

УДК 629.5.058.76:62-7

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОПРИВОДА

Никитченко С.Л., к.т.н., доцент, E-mail: binom_a@rambler.ru

Игнатьева О.В., к.т.н., доцент, E-mail: lesjaignateva@rambler.ru

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация

Гидравлический привод широко применяется в конструкциях наземных транспортно-технологических средств. Методы дистанционного диагностирования с автоматизированной оценкой технического состояния узлов и агрегатов гидропривода в режиме реального времени и мгновенная отправка результатов контроля на компьютер инженера по сервису позволяют осуществлять постоянный мониторинг удалённого объекта, снизить простои по техническим причинам, прогнозировать и предупредить назревающие отказы. Цель работы – исследовать возможности создания системы дистанционного диагностирования технического состояния гидропривода мобильных машин на основе отечественных компонентов. Авторы использовали аналитический метод исследования, установили перечень параметров технического состояния гидропривода, рассмотрели типовую структуру системы дистанционного диагностирования, для которой выбрали модели отечественных датчиков, устройства и протоколы обмена данными, инструменты разработки пользовательских программ.

Ключевые слова: гидропривод, техническое состояние, дистанционное диагностирование, телематическая система, датчик, протокол HART, GSM, TCP/IP

SELECTION OF SYSTEM ELEMENTS FOR REMOTE DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF A HYDRAULIC DRIVE

Nikitchenko S.L., Candidate of Technical Sciences, associate professor,

E-mail: binom_a@rambler.ru

Ignatyeva O.V., Candidate of Technical Sciences., associate professor,

E-mail: lesjaignateva@rambler.ru

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract

Hydraulic drive is widely used in the construction of ground transportation and technological facilities. Remote diagnostic methods with automated assessment of the technical condition of hydraulic drive components and assemblies in real time and instant transmission of control results to the service engineer's computer allow continuous monitoring of a remote facility, reduce downtime due to technical reasons, predict and prevent impending failures. The purpose of the work is to explore the possibilities of creating a system for remote diagnosis of the technical condition of hydraulic drives of mobile machines based on domestic components. The authors used an analytical research method, established a list of parameters for the technical condition of the hydraulic drive, examined the typical structure of the remote diagnostics system, for which they selected models of domestic sensors, devices and data exchange protocols, and tools for developing user programs.

Keywords: hydraulic drive, technical condition, remote diagnostics, telematics system, sensor, HART protocol, GSM, TCP/IP

Введение

В конструкциях современных машин распространены различные гидравлические системы, которые позволяют приводить в действие поступательно движущиеся или вращающиеся рабочие органы [1]. Гидравлический привод имеет особое значение для мобильных наземных транспортно-технологических средств – грузовых и специальных автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной техники. С помощью гидропривода осуществляются рабочие процессы данных машин, поэтому для обеспечения качества работы транспортно-технологических средств важно следить за техническим состоянием отдельных узлов гидропривода. Сегодня актуальна перспективная стратегия поддержания работоспособности техники, ориентированная на постоянный или периодический контроль состояния систем и механизмов с предупреждением отказов и прогнозированием остаточного ресурса узлов и агрегатов машины.

При этом процесс диагностирования технического состояния у большинства машин остаётся довольно трудоёмким, требует их остановки и проведения дополнительных разборочных работ. Здесь простой негативно сказывается на технико-экономических показателях эксплуатируемых объектов. Существенно снизить простой машин по техническим причинам позволяют телематические системы [2] и методы дистанционного диагностирования [3], которые реализуются с применением современных информационных технологий и развитием бортовых систем машин. Благодаря своевременному обнаружению неисправностей с помощью таких систем можно снизить затраты на содержание и эксплуатацию техники до 30%.

