

Формирование обучающих выборок для диагностирования технического состояния гидравлических систем методами машинного обучения

А.М. Гареев¹, А.Г. Гимадиев¹, А.В. Никоноров¹, Д.М. Стадник¹

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

Аннотация. Современные системы диагностирования и контроля сложных технических систем базируются на методах машинного обучения, для реализации которых требуется накопление и обработка больших объемов информации. Формирование данных на основе математического или имитационного моделирования является предпочтительным по сравнению с экспериментом, так как не только затрачивает меньше времени, но и позволяет имитировать неисправности, которые затруднительно или невозможно реализовать на стенде. Однако при этом возникает необходимость в разработке адекватной реальным процессам модели объекта диагностирования, а также в обработке и систематизации полученной информации. В работе на основе моделирования динамических процессов в гидравлической системе в исправном и неисправном состояниях при управляющем и возмущающем воздействиях сформированы массивы данных, используемые в машинном обучении для диагностирования её неисправностей. В результате виртуального моделирования в программном пакете SimulationX рассчитаны переходные процессы по основным параметрам гидравлической системы, адекватные экспериментальным данным. Разработан алгоритм обработки и систематизации переходных процессов, позволяющий формировать обучающие выборки при различных технических состояниях системы. Публикуемый материал может быть полезен для специалистов, разрабатывающих методы контроля и диагностирования гидравлических систем энергетических и технологических комплексов на основе методов машинного обучения.

1. Введение

Гидравлические системы (ГС) получили широкое распространение в различных отраслях промышленности благодаря их преимуществам: высокое быстродействие, большая удельная мощность, высокий КПД и коэффициент усиления, возможность бесступенчатой регулировки [1]. ГС зачастую выполняют ключевые функции в составе сложных технических объектов, что делает задачу обеспечения их надёжности весьма актуальной. При этом необходим комплексный подход, с одной стороны, требуется обеспечение высокого уровня надёжности ГС на этапе их проектирования и производства, а с другой – строгое соблюдение правил и норм их технического обслуживания и ремонта. Ключевую роль в обеспечении надёжности ГС играет именно эксплуатационная надёжность, высокий уровень которой достигается, в первую очередь, применением современных подходов, базирующихся на методах машинного обучения [2-12]. Данные методы позволяют реализовать упреждающий подход, при котором можно

заблаговременно обнаружить возможный отказ еще на этапе их зарождения, а также прогнозировать динамику изменения технического состояния системы.

Для реализации методов машинного обучения необходимо иметь соответствующие массивы данных - обучающие выборки, составленные на основе моделирования динамических процессов в гидравлических системах или их экспериментальных исследований в исправном и неисправном состояниях при управляющем и возмущающих воздействиях. Первый способ, основанный на основе моделирования процессов в системах является предпочтительным, особенно при отработке методов машинного обучения, так как позволяет оперативно изменять массивы данных с учётом типа, количества и мест установки в них датчиков измеряемых параметров, провести оптимизацию по точности распознавания имеющихся неисправностей. Другим преимуществом этого метода является возможность реализации практически любой неисправности в исследуемой системе, вплоть до изменения, например, трения или изменения характеристик золотниковых распределителей внутри агрегатов, до которых трудно подступиться экспериментально. Однако следует иметь также в виду, что виртуальная модель гидравлической системы должна соответствовать реальной системе и чем точнее, тем выше будет точность результата диагностирования.

