

УДК 621.313.33:62-83

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

COMPUTER SYSTEM FOR ELECTRIC DRIVES FAULT DIAGNOSIS OF MINING SHOVELS

Каширских Вениамин Георгиевич¹,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: kvg.ea@kuzstu.ru,
Kashirskikh Veniamin Georgiyevich, Dr. Sc., Professor
Гаргаев Андрей Николаевич,
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: andrei345@yandex.ru,
Gargayev Andrey N., C. Sc. (Engineering), Associate Professor
Завьялов Валерий Михайлович²,
zavyalov@tpu.ru,
Zavyalov Valeriy Mikhaylovich²
Семыкина Ирина Юрьевна
доктор техн. наук, профессор, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru
Semykina Irina Yuryevna, Dr. Sc., Professor

¹Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, ул. Весенняя, 28, г. Кемерово, 650000, РФ.

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, ул. Усова, 7, оф. 211, г. Томск, 624034, РФ.

¹T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University Kemerovo, Russian Federation

²National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russian Federation

Аннотация

Функциональную диагностику электроприводов экскаватора предлагается проводить по результатам мониторинга текущих значений электромагнитных и механических параметров и переменных величин электроприводов, получаемых в процессе их работы на основе использования современных компьютерных технологий. Приведена структура разработанной системы функциональной диагностики, позволяющей контролировать состояние электропривода и выявлять возникающие неисправности. Для определения в реальном времени текущих значений параметров и переменных величин двигателя постоянного тока, которые в процессе его работы не поддаются измерению, используется динамическая идентификация на основе измеряемых токов и напряжений обмоток двигателя и математических методов оценивания. Определение параметров механической подсистемы электропривода производится с помощью мобильной измерительной системы. Приводятся также структура и характеристики одноступенчатого нейро-сетевого предиктора тока, служащего для предсказания значений токов в обмотках якоря и возбуждения двигателя. Анализ технического состояния электропривода по совокупности диагностических признаков выполняется в специальном анализаторе, построенном на основе предварительно обученной искусственной нейронной сети. Результаты проведенных исследований подтверждают возможность создания системы диагностики для главных электроприводов карьерных экскаваторов на основе использования методов оценивания и аппарата искусственных нейронных сетей.

Abstract

Electric drives fault diagnosis of mining shovels is suggested to carry out based on the results of monitoring for current electromagnetic and mechanical parameters, and variables of electric drives obtained during their operation using modern computer technology. The paper showed the structure of developed system of fault diagnosis that allows controlling the state of electric drive and detecting emerging faults. To determine in real time the current parameters and variables of DC motor, which during their operation can't be measured, was used dynamic identification based on the measured current and voltage of the motor windings, and mathematical estimation methods. Parameters of the mechanical subsystem of electric drive are identified by a mobile measuring system. The authors also give the structure and characteristics of the one-step neural network predictor of current, used to predict the current in the armature and field windings of motor. Analysis of the technical state of electric drive on the strength of diagnostic features is performed in a special analyzer, built on the basis of pre-

trained artificial neural network. The results of these studies support the possibility of creating a diagnostic system for the main electric drives of mining shovels using estimation methods and apparatus of artificial neural networks.

Ключевые слова: электропривод; двигатель постоянного тока; диагностика; динамическая идентификация; оценивание; предиктор; искусственная нейронная сеть

Keywords: *electric drive; DC motor; diagnosis; dynamic identification; estimation; predictor; artificial neural network.*

Введение.

Значительная доля отказов, вызывающих аварийные остановы карьерных экскаваторов, связана с неисправностями главных электроприводов. Для улучшения ситуации требуется перевод системы технического обслуживания электроприводов на обслуживание по их фактическому техническому состоянию [1]. При этом возникает необходимость в непрерывном мониторинге параметров, определяющих техническое состояние электроприводов, и использовании получаемой информации для функциональной диагностики [2].

В настоящее время существует достаточно большое разнообразие средств диагностирования [3-13]. Однако имеющиеся в настоящее время системы диагностики для электроприводов карьерных экскаваторов ограничиваются, в основном, контролем таких параметров как уровень масла, температура подшипников, значения вибрации, токи обмоток якоря и возбуждения, положение экскаватора, угол его наклона и др. [14]. При этом анализ электромагнитных процессов в электрических машинах и динамических процессов в механической подсистеме привода не производится, хотя информация об этих процессах может быть использована для целей диагностики электроприводов. Такой подход совместно с имеющимися на практике средствами диагностирования позволит создать интегрированную универсальную систему диагностики, которая должна контролировать требуемые параметры и при выходе их за допустимые границы сигнализировать об этом.

Объект исследования. Совокупность главных электроприводов карьерного экскаватора является сложной системой, в которую входят электрические, электромеханические и механические преобразователи, объединенные для совместной работы системой управления, а также силовыми и информационными каналами. По нашему мнению, для функционального (без остановки оборудования) диагностирования электроприводов необходимо осуществлять непрерывный контроль ряда параметров электропривода с последующей их обработкой. Для этих целей необходимо использовать набор датчиков и программно-аппаратные средства, включающие в себя компьютер, устройства сопряжения и специальное программное обеспечение. Получаемая таким образом в реальном времени информация является основой для реализации алгоритмов диагностирования с использованием, в том числе, методов искусственного интеллекта.

Однако не все параметры, определяющие техническое состояние электропривода, доступны прямому измерению в процессе его работы. Например, у двигателей постоянного тока (ДПТ) недоступны для прямого измерения активные сопротивления и индуктивности обмоток якоря и возбуждения, взаимная индуктивность обмоток и др. Эти данные могут быть получены косвенным путем – с помощью процедуры динамической идентификации на основе математических методов оценивания [15]. В качестве исходной информации для этого используются измеряемые токи и напряжения обмоток, а также математическая модель двигателя.