С конца 90-х годов XX века методы дистанционного диагностирования технических объектов получили применение в виде SCADA-систем [4], а в настоящее время они стали обыденным инструментом Интернета-вещей и интегрируются с системами управления предприятиями ERP, CMMS [5], EAM [6]. Автоматизация процессов оценки технического состояния гидронасосов, гидромоторов, гидрораспределителей, фильтров и других «умных» составных частей гидропривода в режиме реального времени и мгновенная отправка результатов диагностирования на компьютер инженера по сервису позволяют осуществлять постоянный мониторинг технического состояния гидропривода, выявлять причины неисправностей, прогнозировать и предупреждать назревающие отказы. Реализация таких дистанционных технологий контроля мобильных технических объектов сегодня связана с процессами импортозамещения в отечественном машиностроении.

Цель данной работы – исследовать возможности создания системы дистанционного диагностирования технического состояния гидропривода мобильных машин на основе отечественных компонентов. В статье рассматривали гидроприводы с возможными характеристиками давления и расхода жидкости, характерными для насосов НШ-10 и НШ-32, которые широко применяются в конструкциях отечественных наземных транспортно-технологических средств.

1. Анализ темы с обзором источников

Задача разработки системы для дистанционного диагностирования технического состояния удалённого объекта требует системного подхода, при котором необходимо знать: устройство самого объекта, суть процессов при его работе, параметры технического состояния каждого узла объекта и существующие традиционные методы их диагностирования. Далее необходимы знания о принципах функционирования дистанционных систем диагностирования – методах сбора первич-

ных данных с помощью сенсоров, протоколах передачи данных и методах их анализа, принципах работы телеметрии и используемых средствах коммуникации, специализированном программном обеспечении.

1.1. Устройство и параметры технического состояния гидропривода

В качестве объекта диагностирования будем рассматривать типовой гидравлический привод, схема которого показана на рисунке 1. Гидропривод содержит гидробак (ГБ) 1 с маслом, шестерённый гидронасос (ГН) 2 типа НШ, гидрораспределитель (ГР) 3, гидроцилиндр (ГЦ) 4 одностороннего действия. Очистка масла осуществляется фильтром 5, предохранительный клапан (ПК) 6 позволяет избежать разрушения узлов гидросистемы при нештатных ситуациях, вызывающих повышение давления. Все перечисленные элементы соединены рукавами высокого давления и трубопроводами.

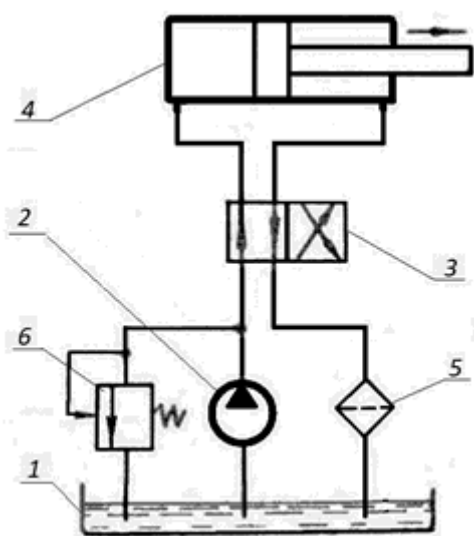


Рисунок 1. Принципиальная схема гидропривода

Рассмотрим параметры технического состояния гидропривода [7]. Работоспособность ГН принято оценивать по величине давления в нагнетательной магистрали ГН и по значению расхода масла (подаче) ГН. Давление срабатывания ПК также является диагностируемым параметром при оценке технического состояния гидропривода.

Состояние ГР характеризуется величиной утечек жидкости, которые могут быть определены как разность между подачей ГН и величиной расхода жидкости в магистрали после ГР.

Степень засоренности фильтра можно оценить величиной давления масла в сливной магистрали перед фильтром. Номинальное значение этого давления у разных конструкций гидроприводов может отличаться, но максимальное давление слива в гидросистеме, например у отечественных тракторов, строго регламентировано ГОСТ 32485-2013 и не должно превышать 1 МПа.

Оценку состояния гидроцилиндра проводят по значению давления в надпоршневой полости и соответствующей ему величине скорости и линейного перемещения штока, а также визуально по наличию подтекания масла через уплотнения ГЦ.

Недостаток рабочей жидкости в гидросистеме приводит к потере её работоспособности, поэтому уровень масла в баке тоже является контролируемым параметром.

