

УДК: 630:004.03:681.5

DOI: 10.18324/2077-5415-2025-3-59-65

Внедрение модулей мехатронных систем в управление гидравлическим манипулятором форвардера

Е.В. Головина^а, А.А. Павлов^б

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия

^а GolovinaEV@volgatech.net, ^б PavlovAI@volgatech.net

^а <https://orcid.org/0009-0001-8708-7406>

Статья поступила 18.06.2025, принята 08.09.2025

В статье рассмотрены способы внедрения в систему управления гидравлическим манипулятором лесной машины элементов мехатронных модулей, которые позволяют преодолеть системе нелинейность и изменчивость параметров окружающей среды и рабочих условий. Данная модель позволит системе динамически подстраиваться к изменениям внешних и внутренних условий. Для создания модели был подобран в качестве логического устройства ПЛК ОВЕН160, который будет управлять работой электромагнитных гидравлических распределителей, а также магнитные датчики положения. Смоделированное устройство мехатронного модуля может быть успешно внедрено в управление движением стрелы манипулятора для повышения надежности работы и улучшения динамических свойств гидроаппаратуры. Авторская программа, написанная для управления данной системой, достаточно проста и может быть легко изменена при необходимости смены функциональной задачи гидропривода. Цель исследования – повышение надежности работы и динамических свойств гидроманипуляторов лесных машин через создание модели электронного модуля мехатронной системы для интеллектуального управления движением гидроцилиндра, ориентированных на выполнение определенных функций в лесозаготовках. К методам исследования относятся моделирование мехатронного модуля системы автоматического управления движением штока гидроцилиндра стрелы манипулятора лесной машины. В результате разработки модели электромеханического модуля, появляется возможность его внедрения в систему управления гидроаппаратурой, в результате чего достигается высокая точность наведения захватного устройства манипулятора, а также четкость работы гидросистемы. Смоделированная система визуализации позволит оператору лесной машины контролировать работу каждого элемента гидросистемы как по отдельности, так и в целом. Проверка модели манипулятора с внедренной системой управления предполагается на исследовательском комплексе «Гидравлический перегрузочный манипулятор» СГУ ГПМ в ФГБОУ ВО «ПГТУ» г. Йошкар-Ола.

Ключевые слова: автоматическое управление, ПЛК ОВЕН160, гидравлический распределитель гидроцилиндра стрелы, управляющая программа на языке Codesys, повышение надежности гидравлического манипулятора.

Implementation of mechatronic system modules in the control of a forwarder hydraulic manipulator

E.V. Golovina^а, A.A. Pavlov^б

Volga State University of Technology; 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Russia

^а GolovinaEV@volgatech.net, ^б PavlovAI@volgatech.net

^а <https://orcid.org/0009-0001-8708-7406>

Received 18.06.2025, accepted 08.09.2025

The article discusses the methods of introducing mechatronic module elements into the control system of a forest machine hydraulic manipulator, which allow the system to overcome nonlinearity and variability of environmental parameters and operating conditions. This model makes it possible for the system to dynamically adapt to changes in external and internal conditions. To create the model, the PLC OWEN160 is selected as a logical device, which will control the operation of electromagnetic hydraulic distributors, as well as magnetic position sensors. The simulated device of the mechatronic module can be successfully introduced into the control of the manipulator boom movement to increase the reliability of operation and improve the dynamic properties of hydraulic equipment. The authoring program written to control this system is quite simple and can be easily changed if it is necessary to change the functional task of the hydraulic drive. The purpose of the study is to increase the reliability of operation and dynamic properties of forest machine hydraulic manipulators through the creation of a model of an electronic module of a mechatronic system for intelligent control of the hydraulic cylinder movement, aimed at performing certain functions in logging. The research methods include modeling the mechatronic module of the automatic control system for the movement of the hydraulic cylinder rod of the boom of the forestry machine manipulator. As a result of developing the model of the electromechanical module, it becomes possible to implement it in the control system of the hydraulic equipment, which results in high accuracy of guidance of the manipulator gripping device, as well as the clarity of the hydraulic system. The modeled visualization system will allow the forestry machine operator to control the operation of each element of the hydraulic system both individually and as a whole. Testing of the manipulator model with the implemented control system is expected at the research complex "Hydraulic Handling Manipulator" of Saratov State University of Mechanical Engineering and Mechanics in Perm State Technical University in Yoshkar-Ola.

Keywords: automatic control, PLC OWEN160, hydraulic distributor of boom hydraulic cylinder, control program in Codesys language, increased reliability of hydraulic manipulator.