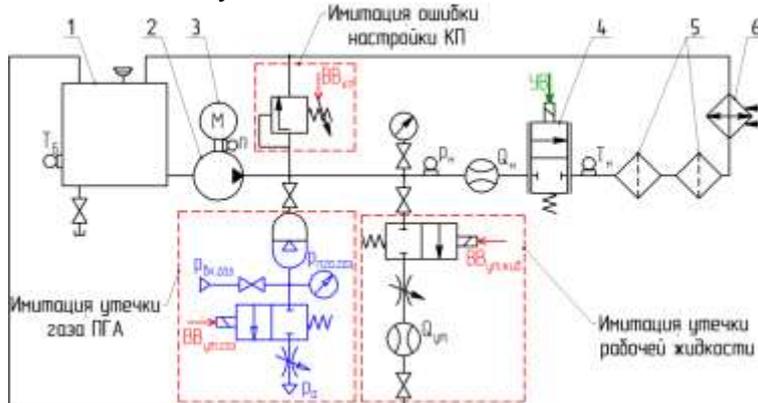
2. Разработка имитационной модели ГС

2.1. Описание принципиальной схемы ГС

На рисунке 1 представлена принципиальная схема типичной ГС, обеспечивающей подачу рабочей жидкости с требуемыми параметрами в распределительную и исполнительную подсистемы. Пунктирной красной линией на схеме отмечены фрагменты системы, в которых возможны характерные неисправности: ошибка настройки предохранительного клапана; утечка газа из пневмогидравлического аккумулятора (ПГА) и утечка рабочей жидкости из напорной линии на выходе из насоса. Для имитации работы распределительной и исполнительной подсистем используется двухлинейный двухпозиционный (2/2) пропорциональный распределитель, который при изменении площади проходного сечения приводит к изменению давления, расхода и температуры в системе. В исправном состоянии представленная система функционирует следующим образом. Рабочая жидкость из бака принудительно или самотеком поступает на вход насоса. Насос, приводимый во вращение от электродвигателя, нагнетает рабочую жидкость в напорную магистраль и далее в систему. ПГА обеспечивает снижение пульсаций давления от насоса и повышает податливость системы. Предохранительный клапан защищает насос от превышения давления выше допустимого значения за счёт перепуска рабочей жидкости на слив, выполняя функцию переливного клапана. Обеспечение чистоты рабочей жидкости и поддержание температуры осуществляется соответственно гидравлическими фильтрами и теплообменником. Пропорциональный 2/2 распределитель обеспечивает имитацию "нагружения" системы путем изменения площади проходного сечения. Например, при уменьшении площади проходного сечения происходит повышение давления рабочей жидкости в напорной линии и снижение производительности насоса из-за увеличения в нем внутренних утечек. Дальнейшее уменьшение площади проходного сечения пропорционального распределителя приводит к дальнейшему повышению давления в системе и открытию предохранительного клапана на перепуск части расхода жидкости на слив. Повышение мощности, теряемой на дросселирующих участках ГС, сопровождается повышением температуры рабочей жидкости и как следствие, изменением ее вязкости и плотности. Использование теплообменника позволяет поддерживать температуру рабочей жидкости в требуемом диапазоне. Давление предварительной зарядки ПГА обеспечивает быстрый выход на рабочее давление в ГС. При резком срабатывании пропорционального 2/2 клапана динамические процессы в ГС изменяются плавно при значении давления в системе выше давления зарядки ПГА за счет податливости его газовой.

Появление неисправности в системе, т.е. её отказ, по характеру проявления можно разделить на внезапный, постепенный и перемежающийся [13]. Отказ системы сопровождается изменением (скачкообразным или постепенным) статических и динамических характеристик по

отношению к номинальному состоянию системы. Анализ процессов с целью выявления дефектов и неисправностей в системе может осуществляться с помощью методов математического и физического моделирования. Для диагностирования системы требуется накопление и обработка больших объемов информации, поэтому применение физического моделирования объекта в таком случае становится затруднительным. Математическое моделирование динамических процессов в системе на основе уравнений законов механики, гидродинамики, электромагнетизма и т.п. в программных пакетах высокого уровня, позволяет получить необходимые объемы данных, которые в дальнейшем можно использовать для обучения нейросетевых моделей и создания на их основе систем диагностики и мониторинга состояния ГС различных машин и установок.



1 – бак; 2 – шестеренный насос; 3 – электродвигатель; 4 – пропорциональный распределитель; 5 – гидравлические фильтры; 6 – теплообменник; КП – предохранительный клапан
УВ – управляющее воздействие; ВВ – возмущающее воздействие

Рисунок 1. Принципиальная схема типовой гидравлической системы (станции подачи рабочей жидкости) с учетом возможных неисправностей.