При работе системы нагрев масла более 50 °С недопустим, поскольку при этом изменяются его вязкостные свойства и это негативно сказывается на работе гидропривода. Реальные гидроприводы могут иметь радиатор на гидробаке для охлаждения масла. Контроль температуры масла в баке является обязательным, поскольку это косвенно позволит судить о состоянии системы охлаждения масла.

Существующие типовые технологии диагностирования в стационарных условиях реализуются на определённом режиме работы гидронасоса, т.е. необходимо знать частоту вращения приводного вала насоса [8]. Наиболее распространённым и точным методом диагностирования является статопараметрический метод, при котором имитируются определённые нагрузочные режимы гидропривода, например с помощью дросселя-расходомера приспособления КИ-5473 ГОСНИТИ, и при установленном давлении определяются значения расхода жидкостей в нужных сечениях. Все это сопровождается разборочно-сборочными работами на остановленной машине, что довольно трудоёмко. Технологию диагностирования гидропривода необходимо автоматизировать и реализовать дистанционно.

1.2. Существующие системы дистанционного диагностирования удалённых объектов

Контролировать на расстоянии различные объекты и процессы люди начали после изобретения телематических систем. Они представляют собой комплекс автоматизированных средств, который позволяет получить первичную информацию о параметрах технологических процессов, преобразовать и передать информацию по разным каналам связи, выполнить приём, обработку и регистрацию информации. Первые телематические системы для гражданских отраслей появились в 70-х годах, их использовали для контроля стационарных удалённых объектов. Позже выделился целый класс таких систем с названием SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система диспетчерского контроля, сбора данных и дистанционного управления объектами. К 90-м годам XX столетия SCADA-системы приобрели человеко-машинный интерфейс и стали частью автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) предприятий. Итоговая информация в них представляется человеку в удобном для восприятия виде с помощью специального программного обеспечения (приложения).

Известными телематическими системами с функциями удалённого диагностирования объектов и планирования мероприятий их технической эксплуатации являются современные зарубежные продукты JDLINK, Fleet Complete, TELEMATICS (CLAAS), Cat Product Link [9] и др. SCADA-система InTouch существует на рынке почти 30 лет и является одной из самых популярных систем в мире. Известными российскими телематическими системами являются «АвтоГРАФ» – система спутникового мониторинга и контроля транспорта [10], MasterSCADA от компании НПФ ИнСАТ – автоматизация объектов любого масштаба, «PCM Агротроник» и «Агромонитор» – системы точного земледелия и дистанционного диагностирования машин [11] и др. Ведутся работы по созданию аппаратно-программных платформ сбора и обработки эксплуатационных данных сельскохозяйственной техники [12].

Имеющийся перечень систем дистанционного диагностирования не снижает актуальности дальнейших исследований в области комплексной оценки технического состояния гидроприводов мобильных машин в удалённом режиме.

2. Методы проведения исследований

Методологическую основу исследования составили методы анализа, синтеза и логического обобщения. Теоретической и методической основой исследования являются труды ученых, посвященные исследованию сущности, структуры и условий функционирования информационных систем для дистанционного диагностирования технических объектов, материалы открытого доступа от ведущих зарубежных и российских компаний, осуществляющих разработку и внедрение телематических систем и их компонентов.

3. Результаты и их обсуждение

Рассматриваемая телематическая система с функцией дистанционного диагностирования традиционно представляет из себя три взаимосвязанных блока: удалённый терминал (RTU – Remote Terminal Unit), диспетчерский пункт управления (MTU – Master Terminal Unit) и коммуникационная система (CS – Communication System).

RTU подключается непосредственно к контролируемому объекту и осуществляет сбор информации о параметрах технического состояния объекта в режиме реального времени. RTU является автономным устройством связи с объектом (УСО) и в реальных продуктах часто выполнен в виде микроконтроллерного блока (трекера) с набором датчиков (преобразователей), присоединяемых к трекеру двухпроводной линией. Питание датчиков напряжением 24 В осуществляется по этим же двум проводам. Значения параметров технического состояния объекта (механические величины) измеряются датчиками с помощью так называемой токовой петли 4...20 мА [13]. Обмен данными между датчиками и контроллером может осуществляться по протоколам Modbus RTU, HART или др. Датчики генерируют аналоговые сигналы, которые передаются по внутренней сети RTU к контроллеру через устаревший интерфейс 4-20 мА или через более современный последовательный интерфейс RS-485. Последний рассматривается в качестве физического уровня для протокола передачи данных Modbus RTU.