Введение. Система интеллектуального управления манипулятором позволяет повысить точность и скорость работы устройства, а также увеличить его производительность и эффективность. В качестве интеллектуальной основы гидравлической системы применяют технологии мягких вычислений, а именно, контроллеры с переменными параметрами управления, нейронные сети и генетические алгоритмы. Они наделяют систему качества адаптации и обучения.

При интеграции ЭВМ в технологические процессы увеличивается степень усложнения оборудования, но при этом расширяются возможности и производительность лесосечных машин.

Гипотеза исследования строится на предположении о том, что решение задачи внедрения автоматизированного управления распределителем манипулятора лесной машины позволяет уменьшить динамическую нагруженность гидроманипулятора и как следствие – повышает надежность как отдельных элементов гидросистемы, так и в целом всей машины.

Исследованию процессов работы лесозаготовительных машин посвящено множество проводимых работ в рамках технических наук. А вопросы автоматизации и интеллектуализации привлекают внимание большого количества исследователей, среди которых есть как отечественные (И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, Е.М. Царев, В.С. Петровский, В.Ф. Казмиренко и др.), так и зарубежные ученые (А. Visala, P. Shiriaev, P. Forsman и др.).

Из числа зарубежных исследований можно отметить работу Zemánek T., Fiľo P. (2022) [1], в которой рассматривается влияние интеллектуальной системы управления стрелой ИВС в форвардерах на работу операторов. Было экспериментально доказано, что данная система напрямую положительно влияет на экономичность эксплуатации оборудования и повышает надежность машины.

Такое же внимание притягивает работа Garcês J.V.A. et N. Oliveira (2024) [2], в которой управление производится за счет системы Open RAN, осуществляющей интеллектуальную автоматизацию настройки сети с помощью чат-бота. Прототип системы объединяет чат-бот Rasa с контроллером ONOS, позволяя настраивать сетевые потоки на основе инструкций на машинном языке. О роботизации манипуляторов мобильных машин говорится и в статье V. Jovanović и D. Janosević (2023) [3]. На основе критерия и целей регулирования разработано прикладное программное обеспечение с системой мониторинга параметров системы, которое делает облегченным, эффективным, эргономичным и безопасным эксплуатацию мобильных машин.

Проблему затруднения полного динамического моделирования и идентификации параметров системы с замкнутыми кинематическими контурами решает J. Shen, J. Zhang и др. (2022) [4] через модель с виртуально разделенными цилиндрами с помощью концепции виртуальных эквивалентных вращающихся шарниров.

Автоматизация операций, производимых манипулятором с замкнутым контуром, высокоточные модули

контроля за движением, дающие гибкость в управлении движением, также отражены в работах Mustalahti P. (2023) [5], M. Cheng, C. Shen and B. Sun (2023) [6], Jensen K.J., Ebbesen M.K. и др. (2021) [7], Ding R. и др. (2023) [8], Dindorf R. и Wos P. (2022) [9], Hyon S.H. (2024) [10].

В направлении исследований в области применения IT-технологий в автоматизации лесной техники проводятся различные исследования и среди отечественных исследователей. Из них можно выделить исследователя Васенева М.Ю. (2018) [11], который в своей статье «Перспективные направления автоматизации современных лесозаготовительных машин» делает акцент на важность увеличения количества автоматизированных операций, позволяющих упростить и облегчить труд оператора, снизить негативное воздействие как физического, так и психологического напряжения, минимизировать вред экологии.

Соколов А.П., Селивестров А.А. и др. (2023) [12] в статье «О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин» проанализировали опции системы ИВС для частичной автоматизации управления манипуляторами машин марки John Deere на рабочий цикл и тяжесть труда их операторов. Упор исследования был на снижение уровня стереотипности действий оператора через внедрение простого алгоритма работы в систему умной машины.

Круглов А.В. (2018) [13] в своем диссертационном исследовании «Разработка и исследование методики учета и анализа партии круглого леса с использованием цифровой обработки изображений» исследовал эффективность автоматизированного учета и анализа партии круглого леса через цифровизацию процесса.

Богуславский А.А., Боровин Г.К. и др. (2019) [14] в своей книге собрали исследования по разработке математических моделей и алгоритмов интеллектуальных систем управления для управления сложными системами. Разработка программного обеспечения интеллектуальных систем управления гидравлического привода проводилась на базе компонентного программного каркаса в виде классов на языке C++.

