

Экспериментальное исследование эффективности метода диагностирования электро-гидромеханических систем с учётом динамики процессов на основе нейросетевого базиса

А.М. Гареев¹, П.И. Грешняков¹, А.В. Никоноров¹, А.Г. Гимадиев¹, Д.М. Стадник¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Существующие методы контроля электро-гидромеханических систем (ЭГМС), основанные на достижении требуемых показателей по выходным параметрам и измерениям параметров на установившихся режимах, не позволяют диагностировать их неисправности в полном объёме. Поэтому разрабатываются системы диагностирования, основанные на измерении параметров ЭГМС в динамическом режиме. При этом возникает необходимость в создании массивов данных, связанных с измерением параметров в реальном масштабе времени и обработкой многочисленных параметров для отработки и проверки эффективности специальных методов машинного обучения. Однако в технической литературе недостаточно уделено внимания экспериментальной отработке и проверке эффективности этих методов. В статье представлена методика создания такого массива данных и оценки эффективности метода диагностирования с учётом динамики процессов в результате экспериментальных исследований ЭГМС в исправном и неисправном (с имитацией характерных дефектов) состояниях при различных управляющих воздействиях. При этом созданы стендовое оборудование, измерительно-регистрирующий комплекс с интерфейсом и реализацией имитаторов неисправностей, программы для формирования массива данных. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности методики диагностирования с ансамблем классификаторов неисправностей, построенных по массивам данных на модельных обучающих выборках. Статья может быть полезна специалистам, разрабатывающим и осуществляющим методы диагностирования технического состояния ЭГМС различных технических объектов.

1. Введение

Существующие методы контроля, основанные на достижении требуемых показателей по выходным параметрам и измерениям параметров на установившихся режимах [1-3], не позволяют диагностировать неисправности систем в полном объёме. Поэтому разрабатываются системы диагностирования, основанные на измерении параметров ЭГМС в динамическом режиме. Такие методы применяются зачастую для диагностирования неисправностей отдельных агрегатов, причём по небольшому количеству параметров.

Перспективным для диагностирования ЭГМС, в том числе упреждающего, являются методы, основанные на нейросетевом базисе. Они стали также применяться для предсказания

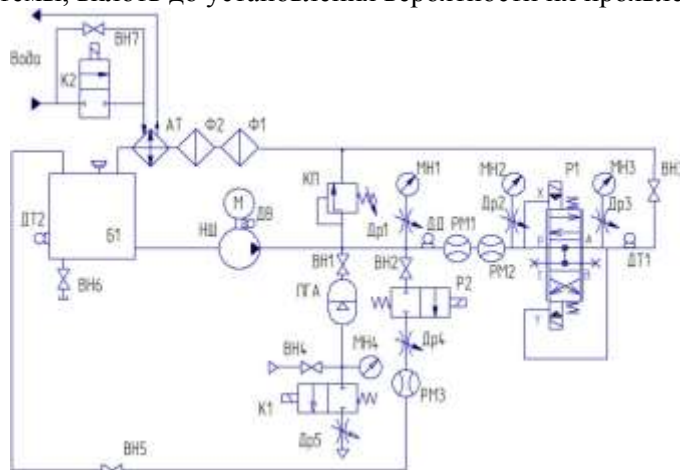
неисправностей в асинхронных электродвигателях [4], промышленных механических установок [5], и гидравлических агрегатах [6], в авиационных силовых установках [7].

Для диагностирования технического состояния ЭГМС необходимо создавать массивы данных, связанных с измерением и обработкой многочисленных динамических параметров, с изменением во времени управляющих и возмущающих воздействий и специальные методы машинного обучения [9-12]. Важным этапом создания таких систем является экспериментальная их отработка и проверка эффективности в условиях максимально приближенных к реальным. Обучающие выборки, составленные в результате моделирования процессов в ЭГМС, используются в основном при выборе количества подлежащих измерению параметров в зависимости от их чувствительности к тем или иным неисправностям, от мест установки датчиков в системе, вида управляющего и возмущающего воздействий. Экспериментальная выборка используется для проверки адекватности математических моделей ЭГМС, при отработке и проверки эффективности метода диагностирования.