Применение популярного в промышленных сетях протокола скоростного адресного доступа к удаленному преобразователю (Highway Addressable Remote Transducer, HART) дает возможность передавать больше информации по той же двухпроводной линии, при этом протокол HART может отправлять цифровые сигналы, накладывая их на аналоговые сигналы без искажений или помех. Устройства, основанные на протоколе HART, передают аналоговый сигнал, используя существующий подход 4–20 мА, а также цифровые сигналы, используя частотную манипуляцию Bell 202. Это гарантирует, что аналоговый сигнал не будет подвержен влиянию цифрового сигнала. Уже существует беспроводная версия этого протокола – WirelessHART, которая работает на основе технологии самоорганизующихся ячеистых сетей (Mesh Network). Это очень полезное свойство версии протокола и его в будущем можно использовать для самоорганизации системы на уровне RTU при добавлении новых точек диагностирования объекта. Однако, пока беспроводной вариант в нашем случае работать не сможет, поскольку есть ограничения на расстояния установки адаптеров WirelessHART от металлических поверхностей. Микроконтроллер MTU в своей структуре содержит GSM-модем, GPRS-модем или универсальный вариант GPRS/GSM-модема. Это может быть выполнено также в виде отдельного блока передачи данных DTU (Data Transfer unit).

Телематическая система в принципе способна передавать данные от RTU к MTU по какому-то одному протоколу беспроводной связи. Протокол пакетной передачи данных GPRS является надстройкой стандарта GSM и характеризуется относительно небольшой пропускной способностью по сравнению, например с протоколом GSM 4G (LTE). Если объем передаваемых данных измеряется килобайтами, то в устройстве контроллера RTU или в блоке DTU достаточно иметь GPRS-модем. А в случае увеличения объема трафика свыше Mb (например мы поставим web-камеру для визуального контроля состояния гидроцилиндра) понадобится GSM-модем.

При современном развитии Интернет-технологий уже нерационально рассматривать MTU в виде одиночного компьютера с приложением для пользователя и с дополнительными устройствами подключения к каналам связи. Устройства пользователей (девайсы) – ноутбуки, планшеты или смартфоны могут вообще ничего не содержать из элементов рассматриваемой телематической системы. Система управления базой данных (СУБД) с результатами телеметрии и приложение для доступа к системе в этом случае располагаются на облачном сервере, а приложение для доступа все заинтересованные специалисты могут открывать через обычный интернет-браузер. Либо здесь может быть вариант, когда на девайс инженера устанавливается клиентское приложение, которое позволяет работать с облачным сервером.

Коммуникационная система CS обеспечивается путем интеграции разрабатываемой телематической системы в уже существующие информационные инфраструктуры – каналы сотовой связи стандарта GSM в сочетании с проводным Интернетом. В России мобильная связь стандарта GSM уже очень развита, поэтому для нашего проекта здесь ничего создавать не нужно, а просто использовать как есть. Протокол WAN (Wide Area Network) глобальной вычислительной сети участвует в работе телематической системы – он служит для объединения разрозненных сетей так, чтобы пользователи, компьютеры и удаленные устройства, где бы они ни находились, могли взаимодействовать со всеми остальными участниками глобальной сети. Для бесшовного переключения между различными вариантами WAN-подключений здесь используется протокол Mobile IP (MIP). Переключение происходит автоматически за очень короткий интервал и не воспринимается как прерывание связи.