Материалы и методы. На рис. 1 приведена структура предлагаемой системы диагностики электропривода с модулями интеллектуального анализа данных. Для электропривода, в состав которого входят ДПТ, электрический преобразователь с системой управления и механическая подсистема, разработаны наблюдающие устройства электромагнитных и механических переменных, предикторы, а также анализаторы технического состояния. Здесь X, Y – соответственно векторы входных и выходных сигналов ДПТ, а \hat{v}_e, \hat{v}_m – их оценки. Данная структура системы диагностики приведена только для одного из главных электроприводов карьерного экскаватора – для остальных структура будет аналогичной.

Наблюдающие устройства предназначены для получения в реальном масштабе времени оценок электромагнитных и механических переменных электропривода посредством компьютерного анализа информации, находящейся в измеряемых сигналах токов, напряжений, скоростей и угловых перемещений. Для предсказания значений выходного вектора состояния ДПТ (\hat{y}) по его предыстории на один шаг вперед служит предиктор, построенный на базе искусственной нейронной сети (ИНС). Полученные оценки (\hat{v}_e, \hat{v}_m), а также токи и напряжения обмоток ДПТ и рассогласование выходного сигнала нейронного предиктора с реально измеренным током (Δ) поступают в анализатор технического состояния, где происходит обработка получаемой информации и распознавание технического состояния работающего электропривода по ряду признаков с выдачей результатирующей информации на дисплей.

Основными элементами приводов, формирующими потоки механической энергии для разрушения и перемещения горной массы и движения горных машин, являются электродвигатели. На их

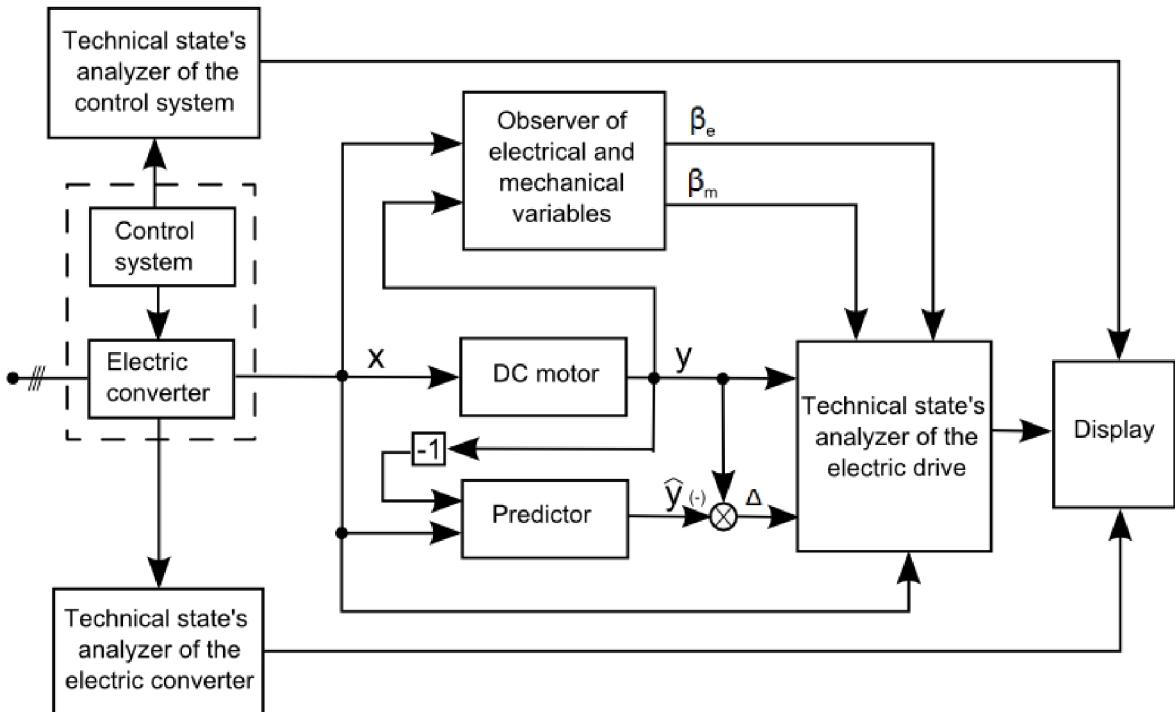


Рисунок 1 – Структура системы диагностики

динамическое состояние большое влияние оказывают процессы, происходящие в других элементах электропривода, поэтому при создании функциональной диагностической системы им должно быть уделено особое внимание. При идентификации в качестве математической модели ДПТ нами были использованы уравнения, полученные на основе теории обобщенной электрической машины [16,17]:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= i_f \cdot R_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt}; \\ u_a &= i_a \cdot R_{a\Sigma} + L_{a\Sigma} \cdot \frac{di_a}{dt} + p \cdot L_{12} \cdot \omega \cdot i_f; \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} &= T_m - T_l; \\ T_m &= p \cdot L_{12} \cdot i_f \cdot i_a, \end{aligned} \right\}$$

где $U_a, U_f; i_a, i_f; L_{a\Sigma}, L_f; R_{a\Sigma}, R_f$ - соответственно напряжения питания, токи, индуктивности и активные сопротивления обмоток якоря и возбуждения; ω - угловая скорость вращения якоря; J - момент инерции; T_m - электромагнитный момент; T_l - момент сопротивления; p - число пар полюсов.

К настоящему времени существует достаточно много научных публикаций, посвященных определению параметров и состояния ДПТ. Обзор литературных источников показал, что наиболее ча-

сто используемыми методами оценивания являются следующие:

1. Метод наименьших квадратов и рекуррентный метод наименьших квадратов. Их суть заключается в минимизации квадрата интегральной ошибки идентификации по среднеквадратичному критерию [18,19].