В учебном пособии Казмиренко В.Ф. (2021) [15] изложены принципы математического моделирования гидравлических устройств с управлением от ЭВМ при автоматизированном проектировании с использованием комплексов алгоритмов и программ. Данные исследования можно успешно использовать для внедрения программного управления «умных» гидроманипуляторов в лесных машинах.

В области построения автоматизированной системы управления мехатронными модулями и роботами-манипуляторами можно выделить работы таких исследователей: Трипкош В.А. (2021) [16], Романов А.В., Урсегова А.С. и др. (2021) [17], Логинов Б.М. (2023) [18], Богданов Д.С., Попикова А.В. и др. (2024) [19], Васильев А.В., Шардыко И.В. и др. (2023) [20], Глушко С.П. (2022) [21], Круглова Т.Н. (2021) [22].

Таким образом, совершенствование систем управления манипуляторами лесозаготовительных машин способно обеспечить высокую степень автоматизации работы манипулятора, а надежность гидравлической системы базируется на идентификации наиболее выгодных с точки зрения производительности траекторий движения рабочих органов и их реализации в автоматическом режиме с минимальным контролем со стороны операторов.

Материалы и методы. При активных исследованиях в области цифровизации лесной техники все же возникают проблемы, с которыми сталкиваются предприятия лесопромышленного комплекса при внедрении цифровых технологий. Существуют различные подходы к моделированию и разработке интеллектуальных

и гидравлических систем, что может привести к трудностям в совместимости и взаимодействии различных компонентов и устройств. Поэтому вопрос интеллектуализации современных лесных машин остается актуальным.

Рассматривая принципиальную гидравлическую схему форвардера АМКОДОР 2661 на рис. 1, а также систему управления распределителями через джойстики на рис. 2, можно понять, что при такой работе достаточно сложно управлять технологическим оборудованием. Действия оператора могут привести к большому числу холостых ходов исполнительных механизмов, увеличивать нагрузки на гидросистему и привести к аварийной ситуации.

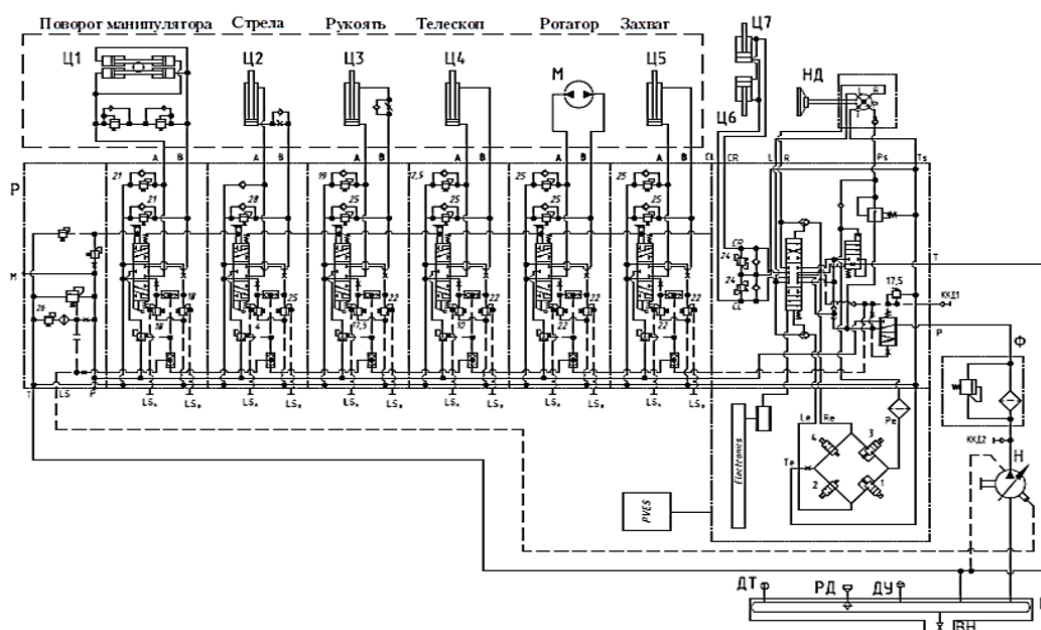


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема рабочего оборудования

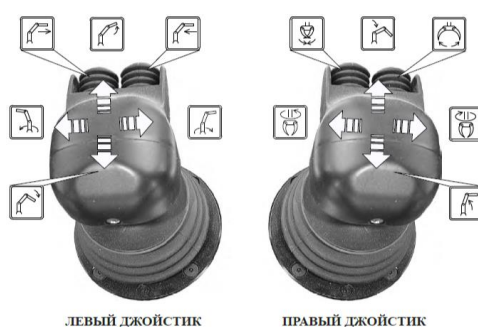


Рис. 2. Управление манипулятором через джойстики

Для повышения надежности работы лесных машин-манипуляторов было запланировано дополнение системы автоматического управления стрелы манипулятора, часть принципиальной схемы которой представлена на рис. 3. При автоматизации системы управления стрелой манипулятора можно практически полностью исключить управление хотя бы одной из степеней свободы. Выбор пал на управление гидроцилиндром стрелы манипулятора.