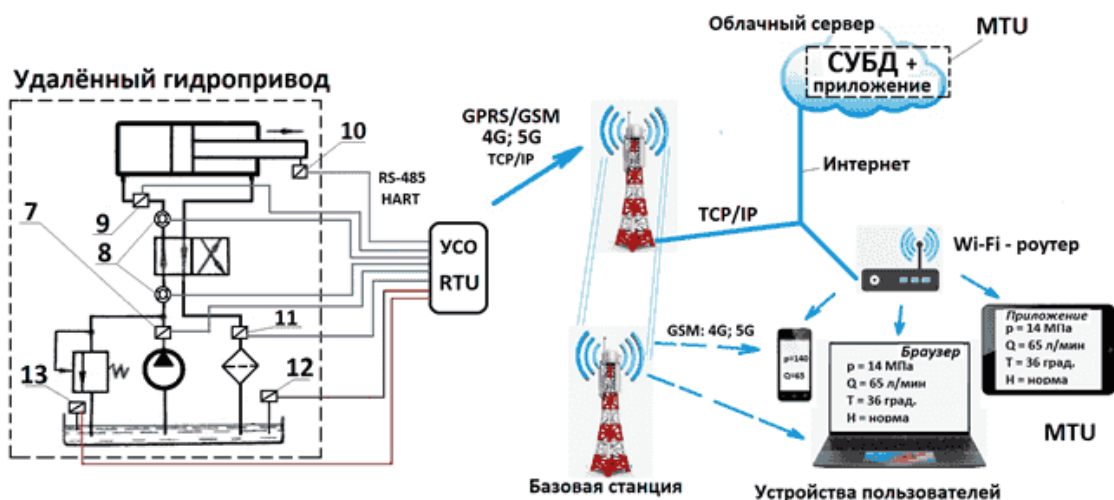


Рисунок 2. Схема системы дистанционного диагностирования гидропривода

С учётом приведённых сведений, на рисунке 2 показана схема системы дистанционного диагностирования гидропривода мобильного транспортно-технологического средства. Места установки датчиков на схеме совпадают с местами присоединения диагностических приспособлений при традиционной технологии диагностирования. В остальном схема содержит типовой набор элементов и кардинально не отличается от существующих аналогов.

Анализ продукции российских производителей сенсорных устройств позволили выбрать для рассматриваемой системы диагностирования необходимый набор датчиков, которые перечислены в таблице. В таблице 1 указаны типы, места установки датчиков, возможные пределы значений измеряемых величин и рекомендуемые модели датчиков. Номера датчиков совпадают с номерами, приведенными на схеме рисунка 2.

Таблица 1. Характеристики и места установки датчиков

Тип и номер датчика	Место установки	Измеряемый параметр	Пределы измерения	Модели датчиков	Выходной сигнал
Датчик давления масла (7)	Напорная магистраль ГН	Давление в напорной магистрали ГН	0...20 МПа	МПД-07; DMP 333; ЕСМА Р500	4...20 мА; 0...5 В; HART; RS485
Датчик расхода масла (8)		Подача ГН	5...200 л/мин	ЕСМА Р500; US-800; ЭМИС-ДИО 230	4...20 мА; HART; RS485
Датчик расхода масла (8)	Напорная магистраль после ГР	Расход через распределителя ГР	5...200 л/мин	ЕСМА Р500 US-800; ЭМИС-ДИО 230	4...20 мА; HART; RS485
Датчик давления масла (9)	На входе в надпоршневую полость ГЦ	Давление в надпоршневой полости ГЦ	0...20 МПа	МПД-07; DMP 333; ЕСМА Р500	4...20 мА; 0...5 В; HART
Датчик линейных перемещений (10)	Корпус или шток гидроцилиндра ГЦ	Длина выхода штока ГЦ	0...300 мм	ТЛ-С 10-0	4...20 мА; RS485 ModBus RTU
Датчик давления масла (11)	Сливная магистраль перед фильтром	Давление на входе в фильтр гидросистемы	0,05...1,0 МПа	ИЗМЕРКОН-ДИ-21; СЕНСОР-М-125-И1-t2-0,25-К1-(1,6МПа/42)/М	4...20 мА RS485 Modbus RTU; HART
Датчик уровня (12)	Бак гидросистемы	Уровень масла в баке ГС	0...1000 мм	МПУ-01; ДИ/Г-27; Эскаорт ТД-150; Arnavi LS 2DF	4...20 мА; HART; RS485; 0,2...9,5 В
Датчик температуры (13)	Бак гидросистемы	Температура масла в баке	-35 ... +80 °С	МПТ-01; СКОРСА 01-П-70-300-Ш	4...20 мА;
Датчик частоты вращения вала ГН	Зона привода ГН	Частота вращения ведущего вала ГН	0...3500 об/мин	КАМАЗ Startvolt; ДТА СКОРСА 02-1-200	4...20 мА; 0,2...10 В; 1,25...6 В