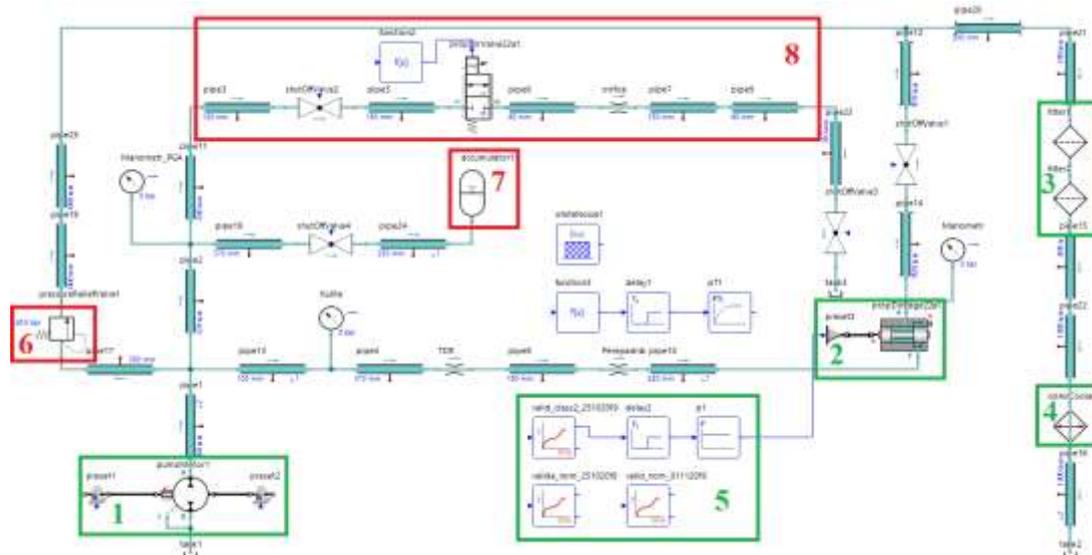
2.2. Разработка имитационной модели ГС в программном пакете SimulationX

Моделирование динамических процессов в ГС выполняется в программном пакете SimulationX, представляющий собой междисциплинарный программный комплекс для моделирования, симулирования, анализа и виртуального тестирования сложных мехатронных систем [14]. Создание модели в SimulationX происходит на основе использования готовых блоков (элементов), что позволяет значительно сократить время на получение конечного результата. В SimulationX используется подход, так называемый "физическая сеть", в котором создание модели происходит таким же образом, как при сборке реального объекта, то есть соединением готовых блоков, имитирующих работу того или иного устройства (насоса, трубопровода, распределителя, электродвигателя, гидроцилиндра и т.п.). Готовые блоки в программном пакете SimulationX в зависимости от функционального назначения и области применения объединены в библиотеки (гидравлика, ньютоновские жидкости, пневматика, механика, физические сигналы, электрика, электроника, магнетизм, транспортные средства, двигатели внутреннего сгорания, вибрационный анализ, акустика, тепловые процессы, системный анализ надежности и др.).

Создание имитационной модели происходит путем перетаскивания элементов в поле программы SimulationX и соединения с другими элементами. Подключение элементов осуществляется с помощью портов, причем подключить порт одного элемента к порту другого возможно в случае, если порты имеют сигнал одной и той же физической природы. Внешний вид полученной модели исследуемой ГС представлен на рисунке 2.

2.3. Имитация неисправностей

Имитация неисправностей рассматриваемой ГС в SimulationX осуществляется путем воздействия на структуру модели элемента (блока) или путем изменения его параметра в процессе интегрирования.



1 – насос с приводом; 2 – пропорциональный 2/2 распределитель; 3 – гидравлические фильтры; 4 – теплообменник; 5 – блок управления пропорциональным распределителем; 6 – блок имитации ошибки настройки КП; 7 – блок имитации утечки газа из ПГА; 8 – блок имитации утечки рабочей жидкости из напорной магистрали

Рисунок 2. Имитационная модель ГС с учетом неисправностей в программном пакете SimulationX.

