступление нештатных режимов. К тому же эти переменные доступны прямому измерению штатными техническими средствами и непосредственному их представлению в нейронной базе знаний (НБЗ). В публикациях [1-3,6-7] представлены результаты замеров данных эксплуатационных факторов и общая статистика наблюдений за период

1985-2010 гг. с фиксацией 62 случаев выхода из строя СТД-12500-2.

2. *Конструкция НБЗ.* Для создания на основе ИНС модели, описывающей исправное и неисправное состояние статорной обмотки ПВСД ЭГПА, необходимо создать такую оптимальную конструкцию НБЗ, в которой содержалась бы достаточная информация о возможных дефектах, возникающих в различных режимах работы ЭГПА-12,5. Для этого на основе анализа существующей статистики неисправностей (и симуляции возможных нарушений) машины СТД-12500-2 все они группируются в 12 видов (включая исправные состояния), и по каждому состоянию оцениваются текущие изменения трех выбранных ранее входных переменных в течение всего периода измерений. В итоге НБЗ каждой переменной составила 3000 различных значений (векторов), характеризующих возможные режимы работы электродвигателя. Это значение, соответствующее количеству замеров и результатов поставленных экспериментов, необходимо ввести в конструкцию ИНС (табл. 1).

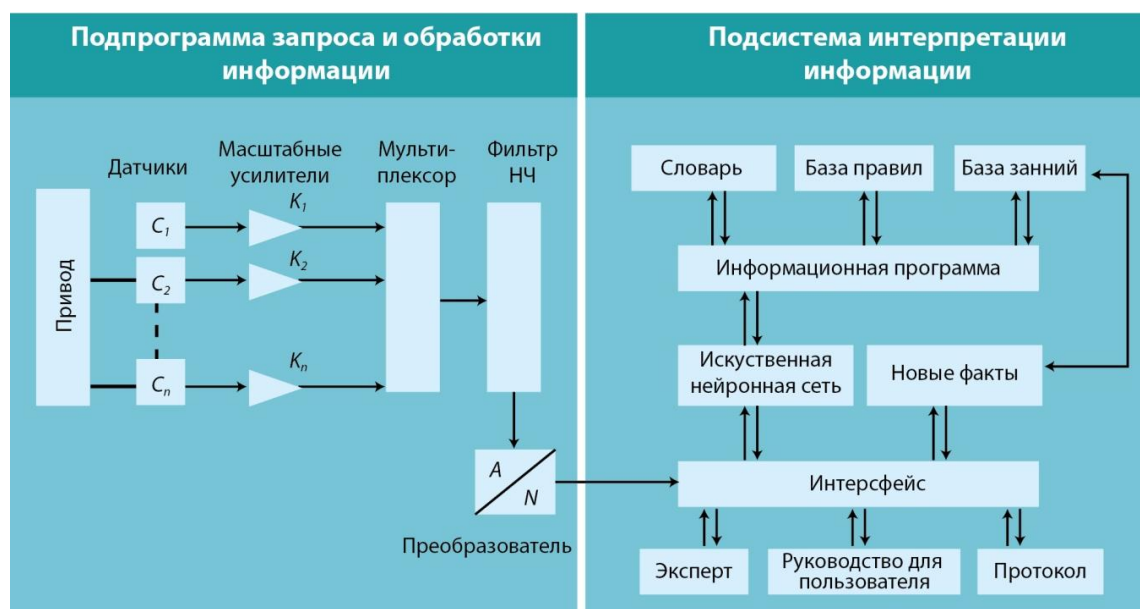


Рис. 1. Архитектура автоматизированной ИНС ПВСД ЭГПА

Таблица 1

Конструкция НБЗ на основе ИНС

Тип неисправности обмотки статора	Символ	Код ИНС
Перегрев в пазовой части расточки		000 000 000 001
Перегрев в лобовой части обмотки		000 000 000 010
Перегрев на выводах		000 000 000 100
Перегрев при запуске агрегата		000 000 001 000
Перенапряжения выхода из синхронизма		000 000 010 000
Перенапряжения при дребезге контактов		000 000 100 000
Перенапряжения при ОЗЗ		000 001 000 000
Перенапряжения при МКЗ		000 010 000 000
Загрязнение масляно-графитовой смесью		000 100 000 000
Дефект изоляции в пазовой части		001 000 000 000
Дефект изоляции в лобовой части		010 000 000 000
Отсутствие признаков дефектов изоляции	QN	100 000 000 000