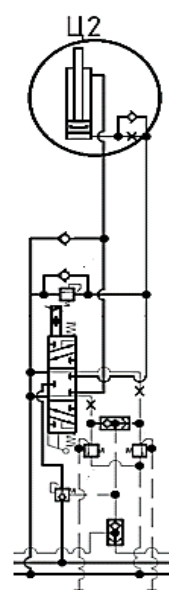


Рис. 3. Принципиальная гидравлическая схема стрелы манипулятора форвардера

Для этого необходимо заменить гидроцилиндр Ц2 стрелы на гидроцилиндр с магнитным поршнем для контакта с магнитными датчиками положения – герконовыми.

Магнитные датчики положения предназначены для обнаружения положения поршня цилиндра. Под воздействием магнитного поля поршня замыкается или размыкается внутренний контакт датчика. Электрический сигнал выдается в цепь на вход контроллера. Датчик можно установить в канавки на корпусе цилиндра или на гильзы и шпильки с использованием скоб.

На рис. 4 представлена принципиальная схема автоматического управления движением стрелой через датчики положения.

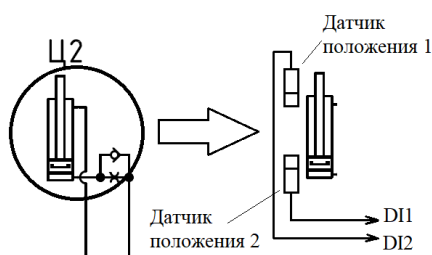


Рис. 4. Контроль положения поршня цилиндра Ц2 стрелы через датчики положения 1 и 2

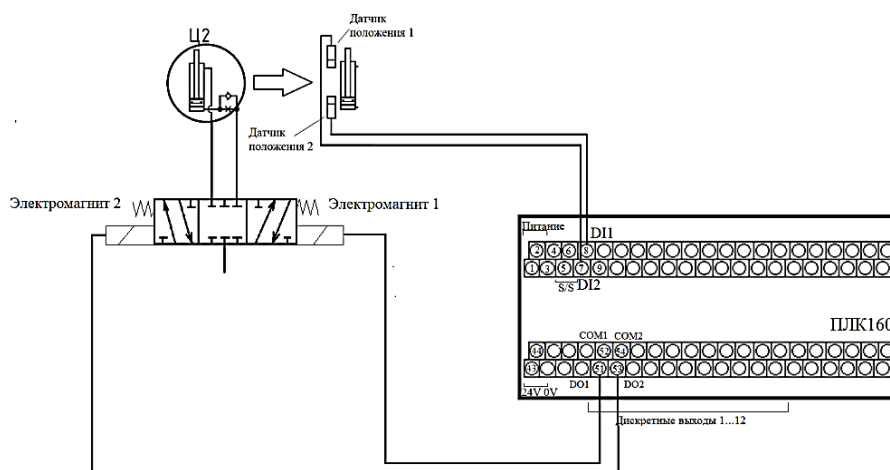


Рис. 6. Схема подключения ПЛК ОВЕН160 к электромагнитам гидравлического распределителя и датчикам положения

Подбор элементов управления работой гидрораспределителя обусловлен выбором напряжения для работы на 24 В.

Программируемые логические контроллеры ОВЕН ПЛК160 выполнены в полном соответствии со стандартом ГОСТ Р 51840–2001 (IEC 61131 – 2), что обеспечивает высокую аппаратную надежность.

В контроллере изначально заложены мощные вычислительные ресурсы при отсутствии операционной системы.

Система позволяет автоматизировать все фазы работы манипулятора.

Автоматически управляемое выдвижение стрелы, демпфирование цилиндров контролируется датчиками, которые отслеживают положение каждого цилиндра манипулятора. Собирая данные о параметрах системы датчики отправляют импульсы в виде входных сигна-

лов в контроллер (основа интеллектуального управления работой гидравлическим приводом). Согласно написанной программы управления, а также на основании входных сигналов, контроллер отправляет выходные управляющие сигналы исполнительным механизмам через гидравлический распределитель (гидроцилиндрам манипулятора).