Данная работа посвящена методике создания массива данных на основе экспериментальных исследований ЭГМС на испытательном технологическом стенде с измерением ряда параметров при управляющем воздействии с реализацией типичных для таких систем неисправностей с целью проверки эффективности методики диагностирования на основе ансамбля классификаторов, построенных на виртуальных обучающих выборках с использованием нейросетевого базиса и машинного обучения. Достижение поставленной цели позволит в дальнейшем предотвратить внезапные ожидаемые отказы оборудования, что повысит надёжность и безопасность промышленного производства, быстро определить отказавший узел системы и выяснить причину дефекта, сократит время поиска и устранения неисправности, простой оборудования.

2. Экспериментальное оборудование

Массив экспериментальных данных, сформированный в результате испытаний ЭГМС на испытательном комплексе (рисунок 1), необходим для передачи в аппаратно-программный комплекс для проверки эффективности метода диагностирования и определения возможных неисправностей системы, вплоть до установления вероятности их проявления.



АТ – аппарат теплообменный; Б – гидробак расходный; ВН1, ВН2, ВН3, ВН5, ВН6 – вентиль (du=10мм); ВН4 – вентиль (du=6мм); ДВ – оптический датчик частоты вращения; ДД - датчик статического и динамического давления); ДР1, ДР2, ДР3 – дроссель (du=4мм); ДТ1 – датчик температуры; К1 - кран шаровой с пневматическим приводом; К2 – кран шаровой с электроприводом; КП - клапан предохранительный; М – электродвигатель; МН1, МН2 – манометр (0-10МПа, кл. 0,4); НШ – насос шестеренный; Р1 - распределитель 4/3 пропорциональный; Р2 – распределитель; ПГА - пневмогидравлический аккумулятор; РМ1 – датчик расхода жидкости турбинный; РМ2 – датчик расхода жидкости дроссельный (d=4.8 мм); РМ3 – датчик расхода жидкости турбинный; Ф1 - фильтр грубой очистки (16/25 мкм); Ф2 - фильтр тонкой очистки (5/8 мкм)

Рисунок 1. Принципиальная схема технологического стенда для испытаний напорного узла ЭГМС.

Для экспериментальных исследований динамических характеристики и сбора данных с ЭГМС в исправном и неисправном состояниях изготовлен гидравлический стенд, включающий типовые гидравлические агрегаты, электропривод, насос и соответствующая стенду запорно-регулирующая арматура.

Состав испытательного стенда определялся исходя из номенклатуры основных элементов ЭГМС с учётом возможной имитации неисправностей, характерных для гидросистем различного назначения. К таким неисправностям можно отнести потерю герметичности в соединениях трубопроводной арматуры агрегатов гидросистем, определяемой величиной утечки рабочей жидкости, снижением расхода основного потока и давления в системе. Другой характерной неисправностью работы ЭГМС может быть разрегулировка или изменение жёсткости пружины предохранительного клапана. Данная неисправность характеризуется снижением установленного давления и может происходить в результате ослабления регулировочной пружины или ее поломки. Неисправностями ЭГМС могут быть также разгерметизация газовой полости пневмогидроаккумулятора (ПГА) из-за утечек в зарядном клапане, изменения вязкости и объёмной упругости рабочей жидкости и др.

Неисправности ЭГМС на испытательном стенде имитируются с помощью дополнительных отсечных вентилях, клапанов, дросселей и других устройств, встроенных в системы стенда, приводимых в движение соответствующими актуаторами. Для подготовки к экспериментальным исследованиям по оценке влияния внесенных искусственно неисправностей на процессы в ЭГМС на стенде дополнительно введены следующие элементы. Для имитации негерметичности напорной магистрали установлены отсечные вентили ВН2 и ВН5, дискретный электромагнитный гидрораспределитель Р2 и настроечный дроссель Др4, количество утечек контролируется расходомером РМ3. Неисправности ПГА воспроизводятся с помощью отсечного вентиля ВН1 и воздушной системы, состоящей из вентиля подачи газа ВН4, шарового крана с пневмоприводом К1 с настроечным дросселем Др5. Нарушение регулировки предохранительного клапана реализуется с помощью принудительного внешнего воздействия на настроечную пружину клапана.