2. Фильтр Калмана, который позволяет осуществлять динамическую идентификацию параметров объекта при известной структуре его динамической модели в условиях неполной информации и зашумленных данных. Фильтр Калмана находит широкое применение, поскольку позволяет производить оценивание не только параметров, но и состояния системы в реальном масштабе времени [20,21].

3. Поисковые методы. Осуществляют поиск параметров модели ДПТ на основе определенного алгоритма с запоминанием результатов, при которых ошибка идентификации была минимальной [22].

4. Генетические алгоритмы – это алгоритмы поиска, напоминающих биологическую эволюцию, в которых отыскание решения производится путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров [23-27].

5. Искусственные нейронные сети. Представляют собой математическую модель взаимосвязанных искусственных нейронов, обладающих в совокупности способностью к обучению [28,29].

Для проверки эффективности всех перечисленных методов нами было разработано программное обеспечение и на этой основе для ряда ДПТ проведено компьютерное моделирование, ре-

зультаты которого позволяют сделать следующие выводы [30-33]:

- все перечисленные методы могут быть использованы для динамической идентификации ДПТ;

- оценивание параметров и состояния ДПТ в реальном времени для всей совокупности данных методов производится с допустимой для практического использования погрешностью – не выше 15%;

- для использования методов оценивания на базе математической модели ДПТ, необходимо и достаточно информации, содержащейся в текущих значениях напряжений и токов обмоток возбуждения и якоря, а в некоторых случаях необходимо

также измерение угловой скорости ДПТ.

Для определения зависимости электромагнитных параметров ДПТ от его технического состояния, были проведены теоретические и лабораторные исследования двигателей постоянного тока, работающих в нормальных и наиболее типичных аварийных режимах. При задании ряда неисправностей были выявлены характерные особенности изменения электрических параметров ДПТ, полученных на основе динамической идентификации.

Для контроля состояния механической подсистемы электропривода экскаватора была разработана мобильная измерительная система [31], которая осуществляет синхронное измерение токов приводных электродвигателей и угловых положе-

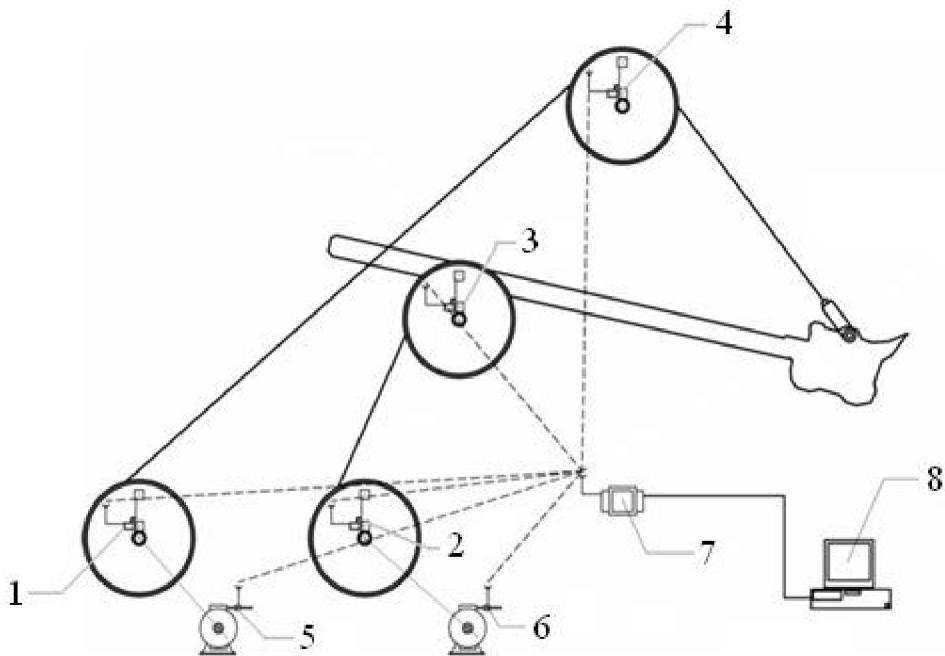


Рисунок 2 – Места установки датчиков на экскаваторе

a)

б)

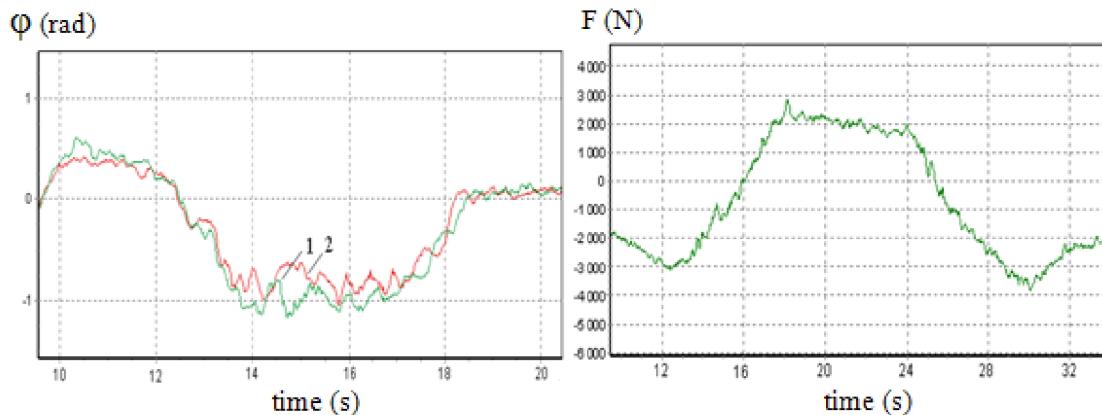


Рисунок 3 – Результаты испытаний: а) угловые положения барабана лебедки (1) и блока стрелы (2) привода напора; б) усилие в канате привода напора

ний барабанов лебедок, головного и напорного блоков стрелы. Для повышения оперативности монтажа и демонтажа измерительной системы, установка датчиков положения осуществлялась при помощи постоянных магнитов. Места расположения датчиков измерительной системы схематично показаны на рис. 2. В состав измерительной

Получаемая информация передается далее в систему диагностики.