Авторская управляющая программа написана на языке программирования CFC в среде Codesys. Это графический язык в виде функциональных блоков, с помощью которых пользователь может сам установить порядок выполнения функций, легко реализовать обратные связи. Основным преимуществом является то, что редактор и структура языка интуитивно понятны, и для написания программ не требуются специальные знания. Программа представлена на рис. 7.



Рис. 5. Внешний вид магнитного герконового датчика CST-232

В качестве контроллера удобно использовать ПЛК ОВЕН160. На рис. 6 представлена структурная схема подключения распределителя и датчиков положения к контроллеру ПЛК ОВЕН160.

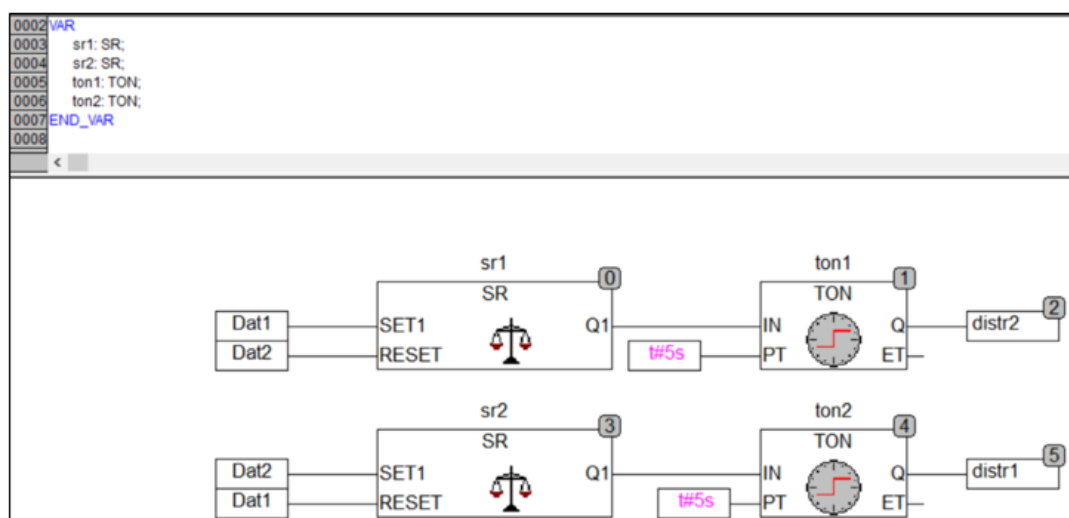
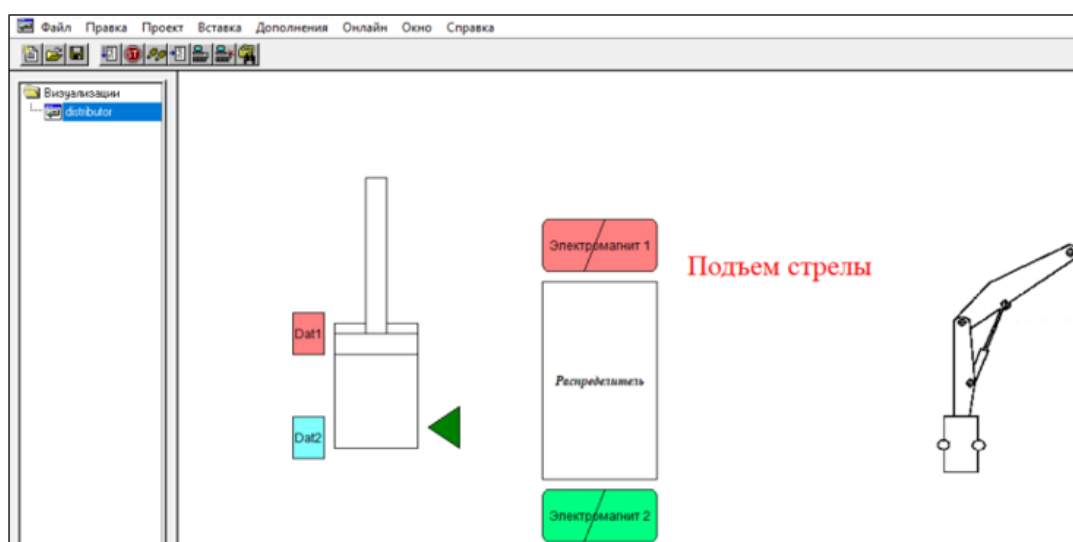
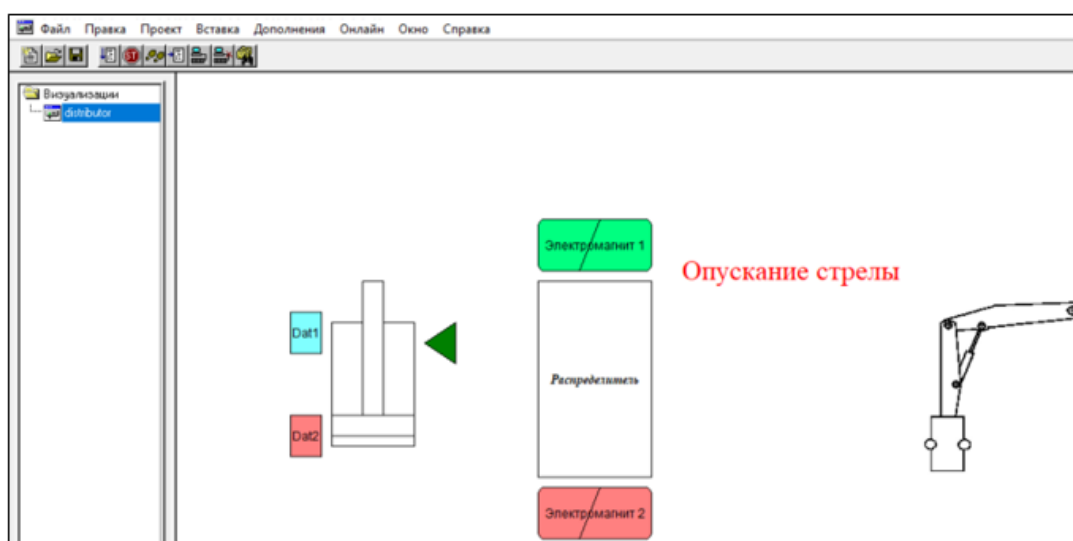