В результате проведенных теоретических исследований ранее были определены основные параметры системы, используемые в качестве критериев оценки ее технического состояния. Для рассматриваемого узла ЭГМС этими параметрами являются давление на выходе из насоса и объёмный расход через пропорциональный распределитель (в качестве вспомогательного параметра можно было использовать ещё сигнал напряжения, подаваемый на пропорциональный распределитель).

3. Система регистрации и обработки результатов измерений

Стенд оснащён измерительной аппаратурой, состоящей в общем случае из датчиков: давления, расхода и температуры рабочей жидкости, перемещения, частоты вращения, силы, развиваемой приводом исполнительных элементов, вибраций корпуса гидравлического насоса.

Система сбора и хранения данных создана на основе NI CompactRIO, программируемого контроллера автоматизации, предназначенного для создания и внедрения готовых контрольно-измерительных систем (рисунок 2).

Программы измерительно-управляющего комплекса разворачивается на трёх устройствах:

1. На компьютере реализована программа верхнего уровня с визуализацией данных и человеко-машинный интерфейс. Программа позволяет осуществлять наблюдение и управление экспериментом, а также запись результатов измерения. Она предоставляет возможность изменять режимы работы стенда: частоту дискретизации записываемых параметров от 2 кГц до 20 кГц, изменять параметры генерируемых сигналов, вводить уставки, переключаться между ручным и автоматическим режимами.

2. На контроллере реального времени осуществляется подготовка и высокоскоростная запись данных. Программа контроллера является обслуживающей для основной программы, выполненной на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). При проведении эксперимента осуществляется визуализация в режиме реального времени, в случае

необходимости высокоскоростная запись результатов измерений осуществляется в бинарный файл во внутреннюю память контроллера. Доступ к записанным данным возможна через человеко-машинный интерфейс программы верхнего уровня, исполняемой на компьютере или через ftp-сервер. Взаимодействие программы контроллера с программой компьютера осуществляется по интерфейсу Ethernet/TCP.

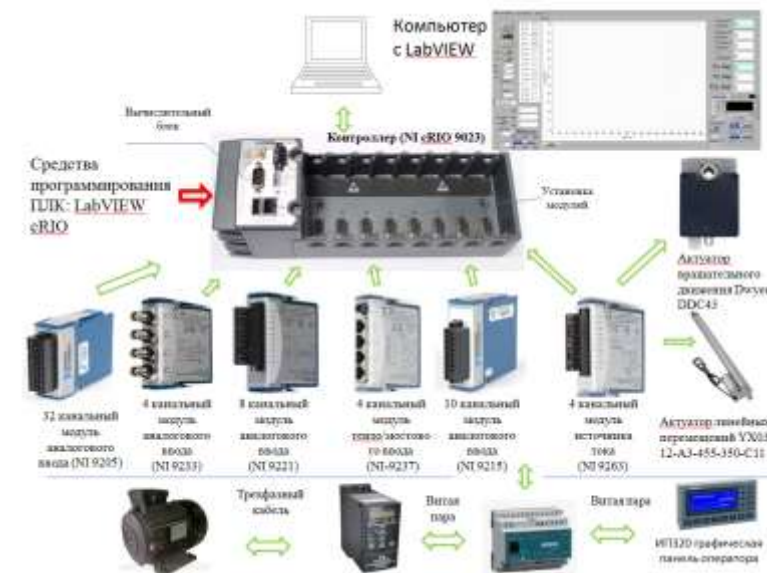


Рисунок 2. Функциональная схема системы регистрации параметров, обработки результатов измерения параметров и управления ЭГМС на гидравлическом стенде.