Для проведения процедуры диагностики разработан также нейросетевой предиктор (рис. 4) в виде компьютерной модели на базе ИНС, осуществляющий предсказание выходного вектора состояния объекта по его предыстории на один

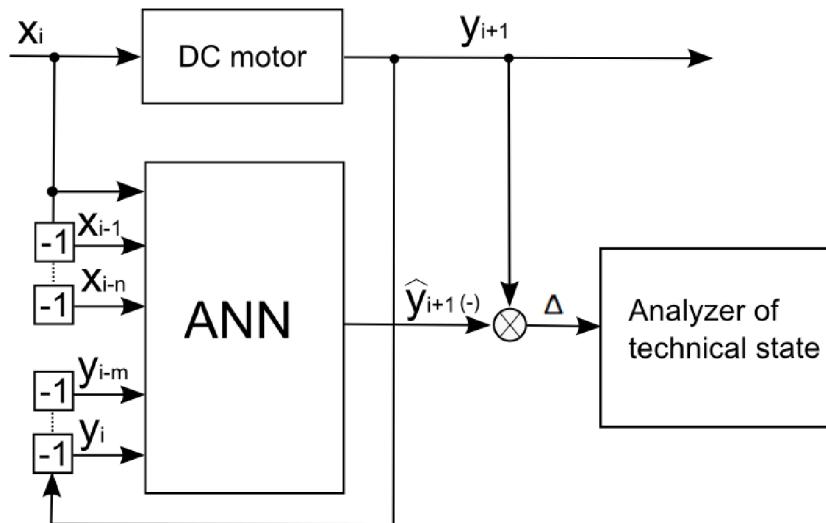


Рисунок 4 – Блок-схема нейронного предиктора

системы входят: блоки измерения положения (1–4), блоки измерения тока (5,6), базовая станция (7), персональный компьютер (8) и радиомодуль. Поскольку места установки датчиков разнесены в пространстве, передача информации от датчиков на базовую станцию осуществляется по радиоканалу.

При подаче сигнала от базовой станции на измерительные блоки, расположенные на барабанах и в якорных цепях двигателей, они начинают производить измерение соответствующих переменных. На каждом цикле измерения происходит обработка данных на измерительных блоках микроконтроллерами, а также одновременная запись данных в память. Измерение угловых положений осуществлялось при помощи специально разработанных датчиков, изготовленных на базе акселерометров.

Результаты и обсуждение. При испытаниях мобильной измерительной системы на электроприводах карьерного экскаватора ЭКГ-10 (Вахрушевский угольный разрез в Кузбассе) были получены данные о состоянии угловых скоростей барабанов лебедок и блоков, электромагнитных моментов двигателей и усилий в канатах. Некоторые результаты, полученные в ходе испытаний, представлены на рис. 3. Мобильная измерительная система позволяет осуществлять мониторинг динамического состояния механических элементов электроприводов экскаватора, и на основании полученных данных определять усилия в канатах.

шаг вперед. Для этого его необходимо обучить на данных, полученных от исправного двигателя при работе в различных динамических режимах. При обучении нейронная сеть аппроксимирует функциональную зависимость между входными (X) и выходными (Y) сигналами.

В качестве входных сигналов использовались напряжение на обмотках, угловая скорость, момент сопротивления, а также выходной сигнал, задержанный на некоторое время. Время задержки определяется динамикой объекта, и в нашем случае составляет 1мс. Выходным сигналом является предсказанный на один шаг вперед электрический ток в обмотке. Точность предсказания предиктора зависит от его параметров, времени обучения, объема и качества обучающей выборки.

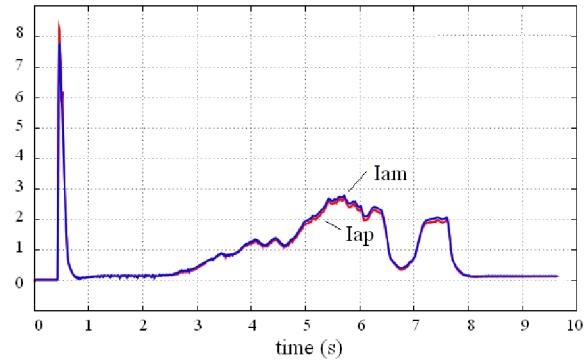
При исправном двигателе выходной сигнал предиктора практически совпадает с реально измеренным током и рассогласование между ними незначительное (рис.5). В случае появления неисправности сигнал предиктора не совпадает с током двигателя и между ними возникает рассогласование. На рис. 6 показаны сигналы предиктора и тока двигателя и их рассогласование при смещении щеток с геометрической нейтрали. По величине и знаку рассогласования, а также по скорости изменения величины рассогласования производится диагностирование технического состояния ДПТ.

Серия проведенных опытов показала, что при обрывах в обмотках ДПТ, возникает положительное рассогласование (ошибка) между выходным сигналом предиктора и реально измеренным то-

ком электродвигателя, при замыканиях – отрицательное рассогласование. При этом величина рассогласования зависит от степени развития неисправности, например, чем большее количество ламелей замкнуто, тем большее возникает рассогласование. Анализ полученных результатов подтвердил возможность использования ошибки нейронного предиктора для целей диагностики. Однако предиктор адекватно работает лишь для данного типа двигателя, а для диагностики других типов двигателей необходимо отдельное его обучение.