Рис. 7. Код программы на языке программирования CFC в среде Codesys по управлению гидравлическим распределителем



a)



6)

a – элемент визуализации выдвинутого состояния штока гидроцилиндра; b – элемент визуализации втянутого состояния штока гидроцилиндра

Рис. 8. Пример элементов визуализации в программе управления гидравлическим распределителем стрелы манипулятора

Согласно коду программы при срабатывании датчика 2 импульсный сигнал подается на первый электромагнит распределителя, и шток гидроцилиндра стрелы начинает выдвигаться через определенный промежуток времени, в зависимости от требования реакции гидравлической системы (задержка на включение триггера может корректироваться). Триггер необходим для сохранения электрического сигнала на выход к электромагниту 1, пока поршень гидроцилиндра не дойдет до датчика 2. После активности датчика 2 триггер отключает электромагнит 1 и включает электромагнит 2. В результате, через задержку времени шток гидроцилиндра стрелы начинает втягиваться, при этом работает триггер на сохранение выходного электрического сигнала для электромагнита 2.

Все это сопровождается визуализацией на верхнем уровне. Оператор может видеть состояние системы и контролировать процесс через ЭВМ.

Для управления и отображения параметров движения рабочих органов можно добавить в проект элементы визуализации поведения штока гидроцилиндра стрелы манипулятора, которые представлены на рис. 8, а и б. На данном рисунке изображен экран управления, через который оператор может переключаться с ручного режима на автоматический и следить за положением рабочего органа.

Заключение. Модель управления гидравлическим распределителем гидроцилиндра стрелы через внедрение электромеханических и электронных модулей мехатронных систем, ориентированных на выполнение определенных функций, показала свою эффективность. Внедрение автоматизированного управления распре-

лителем манипулятора лесной машины, позволяет уменьшить динамическую нагруженность, и как следствие – повышает надежность как отдельных элементов гидросистемы, так и в целом всей машины. Данные системы также позволяют операторам лесных машин выполнять сложные задачи удаленно в опасных местах, а система обеспечивается динамическим движением.

Электромагнитное управление обеспечивает точность позиционирования выходного звена исполнительного механизма и высокую скорость работы устройства, а также увеличивает производительность и эффективность лесной машины.

Были разработаны методы оценки точности наведения рабочего органа лесозаготовительной машины на дерево с использованием мехатронных и робототехнических систем через внедрение датчиков обратных связей в систему управления манипулятора лесной машины, отслеживающих положение выходного звена.