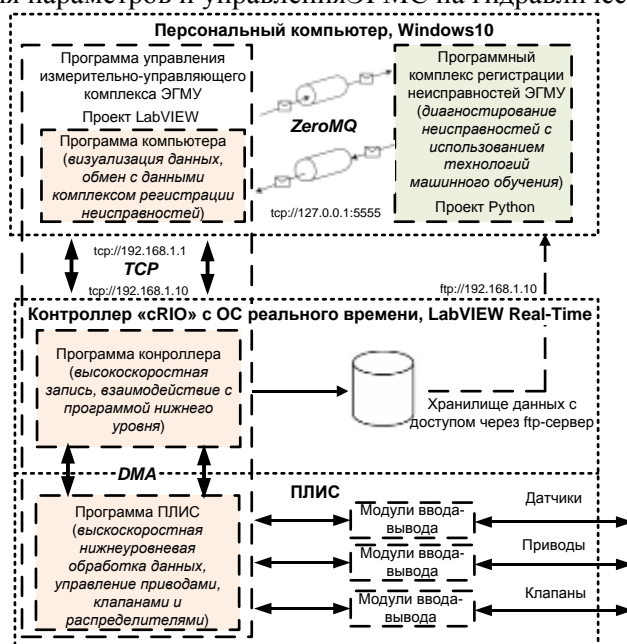


Рисунок 3. Диаграмма развёртывания программного комплекса.

3. На ПЛИС исполняется программа управления нижнего уровня, в которой реализованы большая часть алгоритмов: управления исполнительными устройствами (приводами, клапанами, распределителями); формирование и генерирование тестовых сигналов; взаимодействие с модулями ввода-вывода; фильтрация сигналов фильтрами Баттерворта; нормирование сигналов по калибровочным характеристикам; частотные измерения сигналов с турбинных датчиков расхода; подготовки и упаковки данных для передачи в контроллер. Передача данных на вышестоящий уровень контроллера осуществляется в режиме прямого

доступа к памяти Direct memory access (DMA). Диаграмма развёртывания программного комплекса приведена на рисунке 3.

4. Подготовка стендового оборудования

В начале работ проводится подготовка испытательного комплекса, при этом выполняется запуск электродвигателя с частотой вращения ниже номинальной без нагрузки и осуществляется настройка запорно-регулирующей, предохранительной арматуры. Для рассматриваемого ЭГМС зарядка ПГА (или наоборот его разрядка при имитации неисправного состояния) осуществляется перед запуском электродвигателя. Стартовая частота вращения электродвигателя составляет 500 об/мин. Настройка предохранительного клапана выполняется заранее в соответствии с его нагрузочной характеристикой.

Одновременно проводится подготовка программной части для записи переходных процессов (выбор частоты дискретизации, настройка сигналов управления распределительной арматурой, длительности записи и др.). Запись параметров на стенде осуществляется с частотой дискретизации записи измеряемых параметров 5 кГц. Запись с высокой частотой дискретизации позволяет фиксировать пульсации давления в результате работы шестеренного насоса. Изменение амплитуды пульсаций в процессе работы ЭГМС (что связано с различной величиной открытия пропорционального распределителя) может быть использовано в качестве диагностического признака работы насоса при обучении нейросетевых моделей. Ограничением при настройке частоты дискретизации при этом являются возможности аппаратной части в отношении объёма памяти для хранения и скорость передачи информации.

Настройка сигнала управления распределительной арматуры заключается в выборе законов изменения её площади проходного сечения с целью формирования требуемых условий испытаний. Для рассматриваемого ЭГМС используется случайный закон изменения открытия пропорционального клапана с равномерным распределением. При испытаниях рассматриваемого ЭГМС длительность записи переходных процессов занимает от 60 до 300 с. За это время количество переключений пропорционального распределителя составляет от 40 до 200 раз. Длительность между переключениями распределителя зависит от вида рассматриваемой неисправности. Например, при неисправности ПГА в составе ЭГМС, более важным фактором является динамическая составляющая переходного процесса (время между переключениями составляет 1 с). В этом случае целесообразно уменьшить длительность времени между переключениями распределителя, в противном случае может наступить процесс, при котором будут одинаковыми (неотличимыми) параметры для исправной и неисправной систем.