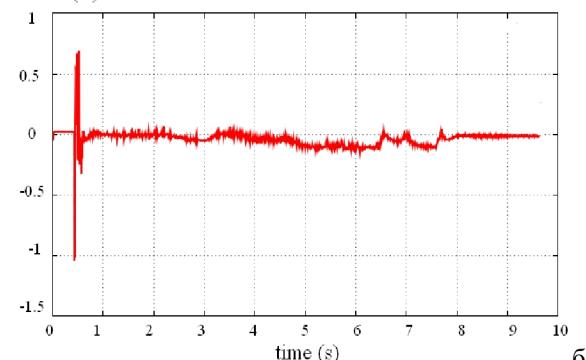
Процедуру диагностирования двигателей можно отнести к задаче классификации, когда определяется принадлежность входного набора диагностических данных к одному из нескольких заранее известных классов технического состояния электродвигателя. Для анализа информации, получаемой от наблюдающих устройств и предикторов тока, и определения технического состояния электропривода разработан анализатор технического состояния на базе искусственной нейронной сети (рис. 7), которая является одним из наиболее эффективных и апробированных средств для решения задач классификации [33].

Нейронная сеть хорошо аппроксимирует несигмент (A)



a

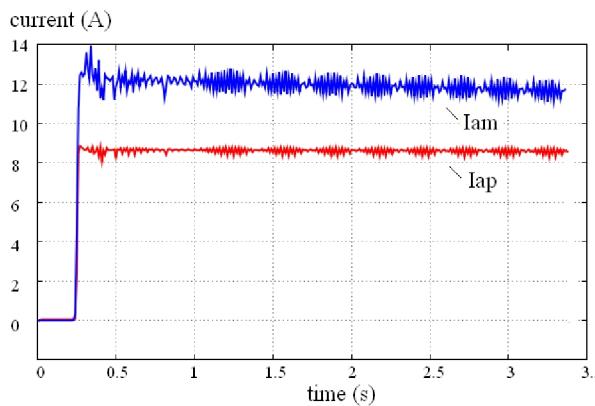
delta (A)



б

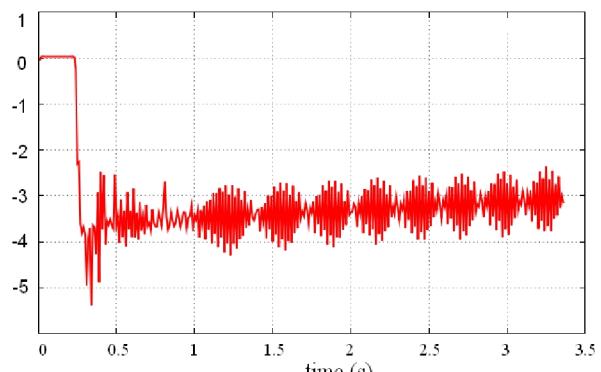
Рисунок 5 – Результаты испытаний:

a) Iam – измеренный ток якоря, Iap – выходной сигнал предиктора,
б) delta – рассогласование сигналов



а

delta (A)



б

Рисунок 6 – Результаты испытаний:

а) Iam – измеренный ток якоря при замыкании ламелей;
Iap – выходной сигнал предиктора; б) delta – рассогласование сигналов

линейные зависимости и устойчива к шумам в обучающих данных. В качестве структуры ИНС была выбрана сеть на базе многослойного персептрона с одним скрытым слоем, которая хорошо подходит для решения задач классификации. Количество нейронов входного слоя определялось количеством диагностических признаков, выходного слоя – количеством диагностируемых технических состояний.

Концепция обучения ИНС – обучение с учителем. На основе встроенных знаний учитель формирует и передает обучаемой нейронной сети желаемый отклик для каждого набора входных сигналов. Эти желаемые результаты должны будут в процессе самостоятельной работы выбирать нейронная сеть. После окончания процедуры обучения учителя отключают. При обучении использовался алгоритм с обратным распространением ошибки, при этом синаптические веса настраивались с целью максимального приближения выходного сигнала ИНС к желаемому. В качестве активационной функции был принят экспоненциальный симмоид, что отвечает требованию дифференцируемости функции.

Входными сигналами для нейронного анализатора являются данные, полученные для ДПТ и

механической подсистемы путем измерений и оценивания, а выходными – определенные классы технического состояния электропривода. Для создания обучающей выборки использовались данные, полученные в процессе лабораторных испытаний ДПТ типа П-12. В двигателе, работающем в разных динамических режимах, искусственным образом создавались типичные неисправности – обрывы и замыкания обмоток якоря и возбуждения, стопорения и др. Была сформирована база измерений и соответствующие этим измерениям

стической системе также допускается расширение ее функциональных свойств путем использования дополнительных сигналов, например, температуры двигателя, уровня искрения щеток, уровня вибрации и др. Это позволяет создавать систему диагностики для конкретных технических нужд заказчика.