Технологии мягких вычислений с помощью контроллеров с переменными параметрами управления, нейронные сети являются основой интеллектуальной основой работы системы управления гидропривода манипулятора. Они наделяют систему качества адаптации и обучения.

При интеграции ЭВМ в технологические процессы увеличивается степень усложнения оборудования, но при этом расширяются возможности и производительность лесосечных машин. Система визуализации верхнего уровня позволяет автоматизировать сложные технологические процессы лесосечных работ, позволяет корректировать действия оператора и уменьшает нагрузку на оборудование.

Литература

1. Zemánek T., Fiřo P. Influence of intelligent boom control in forwarders on performance of operators //Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2022. – V. 43. – №. 1. – pp. 47–64.
2. Garcês J.V.A. et al. Intent-Based Management for Open RAN: Intelligent Network Configuration Automation via Chatbot //2024 IEEE 13th International Conference on Cloud Networking (CloudNet). – IEEE, 2024. – pp. 1–9.
3. V. Jovanovic and D. Jano ´ sevi ´ c, "Analysis and regulation of mechatronic systems in advanced mobile ´ machines," J. Eng. Manag. Syst. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 140–149, 2023.
4. J. Shen, J. Zhang, H. Zong, M. Cheng and B. Xu, "Hierarchical Decoupling Controller With Cylinder Separated Model of Hydraulic Manipulators for Contact Force/Motion Control," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 28, no. 2, pp. 1081–1092, April 2023.
5. Mustalahti P. Improving Automated Operations of Heavy-Duty Manipulators with Modular Model-Based Control Design. – 2023.
6. M. Cheng, C. Shen and B. Sun. Modular Dynamic Modeling for Precision Motion Control of Hydraulic Manipulator. 2023 9th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Lanzhou, China, 2023, pp. 1–9.
7. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel concept for electro-hydrostatic actuators for motion control of hydraulic manipulators //Energies. – 2021. – T. 14. – №. 20. – С. 6566.
8. Ding R. et al. High-Precision and Modular Decomposition Control for Large Hydraulic Manipulators //Actuators. – MDPI, 2023. – V. 12. – №. 11. – pp. 405.
9. Dindorf R., Wos P. A case study of a hydraulic servo drive flexibly connected to a boom manipulator excited by the cyclic impact force generated by a hydraulic rock breaker //IEEE Access. – 2022. – V. 10. – pp. 7734–7752.
10. Hyon S.H. et al. Hyblock: Hardware Realization and Control of Modular Hydraulic Robots with Dowel Connectors //2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, Japan, 2024. – pp. 3609–3615.
11. Васнев М.Ю. Перспективные направления автоматизации современных лесозаготовительных машин / М.Ю. Васнев // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 3(39). – С. 125–129.
12. Соколов А.П. и др. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин // Лесной вестник / Forestry bulletin. – 2023. – Т. 27. – №. 1. – С. 139. –152.
13. Круглов А.В. Разработка и исследование методики учета и анализа партий круглого леса с использованием цифровой обработки изображений): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.21. 01. дис. – б. и., 2017.
14. Богуславский А.А. и др. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления // М.: ИПМ им. МВ Келдыша. – 2019.
15. Казмирченко В.Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения: Основы теории и системное проектирование : учеб. пособие. – М.: Радио и связь, 2001. – 432 с.: ил.
16. Трипкош В.А. Особенности построения системы управления мехатронными модулями / В.А. Трипкош,