В другом случае, например, при имитировании утечки рабочей жидкости в трубопроводе на выходе из насоса важным является стационарная составляющая сигнала, то есть более результативным будет сравнение установившихся значений переходных процессов для исправной и неисправной ЭГМС (время между переключениями составляет 1,5 с).

Важным является также выбор постоянной времени гидравлического пропорционального распределителя, характеризующей время между подачей напряжения на катушки и выходом его исполнительного элемента на установившийся уровень. Для того, чтобы избежать возникновения гидроударов в системе для рассматриваемого ЭГМС необходимо было подавать напряжение на его вход по форме, близкой к переходному процессу аperiodического типового звена систем автоматического регулирования с постоянной времени 0,15 с.

5. Проведение испытаний

После завершения подготовительных работ производится переключение работы насоса на номинальный режим. Для рассматриваемого ЭГМС номинальный режим работы насоса составляет 2500 об/мин. Производится запуск пропорционального распределителя, при котором его площадь проходного сечения меняется по случайному закону. При этом визуально проверяется корректность работы системы по показаниям датчиков давления и расхода, выводимым в окно программы в режиме реального времени.

Далее осуществляется включение пропорционального распределителя в режим переключений по случайному закону. При достижении требуемых условий по температуре рабочей жидкости включается режим записи параметров. В течение испытаний ведётся визуальное наблюдение за состоянием стенда по параметрам, отображаемым в окне программы.

Далее автоматически производится завершение записи параметров и вывод полученных данных в виде графиков переходных процессов в диалоговом окне программы с целью дальнейших их сохранения и обработки.

6. Сохранение, обработка и формирование массива данных

Представленные в диалоговом окне программы данные сохраняются в виде векторов в текстовом формате и передаются для дальнейшей обработки в программу Matlab. В Matlab производится построение графиков и визуальный анализ полученных результатов. В случае необходимости осуществляется фильтрация полученных данных. В качестве инструмента фильтрации используется фильтр Баттерворта. В программе Matlab данные сохраняются в виде массивов с размерностью $M \times N$, где M - число строк - зависит от частоты дискретизации и времени записи, N - число записываемых параметров. Полученный массив данных передаётся для дальнейшей обработки в аппаратно-программный комплекс.

7. Оценка эффективности метода диагностирования ЭГМС на основе нейросетевого базиса

Оценка эффективности метода диагностирования с использованием созданного массива экспериментальных данных производилась совместно с аппаратно-программным комплексом диагностирования ЭГМС, основанного на методах машинного обучения [8]. Определение технического состояния системы производилось по предварительно обученной нейросетевой модели выявления неисправностей ЭГМС на испытательном стенде в реальном масштабе времени. Экспериментальные данные были записаны с размером окна 5000 измерений со смещением 50, что в совокупности составило 41744 примера динамических состояний системы. На рисунке 4 показан модуль управления и мониторинга состояния ЭГМС на платформе LabView. Красной рамкой на рисунке выделена область со схематичным изображением узлов ЭГМС, состояние которых необходимо было распознать.



Рисунок 4. Графические интерфейс модуля управления и мониторинга состояния ЭГМС на платформе LabView.

По итогам нескольких запусков стенда установлено, что в результате испытаний ЭГМС средняя точность верно распознанных состояний системы аппаратно-программным комплексом для диагностирования с созданными по изложенной методике массивами экспериментальных данных составляет 91 %.

8. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Департамента науки и образования Самарской области в рамках подпрограммы "Развитие инновационного территориального аэрокосмического кластера Самарской области" на 2015 - 2030 годы государственной программы Самарской области "Создание благоприятных условий для инвестиционной и инновационной деятельности в Самарской области" на 2014 - 2030 годы (Договор № 62-2 от 10 сентября 2019 года), а также грантов РФФИ (19-29-01235-мк, № 18-07-01390-А, № 19-29-09054-мк).