В качестве примера можно рассмотреть неисправность "ошибку настройки предохранительного клапана". Данная неисправность может заключаться в виде некорректной настройки усилия затяжки пружины ПК, либо изменения жесткости пружины в процессе эксплуатации. В первом случае некорректное значение усилия предварительной затяжки задается в соответствующем блоке имитационной модели в первоначальный момент интегрирования. В другом случае, изменение жёсткости пружины производится в процессе интегрирования в соответствии с выбранным его законом. В самом простом случае эта команда может выглядеть следующим образом:

$$\text{if } time > a \text{ then } x \text{ else } y, \quad (1)$$

где if, >, then, else - операторы условий; a - момент времени возникновения неисправности; x, y - значения параметра (в рассматриваемом примере - параметр, характеризующий жёсткость пружины) после и до момента возникновения неисправности. Представленное выше выражение описывает ступенчатый переход между значениями параметра, что свойственно для внезапных отказов. Линейное изменение параметра во времени может быть задано с помощью следующего кода, который необходимо ввести в строку значения параметра в диалоговом окне настройки:

$$\text{if } time \leq t_1 \text{ then } y_1 \text{ elseif } time > t_1 \text{ and } time < t_2 \text{ then } \frac{y_1 - y_2}{t_1 - t_2} time + y_1 - \dots \\ t_1 \frac{y_1 - y_2}{t_1 - t_2} \text{ else } y_2 \quad (2)$$

Графическая интерпретация представленного кода (2) показана на рисунке 3.

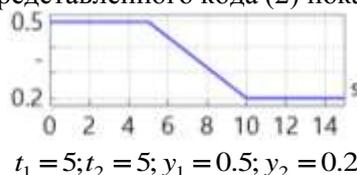


Рисунок 3. Изменение параметра по линейному закону.

Также возможно использование более сложных законов изменения параметров.

3. Теоретические исследования

Исследование динамики ГС посредством моделирования является важным этапом при разработке систем диагностирования, так как позволяет решить следующие задачи:

- выявить ключевые особенности работы ГС;
- провести сравнительный анализ влияния неисправностей в ГС на его характеристики;
- определить типы, места установки и количество датчиков в ГС;
- сформировать базу данных в виде массивов значений параметров ГС, полученных при различных его состояниях.

При моделировании динамических процессов в ГС включены в расчет следующие эффекты/допущения:

- трубопроводы рассматриваются как RLC элементы, то есть учитываются емкость, инерционность и активные потери;
- учитываются пульсации расхода шестеренного насоса;
- электродвигатель моделируется как аperiодическое звено с постоянной времени 0,2 с.

В качестве первой неисправности рассматривается *нарушение герметичности газовой полости ПГА (ПГА разряжен)*. Сравниваются временные реализации процессов в ГС в исправном состоянии и при наличии неисправности (рисунки 5-6). Для имитации данной неисправности перед запуском на расчет модели давление предварительной зарядки ПГА задается равным нулю. В качестве управляющего воздействия используется изменение площади проходного сечения пропорционального распределителя по случайному закону с равномерным распределением (рисунок 4).

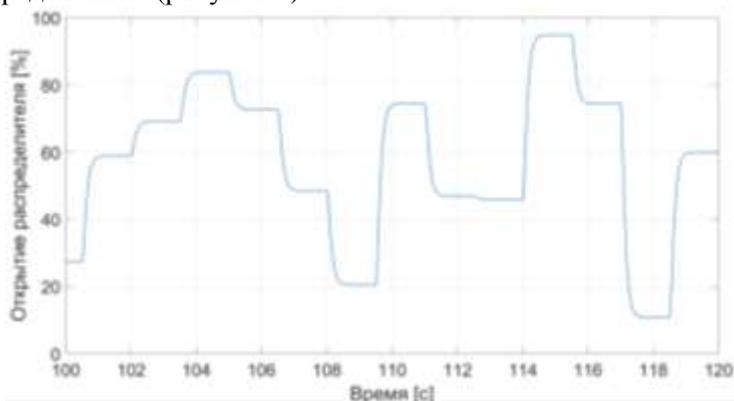


Рисунок 4. Переходные процессы изменения расхода через распределитель для исправной и неисправной ГС.

Анализ графика изменения расхода через распределитель в диапазоне от 101 до 106 с показывает снижение величины расхода из-за отсутствия дополнительного притока жидкости от ПГА (рисунок 5).