Кроме того, рассмотренный подход может быть использован также для построения системы диагностики электроприводов переменного тока. Для этих целей на кафедре электропривода и ав-

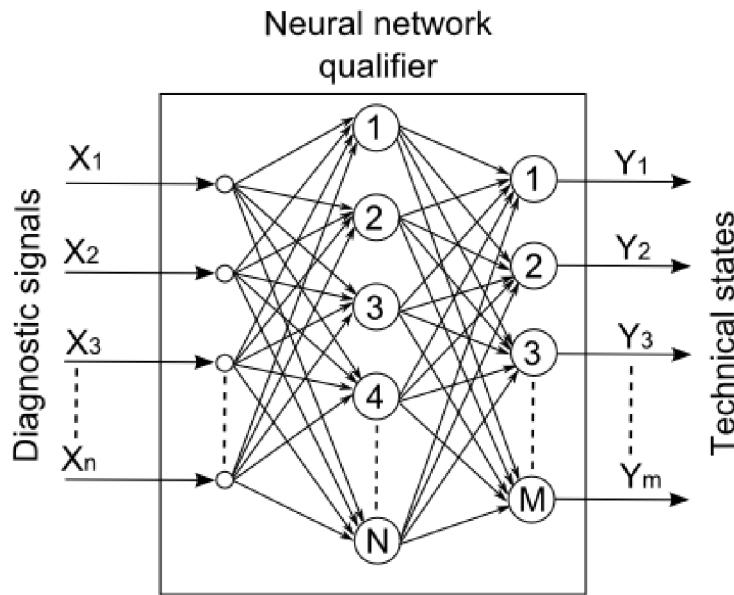


Рисунок 7 – Структура нейронного анализатора технического состояния

технические состояния ДПТ. В результате объем обучающей выборки составил 35000 образцов, при числе эпох обучения 100000. Обучающая выборка для механической подсистемы была сформирована на основе результатов, полученных при испытаниях мобильной измерительной системы в производственных условиях.

Для реальных электроприводов экскаваторов процедуру обучения нейронной сети необходимо проводить на специализированных стендах заводов-изготовителей или на промышленных предприятиях перед включением экскаваторов в технологический процесс. При этом важной особенностью системы диагностики на базе нейронной сети является возможность расширения диагностируемых классов аварийных режимов путем дополнительного обучения ИНС. В данной диагно-

томатизации КузГТУ разработаны алгоритмы и программное обеспечение для динамической идентификации асинхронных электродвигателей.

Заключение. Таким образом, разработка и применение системы диагностики с интеллектуализацией процессов обработки диагностической информации дает возможность выявлять неисправности электроприводов карьерных экскаваторов на стадии их зарождения, уменьшить время и материальные затраты на поиск и устранение неисправностей. Это позволит перейти к системе технического обслуживания и ремонта оборудования по его фактическому техническому состоянию и тем самым повысить эксплуатационную надежность и эффективность карьерных экскаваторов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрошев Ю.С. Повышение технологической надежности карьерных экскаваторов [текст] / Ю.С. Дрошев, С.В. Нестругин Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. - 194 с.
2. Герике Б.Л. Диагностика горных машин и оборудования [текст]/ Б.Л.Герике, А.А. Хорешок, П.Б. Герике – Кемерово: КузГТУ, 2012. - 310 с.
3. Ляхомский А.В. Метод поиска неисправности или отказа главных электроприводов карьерных экскаваторов [текст] / А.В. Ляхомский, И.М. Хошмухamedов // Электрика. – 2006. – №7. – С. 33-35.

4. Хошмухамедов И.М. Диагностические признаки и методы электросилового диагностирования оборудования горных машин [текст] / И.М. Хошмухамедов, О.В. Косарева-Володько // Электрика. – 2007. – №4. – С. 33-35.
5. Дитмар Бенда. Поиск неисправностей в электрических схемах [текст]: СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 256 с.
6. Глинка Т.Я. Диагностирование изоляций обмоток электрических машин постоянного тока [текст] / Т.Я. Глинка, М.С. Якубец // Электротехника, 2005. – №7 – С.20-24.
7. Способ диагностики коммутации обмоток якоря и качества питания коллекторных электродвигателей постоянного тока [текст]: патент № 2362177 G01R31/06 Россия / А.И. Прыгунов. Опубл. 20.07.2009
8. Петухов В.С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов парка тока и напряжения [текст] / Новости Электротехники.-2008. -№1(49)
9. Todd D. Analysis of Brushed DC Machinery Faults With Coupled Finite Element Method and Equivalent Circuit Model / D. Todd, Batzel, Nicholas C. Becker, M. Comanescu // 2011 IAJC-ASEE International Conference, Paper 024, ENG 106
10. Manana M. Field winding fault diagnosis in DC motors during manufacturing using thermal monitoring / M. Manana, A. Arroyo, A. Ortiz, C.J. Renedo, S. Perez, F. Delgado // Applied Thermal Engineering / Volume 31, Issue 5, April 2011, P. 978–983
11. Iorgulescu M. Study of DC motor diagnosis based on the vibration spectrum and current analysis / M. Iorgulescu, R. Beloiu // Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2012 International Conference on, p.1-4
12. Boltezar M. Fault Detection of DC Electric Motors Using the Bispectral Analysis / M. Boltezar, J. Slavi // Springer 2006, Meccanica (2006) 41: 283–297
13. Che Soh A. Fault Detection and Diagnosis for DC Motor in Robot Movement System using Neural Network / A. Che Soh, R.Z. Abdul Rahman // The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 10. Number 1. May 2009 (Spring), p.35-42.
14. Jean-Claude Trigeassou. Electrical Machines Diagnosis // WILEY 2011
15. Radojka K., Sanja A., Danilo S. Recursive Least Squares Method in Parameters Identification of DC Motors Models, [text] // FACTA UNIVERSITATIS, SER.: ELEC. ENERG. December 2005. – vol. 18, no. 3, P. 467–478
16. Mohammed S. Z. Salah. Parameters identification of a permanent magnet dc motor [text] // The Islamic University of Gaza, 2009. – 94 c.
17. Vijaylakshmi Jigajinni S. Simulation of Incipient Fault Detection, Confirmation and Diagnosis Using Kalman Filter // International Journal of Science and Research, Volume 3 Issue 8, August 2014, p.1846-1850
18. WEI Tong. Application of adaptive Kalman filtering in system identification of brushless DC motor // WEI Tong,Rui GUO / Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 08 August 2012
19. Udomsuk, K-L. Areerak, K-N. Areerak and A. Sri-kaew. Parameters Identification of Separately Excited DC Motor using Adaptive Tabu Search Technique [text] // Sch. of Electr. Eng., Suranaree Univ. of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, 20 June 2010. – vol. 48 – 51
20. Alireza REZAZADEH. Genetic Algorithm based Servo System Parameter Estimation during Transients [text] // Department of Electrical and Computer Engineering, Shahid Beheshti University, G. C, Evin, Tehran, 2010.- vol 10, no 2.
21. M. Lankarany, A. Rezazade Parameter estimation optimization based on genetic algorithm applied to dc motor [text] // IEEE International Conf. on Electrical Engineering. (ICEE), 2007. P.1–6
22. Dupuis A., Ghribi M., Kaddouri A. Multiobjective Genetic Estimation of DC Motor Parameters and Load Torque [text] // IEEE International Conf. on Ind. Tech. (ICIT), 2004. P.1511–1514.
23. Jugrapong Treetrong. Electric motor fault diagnosis based on parameter estimation approach using genetic algorithm, Proceedings of the international muticonference of engineers and computer scientists 2010.
24. S. Cong, X. Feng, Parameters Identification of DC Motor Based on GA and Simplex Method [text] // Control Engineering of China, 2009. – vol. 16, no. 1, P.09–112
25. Arif A. AL-Qassar, Mazin Z. Othman. Experimental determination of electrical and mechanical parameters of dc motor using genetic elman neural network [text] // Journal of Engineering Science and Technology, 2008.- vol. 3, no. 2. P. 190 – 196
26. Feilat E. A., Maaitah E.K. Identification and control of DC motors using RBF neural network approach [text] // International conference on communication, computer and power, February 15–18, 2009, C. 258–264.
27. Гаргаев А.Н. Диагностика электроприводов карьерных экскаваторов на основе динамической идентификации электродвигателей [текст]: Диссертация на соискание учен. степени к.т.н. – Кемерово, 2013, – 161 с.