9. Литература

- [1] Далецкий, С.В. Формирование эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов гражданской авиации / С.В. Далецкий – М.: Воздушный транспорт, 2005. – 416 с.
- [2] Логвинов, Л.М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости / Л.М. Логвинов – М.: ЦНТИ «Поиск», 1992. – 91 с.
- [3] Схиртладзе, А.Г. Надежность и диагностика технологических систем: учебник / А.Г. Схиртладзе, М.С. Уколов, А.В. Скворцов – М.: Новое знание, 2008. – 518 с.
- [4] Sun, W. A sparse auto-encoder-based deep neural network approach for induction motor faults classification // Measurement. – 2016. – Vol. 89. – P. 171-178.
- [5] Qi, Y. Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 15066-15079.
- [6] Lu, C. Fault detection for hydraulic pump based on chaotic parallel RBF network / C. Lu, N. Ma, Z. Wang // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2011. – Vol. 2011(1). – P. 49.
- [7] Yuan, M. Fault diagnosis and remaining useful life estimation of aero engine using LSTM neural network / M. Yuan, Y. Wu, L. Lin // IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), 2016. – P. 135-140.
- [8] Li, H. Prognosis of Hydraulic Pump Based on Bispectrum Entropy and Deep Belief Network / H. Li, Z. Tian, H. Yu, B. Xu // Measurement science review. – 2019. – Vol. 19(5). – P. 195-203.
- [9] Lei, Y. Fault Diagnosis Method for Hydraulic Directional Valves Integrating PCA and XG Boost / Y. Lei, W. Jiang, A. Jiang, Y. Zhu, H. Niu, Sh. Zhang // Processes. – 2019. – Vol. 7(9). – P. 1-18. DOI: 10.3390/pr7090589.
- [10] Yao, Z. Artificial neural network-based internal leakage fault detection for hydraulic actuators: An experimental investigation / Z. Yao, Y. Yu, J. Yao // Proc IMechE Part I: J Systems and Control Engineering. – 2018. – Vol. 232(4). – P. 369-382.
- [11] Ritter, O. Intelligent Diagnostics for Aircraft Hydraulic Equipment / O. Ritter, G. Wende, R. Gentile, F. Marino, A. Carlo Bertolino, A. Raviola, G. Jacazio // European conference of the prognostics and health management society, 2018.
- [12] Jia, F. Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 72. – P. 303-315.

Experimental study of the effectiveness of the method for diagnosing electro- hydromechanical systems with consideration for the dynamics of processes based on a neural network basis

A.M. Gareev¹, P.I. Greshniakov¹, A.V. Nikonorov¹, A.G. Gimadiev¹, D.M. Stadnik¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Existing methods of monitoring electro-hydromechanical systems (EHMS), based on the achievement of the required indicators for output parameters and parameter measurements at steady-state modes, do not allow to diagnose their malfunctions in full. Therefore, diagnostic systems based on measuring EHMS parameters in dynamic mode are being developed. At the same time, there is a need to create data arrays related to measuring parameters in real time and processing numerous parameters to refine and verify the effectiveness of special machine learning methods. However, in the technical literature insufficient attention is paid to the experimental development and verification of the effectiveness of these methods. The article presents the methodology for creating such an array of data and evaluating the effectiveness of the diagnostic method taking into account the dynamics of processes as a result of experimental studies of EHMS in serviceable and faulty (with imitation of characteristic defects) states under various control actions. At the same time, bench equipment, a measuring and recording complex with an interface and the implementation of fault simulators, and programs for generating a data array were created. The results of experimental studies of the effectiveness of the diagnostic method with an ensemble of fault classifiers constructed from data sets on model training samples are presented. The article may be useful to specialists developing and implementing methods for diagnosing the technical state of EHMS of various technical objects.