3. *Создание блока ИНС.* Определившиеся нейронные сети являются многоуровневыми с оптимальным алгоритмом своего обучения. Для встраивания блока ИНС в ВСМП ПВСД предлагается исследовать 3 нейронные сети. После фазы их тестирования и сравнения между собой можно выбирать наиболее подходящую для решения всего комплекса задач прогнозирования ИНС. При этом этапы конструирования и пригодности нейронных сетей разделяются на три фазы (рис. 2). Первая связана с выбором входов и конструкцией НБЗ исходя из файлов, полученных при анализе всех упомянутых трех параметров мониторинга. Вторая связана с выбором выходов сетей (для каждой отдельно) и их кодов, а третья – с выбором архитектуры сетей.

4. *Определение тестов селекционированных сетей.* При числе используемых входов блока ИНС, равном десять (на рис. 2 – $p = 10$) для каждой контролируемой переменной в табл. 2 приведены полученные результаты тестирования по [1-3].

Для трех сетей этап селекционирования выполняется после того, как вторая сеть завершает свое тестирование после 148 презентаций каждого примера. При этом тестирование выполняется в 2 этапа: на первом сеть делает 100 повторяющихся исследований для каждого примера неисправного состояния, на втором – они вновь вводятся в программу тестирования, которая прекращается после 48 итераций со среднеквадратичной ошибкой результатов тестирования, равной $3,7 \text{ Be}^{-16}$ (рис. 3).

Таблица 2

Номер ИНС	Результаты тестирования трех ИНС			
	Число нейронов			
	Входной слой	Внутренний слой	Выходной слой	Среднеквадратичная ошибка
1	10	13	11	$3,24221 \text{ e}^{-15}$
2	20	8	11	$3,71314 \text{ e}^{-16}$
3	30	6	11	$3,26580 \text{ e}^{-17}$