28. Гаргаев А.Н. Применение фильтра Калмана для динамической идентификации двигателей постоянного тока / А.Н. Гаргаев, В.Г. Каширских // Вестн. КузГТУ, 2013. - № 1. – С.131-134.
29. Каширских В.Г. Диагностика двигателей постоянного тока с помощью искусственной нейронной сети / В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев // Вестник КузГТУ. 2014, №2. С. 104-106.
30. Гаргаев А.Н. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью метода ряда частот // А.Н. Гаргаев, В.Г. Каширских // Вестник КузГТУ. 2015, № 4. С. 71-75.
31. Гаргаев А.Н. Система мониторинга динамического состояния электроприводов карьерных экскаваторов [текст] / В.М. Завьялов, А.П. Носков, В.С. Городнянский, А.Н. Гаргаев // Вестник КузГТУ. – 2009. – № 3. – С. 59–62
32. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е издание [текст]. – М. Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
33. Patan, Krzysztof. Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Processes / Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

REFERENCES

1. Droshev Yu.S. Povysheniye tekhnologicheskoy nadezhnosti kar'yernykh ekskavatorov [Increase in technological reliability of mining shovels]. Yu.S. Droshev, S.B. Nestrugin. Vladivostok: Publishing House DVGTU, 2009. 194 p.
2. Gerike B.L. Diagnostika gornykh mashin i oborudovaniya [Diagnosis of mining machinery and equipment]. B.L. Gerike, A.A. Khoreshok, P.B. Gerike. Kemerovo: KuzGTU, 2012. 310 p.
3. Lyakhomskiy A.V. Metod poiska neispravnosti ili otkaza glavnnykh elektroprivodov kar'yernykh ekskavatorov [Method of search for malfunction or failure of the main electric drives of mining shovels]. A.V. Lyakhomskiy, I.M. Khoshmukhamedov. Elektrika. 2006. No. 7. pp. 33-35.
4. Khoshmukhamedov I.M. Diagnosticheskiye priznaki i metody elektrosilovogo diagnostirovaniya oborudovaniya gornykh mashin [Diagnostic features and methods of electric power diagnosis for mining machinery]. I.M. Khoshmukhamedov, O.V. Kosarev-Volod'ko. Elektrika. 2007. No. 4. pp. 33-35.
5. Dietmar Benda. Poisk neispravnostey v elektricheskikh skhemakh [Troubleshooting in electrical circuits]. SPb. BHV-Petersburg, 2010. 256 p.
6. Glinka T.Ya. Diagnostirovaniye izolyatsiy obmotok elektricheskikh mashin postoyannogo toka [Diagnosis of windings insulation of DC electrical machines]. T.Ya. Glinka, M.S. Yakubets. Elektrotehnika. 2005. No. 7. pp. 20-24.
7. Sposob diagnostiki kommutatsii obmotok yakorya i kachestva pitaniya kollektornykh elektrodvigateley postoyannogo toka [Method for switching diagnosis of armature windings and supply quality of DC commutator motors]. Patentnumber 2362177 G01R31/06 Russia. A.I. Prygunov. Publ. 20.07.2009
8. Petukhov V.S. Diagnostika elektrodvigateley. Spektral'nyy analiz moduley vektorov parka toka i napryazheniya [Diagnosis of electric drives. Spectral analysis of Park's vector modules of current and voltage]. NovostiElektroTehniki. 2008. No.1 (49)
9. Todd D. Analysis of Brushed DC Machinery Faults With CoupledFinite Element Method and Equivalent Circuit Model / D. Todd, Batzel, Nicholas C. Becker, M. Comanescu // 2011 IAJC-ASEE International Conference, Paper 024, ENG 106
10. Manana M. Field winding fault diagnosis in DC motors during manufacturing using thermal monitoring / M. Manana, A. Arroyo, A. Ortiz, C.J. Renedo, S. Perez, F. Delgado // Applied Thermal Engineering / Volume 31, Issue 5, April 2011, P. 978–983
11. Iorgulescu M. Study of DC motor diagnosis based on the vibration spectrum and current analysis / M. Iorgulescu, R. Beloiu // Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2012 International Conference on, p.1-4
12. Boltezar M. Fault Detection of DC Electric Motors Using the Bispectral Analysis / M. Boltezar, J. Slavi // Springer 2006, Meccanica (2006) 41: 283–297
13. CheSoh A. Fault Detection and Diagnosis for DC Motor in Robot Movement System using Neural Network / A. CheSoh, R.Z. Abdul Rahman // The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 10. Number 1. May 2009 (Spring), p.35-42.
14. Jean-Claude Trigeassou. Electrical Machines Diagnosis // WILEY 2011
15. Radojka K., Sanja A., Danilo S. Recursive Least Squares Method in Parameters Identification of DC Motors Models, [text] // FACTA UNIVERSITATIS, SER.: ELEC. ENERG. December 2005. – vol. 18, no. 3, P. 467–478
16. Mohammed S. Z. Salah. Parameters identification of a permanent magnet dc motor [text] // The Islamic University of Gaza, 2009. – 94 c.
17. VijaylakshmiJigajinni S. Simulation of Incipient Fault Detection, Confirmation and Diagnosis Using Kalman Filter // International Journal of Science and Research, Volume 3 Issue 8, August 2014, p.1846-1850