Все указанные в таблице датчики являются продукцией российских компаний «Мераприбор», «ЭСКОРТ», «Измерение и Контроль», «СКОРСА», «Тета Технологии», ГК «ЭМИС», «ЭЛ-СКАДА» и «ТрейсЛайн». Видно, что предложения отечественных производителей датчиков полностью обеспечивают потребность в них при решении рассматриваемой задачи.

Имеющиеся серийные образцы датчиков расхода в основном предназначены для работы под давлением не более 6,4 МПа, а рабочее давление в рассматриваемом

нами гидроприводе достигает 16 МПа и более. Компании-производители могут изготовить датчики, работающие под высоким давлением, по специальному техническому заданию от заказчика. Также в настоящее время хорошей тенденцией является изготовление гидроаппаратов, уже оснащённых сенсорами. Такие устройства легче интегрировать с телематической системой. Это было бы очень удобно для организации диагностирования, например гидроцилиндра. Размещение магнито-стрикционного датчика линейных перемещений ТЛ-С 10-0 на штоке гидроцилиндра не очень рационально, поскольку соединительные провода и сам датчик могут быть повреждены внешними предметами при работе ГЦ. В мире давно практикуется размещать сенсорные устройства внутри конструкции цилиндров. Российская компания «Орион» развивает производство гидроцилиндров со встроенными датчиками положения.

Датчики являются существенной частью блока RTU, но в нем еще должен быть микроконтроллер с GSM/GPRS модемом. В России выбор микроконтроллеров собственного производства пока ограничен. Однако, для рассматриваемой задачи не нужны большие вычислительные мощности и здесь можно подобрать варианты российских микроконтроллеров. Например продукты отечественных компаний «Миландр» и «Микрон», которые специализируются на разработке микроконтроллеров для интернета вещей, систем мониторинга и телеметрии. Компания «Миландр» выпускает 32-разрядный микроконтроллер MDR1206FI на базе процессорного ядра BM-310S с открытой архитектурой набора команд RISC-V (не требует лицензионных отчислений), а также микроконтроллеры типа K1986BE92FI на базе процессорного ядра ARM Cortex-M3, являющиеся изделиями с высоким уровнем ответственности. Компания «Микрон» в 2024 году начала массовые продажи микроконтроллера МК32 «Амур» (K1948BK018) с архитектурой набора команд RISC-V. Российские производители также освоили выпуск модемов GPRS/GSM. Их производят компании АО «Телеофис», iRZ, АО «Элдис», ОВЕН, Segnetics и др. Для наших целей подойдет GSM модем TELEOFIS RX108-R4 с типом основного интерфейса RS-485 и с поддержкой режима GPRS. Модем выполнен на базе итальянского GSM-модуля Telit GL865-DUAL V3.1 и предназначен для беспроводного обмена данными в системах дистанционного мониторинга и диспетчеризации промышленных объектов. Встроенный интерпретатор языка программирования Python позволяет пользователю загружать в модем собственное ПО (пользовательские скрипты) и управлять прибором без использования внешнего микроконтроллера. Т.е., в системах телеметрии сегодня при определённых условиях можно обходиться без микроконтроллеров и отправлять данные через GPRS/GSM-модемы. Выбранный модем способен реализовать логику управления без использования внешнего микроконтроллера.

На рисунке 3 показан внешний вид датчика давления МПД-07, GSM модема и микроконтроллера МК32 «Амур».