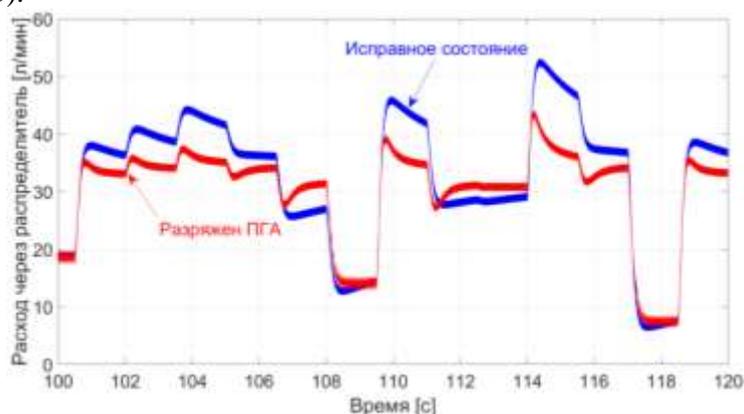


Рисунок 5. Переходные процессы изменения расхода через распределитель для исправной и неисправной ГС.

На графиках, представленных на рисунке 6, для ГС с разряженным ПГА при изменении площади проходного сечения распределителя происходят более резкие (скачкообразные) изменения давления по сравнению с исправным состоянием, что объясняется снижением податливости системы.

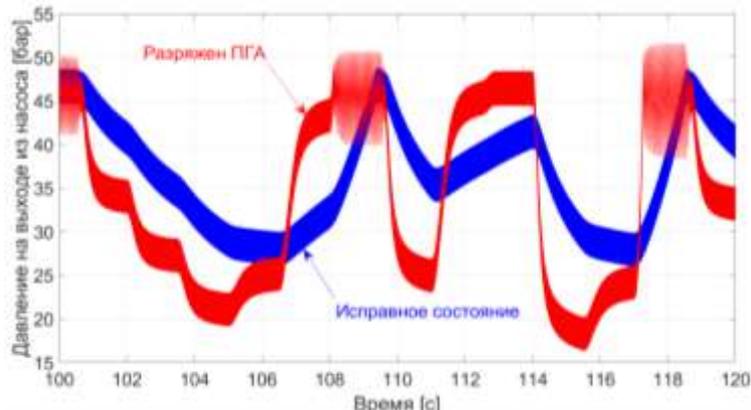


Рисунок 6. Переходные процессы изменения давления на выходе из насоса для исправной и неисправной ГС.

Анализ представленных выше результатов показывает, что рассмотренная неисправность оказывает существенное влияние на характеристики ГС: возрастает амплитуда пульсаций параметров, увеличиваются их градиенты. В качестве наиболее информативных параметров, по которым можно выявить существенные различия, являются давление на выходе из насоса (или в полости ПГА) и расход через распределитель.

Верификация имитационной модели проводилась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных при одинаковых условиях для ГС в исправном и неисправном состояниях: температура рабочей жидкости 50 С; частота вращения электродвигателя 2500 об/мин. В качестве управляющего воздействия был принят сигнал напряжения, подаваемый на пропорциональный распределитель в виде случайных чисел в диапазоне от 2 до 4 В с нормальным распределением.

На рисунке 7, представлены графики переходных процессов изменения давления на выходе из насоса, полученные для ГС с разряженным ПГА.

Анализ полученных результатов показывает, что различие между расчетными и экспериментальными данными, полученными для ГС в неисправном состоянии, не превышает 5 %. Сравнивая полученные результаты, можно отметить следующее: расчетные данные имеют плавные градиенты по сравнению с экспериментальными результатами, что вероятнее всего связано с неточностями при выборе настроек модели ПГА при имитации неисправности.