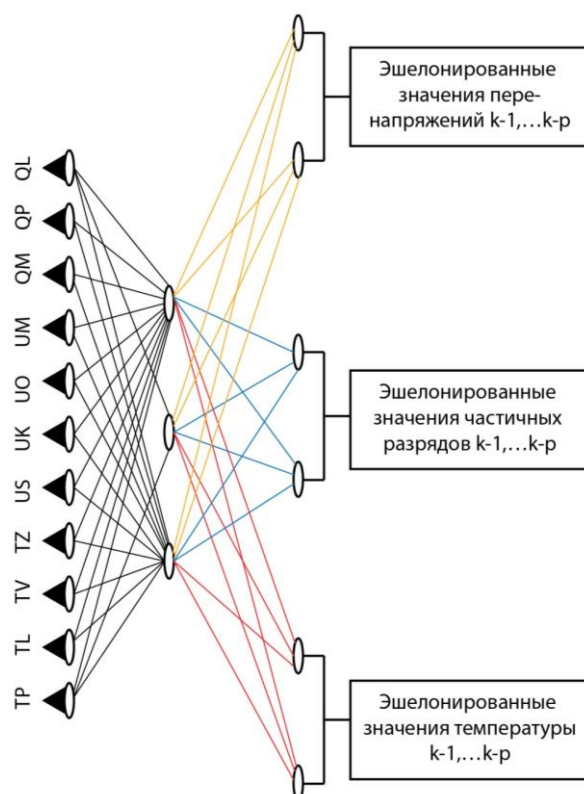


Рис. 2. Структура третьей ИНС

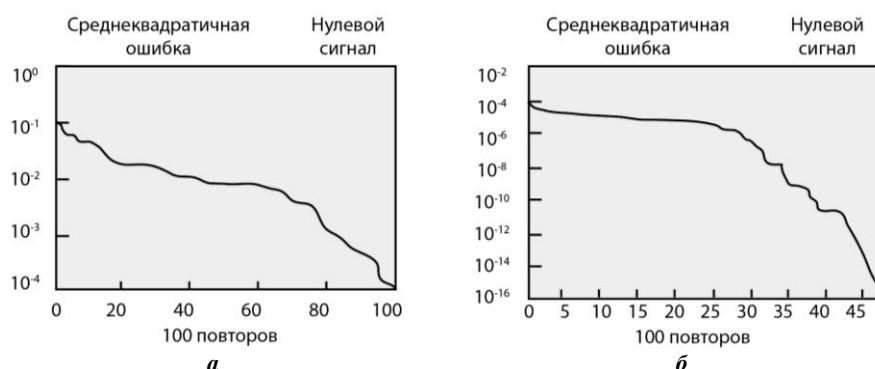


Рис. 3. Эволюция среднеквадратичной ошибки для ИНС

ТЕСТЫ СЕТЕЙ НЕЙРОНОВ

После построения трех сетей нейронов и достижения желаемых точностных показателей при их обучении важнейшим этапом становится их комплексное сопоставление между собой. При этом сравнение производится путем тестирования входов и выходов каждой ИНС. Эта процедура связана с фазой обучения и определением базы тестов, с помощью которых приступают к тестированию способности ИНС распознавать «скрытые» дефекты, ранее не рассматриваемые при оценке работоспособности ЭГПА, и оценки способность ИНС к обобщению результатов.

Так, ВСМП технического состояния ПВСД типа СТД-12500-2 предусматривал выбор из трех ИНС (см. **рис. 2**) наилучшей сети путем тестирования их для ранее приведенных дефектов (см. **табл. 1**). Он позволил идентифицировать их с большой точностью, что подтверждается значениями среднеквадратичных ошибок результатов диагностирования, близких к нулю (см. **табл. 2**). При тестировании третьей сети для дефектов СТД-12500-2, которые были изучены на фазе обучения сети, результаты ее моделирования для неисправностей, связанных с перегревом в пазовой части расточки, представлены в **табл. 3**.

Здесь представлены выходы третьей сети при различных относительных нагрузках механической характеристики электродвигателя. Первая строчка **табл. 3** соответствует дефекту, рассмотренному в данной тестовой фазе, т.е. при перегреве изоляции статорной обмотки СТД-12500-2 в ее средней части расточки. Данный дефект был распознан почти на 100 % для большинства режимов работы ЭГПА. Для других режимов работы результаты тестирования входных переменных ИНС заметно не отличаются. Так, например, минимальное значение результатов тестирования, соответствующих рассматриваемому дефекту, равнялось 0,857, что близко проявлению того же дефекта в режиме 40 % номинальной нагрузки ПВСД.

Таблица 3

Результаты тестирования третьей ИНС

Выходы ИНС	Нагрузка, % номинала					
	90	80	60	40	20	10
1	1,0000	1,0000	1,0000	0,8570	1,0000	0,9605
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005
3	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0034
4	0,0049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0057	0,0000	0,0000
8	0,2310	0,0000	0,0067	0,0000	0,0000	0,0000
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Согласно анализу результатов, полученных на фазе теста всех трех ИНС, выявлено, что третья сеть нейронов (см. **табл. 2** и **табл. 3**) наиболее производительна и, следовательно, именно она целесообразна для применения в ВСМП ЭГПА. Что же касается выходов третьей сети, которые близки к желаемому значению, они должны быть приближены к «0» или к «1», чтобы

обеспечить достоверность идентификации неисправности в изоляции статора ПВСД с указанием первопричины и места его появления. При этом обоснование объективных рекомендаций для устранения подобных неисправностей является главным результатом работы ВСМП на базе ИНС.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТС ЭГПА

Для сопоставления достоверности результатов прогнозирования ТС ПВСД ЭГПА различными методами рассмотрим тренд, описывающий суточные колебания температуры статора СТД-12500-2 в процессе эксплуатации ЭГПА (**рис. 4**, кривая *a*) и произведем анализ эффективности инерционных прогностических методов. Для этого известный временной ряд, описывающий изменение температуры, разобьем на две части, первая из которых будет являться основанием прогноза, а вторая – для проверки апостериорной точности прогноза.