Рисунок 3. Датчик давления МПД-07 (а), GSM/GPRS модем TELEOFIS RX108-R4 (б) и микроконтроллер МК32 «Амур» (в)

В блоке MTU нашей системы основными компонентами являются база данных и приложение для пользователей. СУБД должна иметь соответствующие характеристики для работы на интернет-сервере, быть надёжной и бесплатной. Одной из систем с растущей популярностью здесь является СУБД PostgreSQL, которая распространяется по свободной лицензии. Можно использовать её, либо построенные на ее основе версии российских СУБД – Tantor, Proxima DB, Postgres Pro, Jatoba, Квант-Гибрид, Arenadata PG. Заслуживают внимания также полностью российские СУБД Линтер, SoQoL, РЕД База Данных и др. При выборе языка программирования и среды разработки для создания пользовательского web-приложения нужно учитывать, что информационная система будет не только выполнять функции дистанционной диагностики, но и в перспективе решать задачи прогнозирования остаточного ресурса узлов гидропривода. Следовательно, нужно иметь серьёзные библиотеки анализа данных. Для этих целей подходит язык Python. Бесплатный фреймворк с открытым кодом Django позволяет писать web-приложения на языке Python, при этом официально поддерживает и предоставляет функционал для СУБД PostgreSQL.

Заключение

Выполненное исследование показывает, что независимо от внешних санкций, отечественные производители сенсорных устройств, модулей сбора информации с удалённых объектов и ее передачи по каналам GSM, а также разработчики программных средств анализа, хранения и визуализации информации способны обеспечивать импортозамещающие технологические цепочки при создании системы дистанционного мониторинга и диагностирования гидроприводов мобильных машин. Все элементы рассматриваемой системы уже выпускаются отечественными производителями. Данное исследование актуально, а его результаты позволят сократить количество отказов гидроприводов машин, время поиска их неисправностей и затраты на эксплуатацию.

Список использованной литературы

1. Трушин Н.Н. Разработка системы классификации объемных гидравлических приводов машин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. № 3 (9). С. 18-22.
2. Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Гольяпин В.Я., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Системы телеметрии и мониторинга сельскохозяйственной техники: аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 76 с.
3. Фукс В.А. Универсальная система удаленной диагностики транспортных средств. Молодой ученый. 2019. № 12 (250). С. 40-44.
4. Алексеев Д.А. Основные понятия и структура системы SCADA // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". 2023. № 13. С. 110-114.
5. Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 33-42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>.
6. Никитченко С. Л., Капкаев А. А., Юхнов В. И., Муконина М. И. Управление жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации в условиях цифровизации производства // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 194–204. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>. (дата обращения: 17.02.2025)

7. Мукушев Ш.К. Диагностирование гидропривода / Мукушев Ш.К., Гамалий Д.А., Байбисенова А.А. // В сборнике: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов II Национальной научно-практической конференции. 2019. С. 105-108.
8. Чиликин А.А., Трушин Н.Н. Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 117–127.
9. Никольский С.М. Автоматизация производственных процессов за счет внедрения прогрессивной измерительной техники // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 9. С. 307-312.
10. Михайлов А.С. Система мониторинга и контроля транспорта "АвтоГраф" как неотъемлемая часть современной эксплуатации машинно-тракторного парка // В сборнике: Передовые достижения науки в молочной отрасли. Сборник научных трудов по результатам работы IV Международной научно-практической конференции, посвящённой дню рождения Николая Васильевича Верещагина. 2022. С. 211-215.
11. Шишурин С.А. Современные цифровые решения для мониторинга состояния мобильных энергетических средств / Шишурин С.А., Гончаров Р.Д., Исаев А.Д., Россошанский С.Д. // В сборнике: Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки. Материалы II Региональной научно-технической конференции. Саратов, 2024. С. 36-42.
12. Зуб Д.В. Разработка аппаратно-программной платформы сбора и обработки эксплуатационных данных сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. – 2020. – Т. 58. – № 1 (138). – С. 162-167.
13. Зиязев А.Н. Датчики давления с токовой петлей 4-20 мА. Принцип работы. Диагностика неполадок // В сборнике: EurasiaScience. Сборник статей LVI международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 68-70.