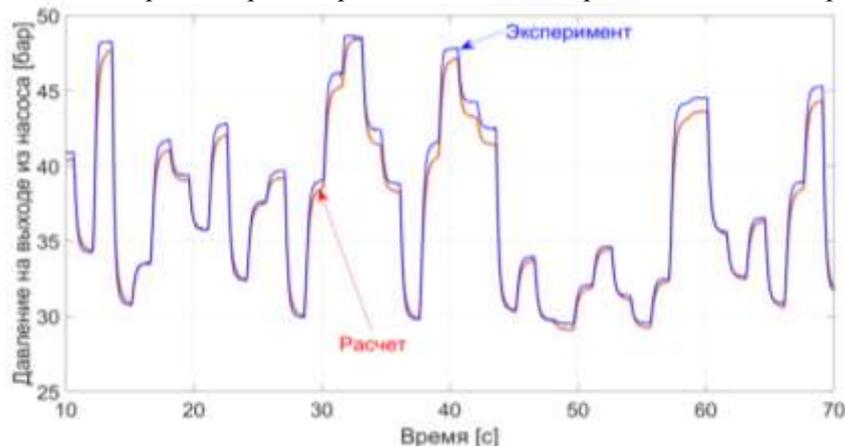


Рисунок 7. Сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных для неисправной ГС.

4. Алгоритм формирования обучающих выборок

Формирование обучающих выборок в виде массивов значений параметров ГС, полученных при различных ее состояниях, является важным этапом при разработке систем диагностирования, так как напрямую влияет на точность классификации. Формирование обучающих выборок ГС можно представить в виде алгоритма, основными этапами которого являются: виртуальное моделирование, сохранение, обработка и передача полученных данных в аппаратно-программный комплекс (АПК) с целью выполнения машинного обучения. Важной составляющей представленного алгоритма является необходимость коррекции условий моделирования с целью повышения точности классификации (рисунок 8).

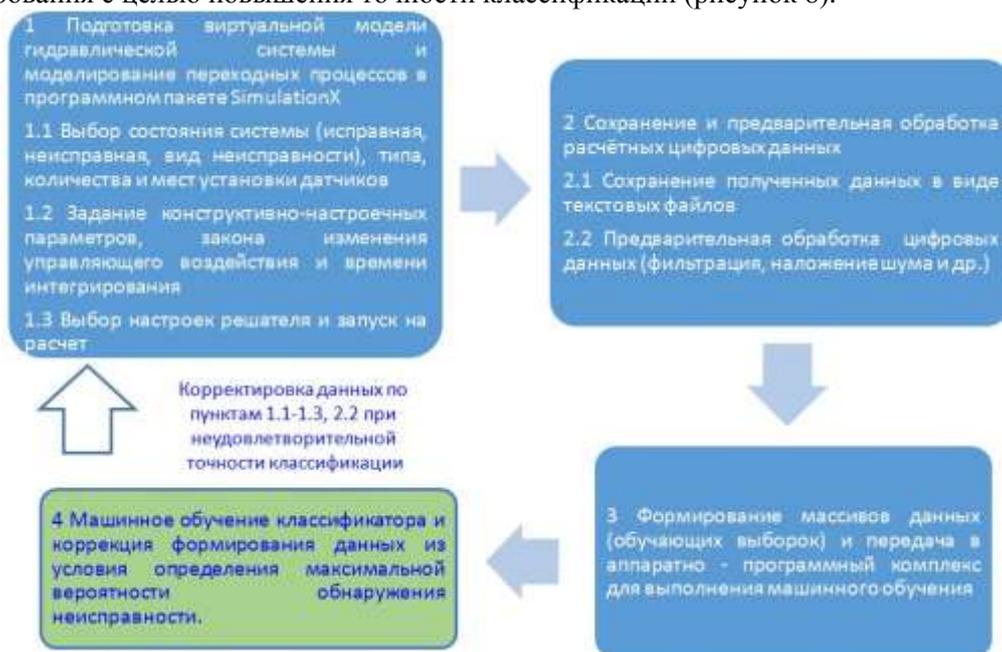


Рисунок 8. Алгоритм формирования и коррекции обучающих выборок.