Применение методов на основе нечетких (ARMA-моделей, в частности, использовался метод Бокса-Дженкинса) [1] возможно, так как числовой ряд разностей первого порядка температурного временного ряда является стационарным. Из графика **рис. 4** видно, что методы на основе моделей Бокса-Дженкинса дают очень оптимистичный прогноз с возрастающим трендом (кривая *б*). На основе полученных данных нельзя достоверно определить момент выхода значений температуры за допустимые пределы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 23–58% ($\bar{A} = 0,23 - 0,58$).

Так же для проверки эффективности использовался вышеописанный метод на основе ИНС. Для этого использовалась сеть Ворда, на входы которой подавались предыдущие значения временного ряда. Выбор именно этого типа связан с тем, что ИНС данного типа способны производить классификацию значимости входных значения. Моделирование показало, что построенная и обученная ИНС на границе неопределенности температурного временного ряда позволяет определить общую тенденцию повышения температуры, но дает пессимистичный прогноз (кривая *б*). В результате можно определить тенденции развития процесса, но достоверно определить момент выхода значений температуры за пределы допустимых значений нельзя. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 16–46% ($\bar{A} = 0,16 - 0,46$).

Для прогнозирования тренда температуры методом временных рядов (АДСС) [4] использовалась предыстория температурного ряда размером $N=400$ отсчетов. Полученный многоступенчатый прогноз (кривая *г*) позволяет выделить возрастающую тенденцию ряда и с высокой точностью определить момент выхода значений температуры за допустимые границы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 8–34% ($\bar{A} = 0,08 - 0,34$).

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что использование метода временных рядов позволяет делать более точные прогнозы относительно дрейфа температуры статоров СТД-12500-2 по сравнению с применяемыми методами на основе прогнозных моделей и ИНС

Аналогичные результаты получены при сопоставлении прогнозирования токов статора СТД-12500-2 (рис. 5) методами Бокса-Дженкинса (кривая *б*) с ошибкой 34–127%, ИНС Ворда (кривая *б*) с ошибкой 27–84% и метод временных рядов АДСС (кривая *г*) с ошибкой 11–58%.

Однако спецификой функционирования ЭГПА является большая инерционность (постоянные времени), включая изменения тепловых режимов и параметров ЧР. Поэтому рациональный выбор метода прогнозирования технического состояния конкретного ЭГПА определяется совокупностью условий, режимов работы магистральных газопроводов и различными системными особенностями функционирования газоперекачивающей техники на компрессорных станциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система мониторинга оценки влияния эксплуатационных факторов ПВСД на ресурс изоляции статора, которая показала:

- нагрев обмоток в средней части двигателя на 23°C выше, чем лобовых частей, а частота пробоев изоляции здесь составляет более 86%. Кроме того, при внезапном останове машины температура растет еще на 15–20°C, вызывая опасность теплового удара и перегрева обмоток;
- линейные напряжения на ЗРУ-10 кВ в течение 82 ч наблюдений могут составлять 10,37–10,91 кВ, превос-

ходя стандартные значения и имея значительные искажения по форме;

– механические нагрузки из-за электродинамических усилий в стержнях на обмотку статора машины незначительны даже при реакторном пуске ПВСД;

– все машины СТД-12500 имеют ЧР различной амплитуды и интенсивности, а онлайн мониторинг ЧР позволяет адекватно оценивать ТС ПВСД.