18. WEI Tong. Application of adaptive Kalman filtering in system identification of brushless DC motor // WEI Tong,Rui GUO / Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 08 August 2012
19. Udomsuk, K-L. Areerak, K-N. Areerak and A. Srikaew. Parameters Identification of Separately Excited DC Motor using Adaptive Tabu Search Technique [text] // Sch. of Electr. Eng., Suranaree Univ. of Techonology (SUT), NakhonRatchasima, Thailand, 20 June 2010. – vol. 48 – 51
20. Alireza REZAZADEH. Genetic Algorithm based Servo System Parameter Estimation during Transients [text] // Department of Electrical and Computer Engineering, ShahidBeheshti University, G. C, Evin, Tehran, 2010.- vol 10, no 2.
21. M. Lankarany, A. Rezazade Parameter estimation optimization based on genetic algorithm applied to dc motor [text] // IEEE International Conf. on Electrical Engineering. (ICEE), 2007. P.1–6
22. Dupuis A., Ghribi M., Kaddouri A. Multiobjective Genetic Estimation of DC Motor Parameters and Load Torque [text] // IEEE International Conf. on Ind. Tech. (ICIT), 2004. P.1511–1514.
23. JugrapongTreetrong. Electric motor fault diagnosis based on parameter estimation approach using genetic algorithm, Proceedings of the international muticonference of engineers and computer scientists 2010
24. S. Cong, X. Feng, Parameters Identification of DC Motor Based on GA and Simplex Method [text] // Control Engineering of China, 2009. – vol. 16, no. 1, P.09–112
25. Arif A. AL-Qassar, Mazin Z. Othman. Experimental determination of electrical and mechanical parameters of dc motor using genetic elman neural network [text] // Journal of Engineering Science and Technology, 2008.- vol. 3, no. 2. P. 190 – 196
26. Feilat E. A., Maaitah E.K. Identification and control of DC motors using RBF neural network approach [text] // International conference on communication, computer and power, February 15–18, 2009, C. 258–264.
27. Gargayev A.N. Diagnostika elektroprivodov kar'yernykh ekskavatorov na osnove dinamicheskoy identifikatsii elektrodvigateley [Diagnosis of electric drives of mining shovels using electric motor dynamic identification]. Ph.D thesis. Kemerovo. 2013. 161 p.
28. Gargayev A.N. Primeneniye fil'tra Kalmana dlya dinamicheskoy identifikatsii dvigateley postoyannogo toka [Application of Kalman filter for dynamic identification of DC motors] A.N. Gargayev, V.G. Kashirskikh. Vestn. KuzGTU. 2013. No. 1. pp. 131-134
29. Kashirskikh V.G. Diagnostika dvigateley postoyannogo toka s pomoshch'yu iskusstvennoy nevronnoy seti [Diagnosis of DC motors using artificial neural network]. V.G. Kashirskikh, A.N. Gargayev. Vestnik KuzGTU. 2014. No. 2. pp. 104-106.
30. Gargayev A.N. Identifikatsiya parametrov dvigateley postoyannogo toka s pomoshch'yu metoda roya chastits [Parameters identification of DC motor using particle swarm]. A.N. Gargayev, V.G. Kashirskikh. Vestnik KuzGTU. 2015. No. 4. pp. 71-75.
31. Gargayev A.N. Sistema monitoringa dinamicheskogo sostoyaniya elektroprivodov kar'yernykh ekskavatorov [Monitoring system of dynamic state of mining shovels]. V.M. Zavyalov, A.P. Noskov, V.S. Gorodnyanskiy, A.N. Gargayev. Vestnik KuzGTU. 2009. No. 3. pp 59-62.
32. Haykin S. Neural networks a comprehensive foundation. [Neural networks: a complete course. 2nd edition]. Moscow. Publishing house "Williams". 2006. 1104 p

Поступило в редакцию 26.11.2016
Received 26 November 2016