Диагностирование технического состояния гидравлических систем методами машинного обучения невозможно без формирования обучающих выборок, которые могут быть получены путём моделирования в программных пакетах высокого уровня электро-гидромеханических процессов или проведения экспериментальных исследований. Первый способ предпочтителен, особенно при отработке методов машинного обучения, когда без существенных затрат можно оперативно корректировать полученные данные по типам, местам установки и количеству датчиков, частоте дискретизации временных реализаций, объёмам их выборок и др. параметры. Однако при этом необходимо быть уверенным в адекватности модели гидравлической системы реальным процессам. Экспериментальный метод формирования обучающих выборок для этапа отработки методов машинного обучения более затратный и его целесообразно применять уже при эксплуатации гидравлической системы. Предложенные в работе алгоритм формирования и коррекции обучающих выборок на основе моделирования электро-гидромеханических процессов в программном пакете SimulationX, как показали дальнейшие исследования, обеспечивают распознавание неисправностей систем методами машинного обучения.

5. 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). При частичной поддержке РФФИ (проект №19-29-01235-мк).

6. Литература

- [1] Наземцев, А.С. Пневматические и гидравлические приводы и системы. Часть 2. Гидравлические приводы и системы. Основы. Учебное пособие / А.С. Наземцев, Д.Е. Рыбальченко – М.: Форум, 2007. – 304 с.
- [2] Will, D. Hydraulik - Grundlagen, Komponenten, Schaltungen / D. Will, N. Gebhardt – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 450 p.
- [3] White, F.M. Viscous Fluid Flow / F.M. White – New York: McGraw-Hill, Inc, 1991. – 616 p.
- [4] Wen, L. A New Convolutional Neural Network Based Data-Driven Fault Diagnosis Method / L. Wen, X. Li, L. Gao, Y. Zhang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65(7). – P. 5990-5998.
- [5] Ahmed1, R. Automotive Internal Combustion Engine Fault Detection and Classification using Artificial Neural Network Techniques / R. Ahmed1, M. El Sayed, S.A. Gadsden1, J. Tjong, S. Habibi // IEEE transactions on vehicular technology. – 2015. – Vol. 64(1). – P. 21-33.
- [6] Kagawa, T. High Speed and Accurate Computing Method of Frequency-Dependent Friction in Laminar Pipe Flow for Characteristics Method / T. Kagawa, I.Y. Lee, A. Kitagawa, T. Takenaka // Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers. – 1983. – Vol. 49(447). – P. 2638-2644.
- [7] Wang, H. Data driven fault diagnosis and fault tolerant control: Some advances and possible new directions / H. Wang, T. Chai, J. Ding, B. Martin // Acta Autom. Sinica. – 2009. – Vol. 35(6). – P. 739-747.
- [8] Venkatasubramanian, V. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods / V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, S. Kavuri // Comput. Chem. Eng. – 2003. – Vol. 27(3). – P. 293-311.
- [9] Li, H. Fault 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.
- [10] Lei, Y. Fault Diagnosis Method for Hydraulic Directional Valves Integrating PCA and XGBoost / Y. Lei, W. Jiang, A. Jiang, Y. Zhu, H. Niu, S. Zhang // Processes. – 2019. – Vol. 7(9). – P. 1-18. DOI:10.3390/pr7090589.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Образовательный портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://proizvodstvo.s-zemlz-cha.edusite.ru/osnovnie%20ponyatiya.html> (13.10.2019).
- [14] Официальный сайт ПО SimulationX [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.simulationx.com/> (18.10.2019).

Datasets gathering for hydraulic systems technical diagnosis using machine learning methods

A.M. Gareev¹, A.G. Gimadiev¹, A.V. Nikonorov¹, D.M. Stadnik¹

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

Abstract. Modern systems for diagnosing and monitoring complex technical systems are based on machine learning methods, which require the accumulation and processing of large amounts of information. The compilation of data based on mathematical or simulation modeling is preferable in comparison with the experiment, since it not only spends less time, but also allows you to simulate malfunctions that are difficult or impossible to implement at the test rig. However, this necessitates the development of a model of the diagnostic object adequate to real processes, as well as the processing and systematization of the information received. In this work, based on the modeling of dynamic processes in the hydraulic system in good and faulty states in the SimulationX software package training sets are compiled that are used in machine learning to diagnose system failures. The transients of the main parameters of the system are calculated that are adequate to experimental data, an algorithm for their processing and the compilation of training sets is developed. The published material may be useful for specialists developing methods for monitoring and diagnosing hydraulic systems of energy and technological complexes based on machine learning methods.