Результаты исследований эффективности ВСМП ПВСД на основе методов нечёткой логики (Бокса-Дженкинса) и ИНС (сети Ворда) при прогнозировании технических параметров СТД-12500 в случае развития постепенных отказов показали, что они дают более точные результаты по сравнению с традиционными методами экстраполяции и позволяет принимать более адекватные и своевременные решения. При многошаговом прогнозировании быстрых процессов изменения токов в условиях отсутствия дополнительной информации на этапе идентификации модели применение метода прогнозирования на основе временных рядов дает более точный результат. Однако рациональный выбор метода прогнозирования ТС конкретного ЭГПА определяется совокупностью условий, режимов работы МГ и системными особенностями функционирования газоперекачивающей техники на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

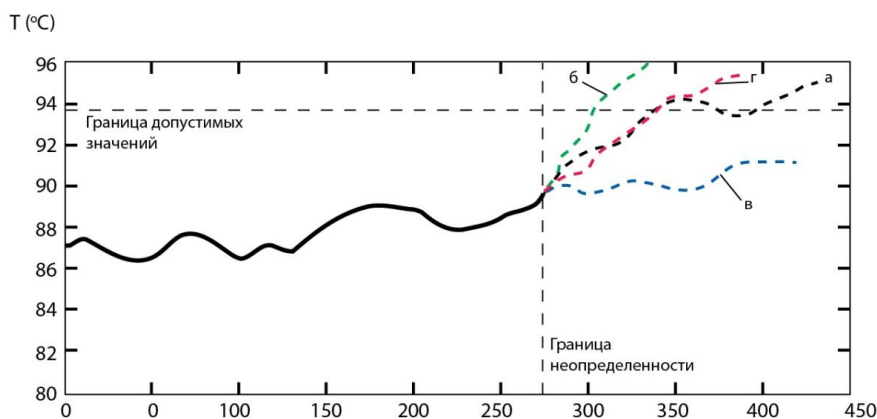


Рис. 4. Прогнозирование температуры статора электродвигателя СТД-12500-2:

а – фактический температурный ряд; б – прогноз, полученный с использованием ИНС (сеть Ворда); в – прогноз, полученный с использованием модели Бокса-Дженкинса; г – прогноз, полученный с использованием метода АДСС

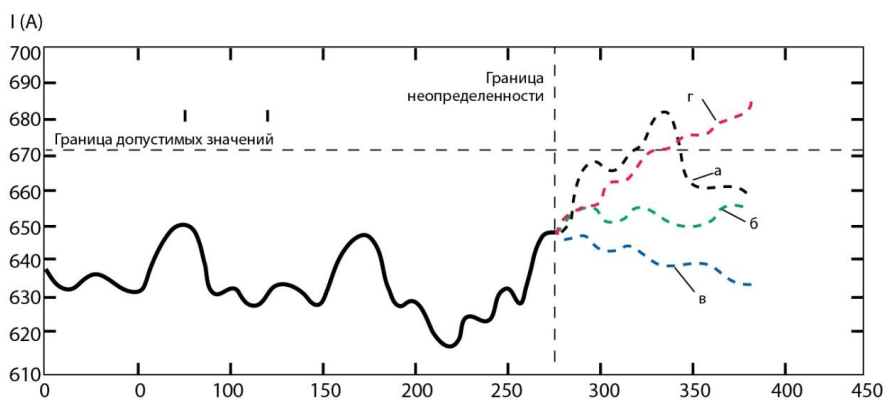


Рис. 5. Прогнозирование тока статора электродвигателя СТД-12500-2:

а – фактический временной ряд; б – прогноз, полученный с использованием ИНС (Ворда); в – прогноз, полученный с использованием модели Бокса-Дженкинса; г – прогноз, полученный с использованием метода временных рядов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пужайло А.Ф. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций МГ: монография / под ред. О.В. Крюкова. Н.Новгород: Вектор ТиС, 2010. 570 с.
2. Крюков О.В. Методология и средства нейронечеткого прогнозирования состояния ЭГПА // Электротехника, 2012, №9. С.52-57.
3. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Труды МНПК «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях», АИТА-2011, М.: ИПУ РАН, 2011. С. 329-350.
4. Пужайло А.Ф. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций МГ: монография / под ред. О.В. Крюкова. Н.Новгород, Вектор ТиС, 2011. Т.2. 664 с.
5. Милов В.Р., Шалашов И.В., Крюков О.В. Процеду-

ры прогнозирования и принятия решений в системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. 2010. № 8. С.47-49.

6. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. №2. С. 5-10.
7. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2009. № 7. С. 33-39.
8. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. 2010. № 12. С. 24-31.
9. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. 2009. № 6. С. 3-6.

INFORMATION IN ENGLISH

RESULTS OF TECHNICAL STATE PREDICTION OF ELECTRIC GAS-COMPRESSOR UNITS

Kryukov O.V., Serebryakov A.V.

The article is concerned with design of efficient and reliable systems of on-line control of electric motors for electric gas-compressor plants. The authors describe the architecture and methodology of artificial neural networks aimed at developing predictive models for megawatt electrical machines and the analysis results of the anticipated states of the units for bulk gas transport.

Keywords: electric compressor plants, gas compressor units, megawatt electric motors, artificial neural networks, tests of selected networks, fuzzy Box-Jenkins model, method of spectral components dynamics analysis, prediction of current value and stator temperature.

REFERENCES

1. Puzhaylo A.F. and others. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektroborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy Saving and Automation of Electrical Equipment of Gas-compressor Units], monograph, under the editorship of O.V. Kryukov, Nizniy Novgorod, Vector TiS, 2010, 570 p.
2. Kryukov O.V. *Metodologiya i sredstva neiro-nechetkogo prognozirovaniya sostoyaniya gazoperekachivayuschikh ustanovok* [Methodology and Means of Neuro-fuzzy prediction of Gas Compressing Unit State], Electrical engineering, 2012, no.9, pp.52-57.
3. Kryukov O.V. *Kompleksnaya sistema monitoringa i upravleniya elektroprivodnymi gazoperekachivayuschimi agregatami* [Integrated System of Monitoring and Control of Electric Gas-compressor Units], Proceedings of «Progressive information technologies, means and automation systems and their implementation in Russian companies», АИТА-2011, Moscow, IPU RAN, 2011, pp. 329-350.

4. Puzhaylo A.F. and others. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektroborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy Saving and Automation of Electrical Equipment of Gas-compressor Units], monograph, under the editorship of O.V. Kryukov, Nizniy Novgorod, Vector TiS, 2011, vol.2, 664 p.

5. Milov V.R., Shalashov I.V., Kryukov O.V. *Protsedury prognozirovaniya i prinyatiya resheniy sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta* [Processes of Forecasting and Decision Making in the System of Maintenance and Repair], Automation in industry, 2010, no.8, pp.47-49.

6. Kryukov O.V., Stepanov S.E., Titov V.G. *Vstroennye sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov dlya energeticheskoy bezopasnosti transporta gaza* [Integrated Monitoring Systems of Electric Drive Technical State for Energy Preparedness of Gas Transportation], Energy security and energy saving, 2012, no.2, pp. 5-10.

7. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya privodnykh elektrodvigatelay gazoperekachivayuschikh agregatov* [Monitoring of Technical State of Electric Motors of Gas-compressor Units], Control. Diagnostics, 2009, no.7, pp. 33-39.

8. Babichev S.A., Kryukov S.A., Titov V.G. *Avtomatizirovannaya sistema bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivayuschikh agregatov* [Automatic Safety System of Electric Gas-compressor Units], Electrical engineering, 2010, no.12, pp. 24-31.

9. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. *Avtomatizirovannaya sistema operativnogo monitoringa privodnykh dvigateley gazoperekachivayuschikh agregatov* [Automatic System of On-line Monitoring of Electric Motors of Gas-compressor Units], Automation in industry. 2009. no.6, pp. 3-6.