- С.С. Акимов // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : Сборник материалов X Всероссийской конференции, Оренбург, 18–19 ноября 2021 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 220–223.
17. Романов А.В., Урсегова А.С., Щенятский А.В. Применение мехатронных модулей в гексаподах для автоматизации сборки соединений // Национальная ассоциация ученых. – 2021. – №. 66-1. – С. 48–53.
 18. Логинов Б.М. Оценка временных задержек при обмене информацией в структурах цифровых двойников электромеханических и гидравлических систем // Системы и комплексы. – 2023. – С. 67.
 19. Богданов Д.С., Попикова А.В. и др. Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортиментовоза, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты / Д.С. Богданов, А.В. Попикова, И.Д. Евсиков, С.К. Попиков, А.А. Полумиско // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 127–143.
 20. Васильев А. В., Шардыко И В., Копылов В. М. Модульный шарнир с переменной жесткостью для манипуляторов робототехнических систем // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2023. – №. 1(231). – С. 198–215.
 21. Глушко С.П. Расчёт угловых координат для системы управления двухзвенным манипулятором промышленного робота // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Т. 22. – №. 4. – С. 346–352.
 22. Круглова Т.Н. Принципы организации киберфизического взаимодействия систем приводов машин и механизмов параллельной кинематической структуры // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – №. 4 (212). – С. 37–42.
 23. Форвардеры АМКОДОР 2661, АМКОДОР 2661-01. Руководство по эксплуатации 2661.00.00.000РЭ / А.К. Герасимович, А.А. Герман, Л.Л. Гумеников, Г.М. Вашкевич, Л.В. Кондратчик, А.И. Меляшкевич, Л.А. Самушенко, – Мн.: ОАО «Амкор» управляющая компания холдинга», 2013. – 207 с.
 24. Магнитные датчики положения. Серия CST-CSV-CSH, CSB-CSC-CSD, CSG: Каталог Версия 9.1. / Компания Camozzi Spa / Изделия для промышленного использования.
 7. Jensen K.J., Ebbesen M.K., Hansen M.R. Novel concept for electro-hydraulic actuators for motion control of hydraulic manipulators // Energies. – 2021. – Т. 14. – No. 20. – P. 6566.
 8. Ding R. et al. High-Precision and Modular Decomposition Control for Large Hydraulic Manipulators // Actuators. – MDPI, 2023. – V. 12. – No. 11. – pp. 405.
 9. Dindorf R., Wos P. A case study of a hydraulic servo drive flexibly connected to a boom manipulator excited by the cyclic impact force generated by a hydraulic rock breaker // IEEE Access. – 2022. – V. 10. – pp. 7734–7752.
 10. Hyon S. H. et al. Hyblock: Hardware Realization and Control of Modular Hydraulic Robots with Dowel Connectors // 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, Japan, 2024. – pp. 3609–3615.
 11. Vasenev M.Yu. Promising Directions of Automation of Modern Forestry Machines / M.Yu. Vasenev // Systems. Methods. Technologies. – 2018. – No. 3(39). – P. 125–129.
 12. Sokolov A.P. et al. On the influence of partial automation of manipulator control on the ergonomic indicators of logging machines // Forestry Bulletin. – 2023. – Vol. 27. – No. 1. – P. 139. –152.
 13. Kruglov A.V. Development and research of the methodology for accounting and analysis of round timber lots using digital image processing): dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.21. 01. diss. – b. i., 2017.
 14. Boguslavsky A.A. et al. Models and algorithms for intelligent control systems // Moscow: Keldysh Institute of Forestry Problems. – 2019.
 15. Kazmirenko V.F. Electrohydraulic mechatronic motion modules: Fundamentals of theory and system design: textbook. manual. – M.: Radio and communication, 2001. – 432 p.: ill.
 16. Tripkosh V.A. Features of constructing a control system for mechatronic modules / V.A. Tripkosh, S.S. Akimov // Computer integration of production and IPI technologies: Collection of materials of the X All-Russian conference, Orenburg, November 18-19, 2021. – Orenburg: Orenburg State University, 2021. – P. 220–223.
 17. Romanov A.V., Ursegova A.S., Shchenyatsky A.V. Application of mechatronic modules in hexapods to automate the assembly of joints // National Association of Scientists. – 2021. – No. 66-1. – P. 48–53.
 18. Loginov B.M. Evaluation of time delays in information exchange in the structures of digital twins of electromechanical and hydraulic systems // Systems and complexes. – 2023. – P. 67.
 19. Bogdanov D.S., Popikova A.V. et al. Kinematic and dynamic analysis of the lifting mechanism of the timber truck manipulator equipped with a hydromechanical damper based on the Euler and Runge-Kutta methods / D.S. Bogdanov, A.V. Popikova, I.D. Evsikov, S.K. Popikov, A.A. Polumisko // Forestry journal. – 2024. – Vol. 14. – No. 2 (54). – P. 127–143.
 20. Vasiliev A.V., Shardyko I.V., Kopylov V.M. Modular joint with variable stiffness for manipulators of robotic systems // Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences. – 2023. – No. 1 (231). – P. 198–215.
 21. Glushko S.P. Calculation of angular coordinates for the control system of a two-link manipulator of an industrial robot // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Vol. 22. – No. 4. – P. 346–352.
 22. Kuglova T N. Principles of organizing cyber-physical interaction of machine drive systems and mechanisms of a parallel kinematic structure // Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences. – 2021. – No. 4 (212). – P. 37–42.
 23. Forwarders АМКОДОР 2661, АМКОДОР 2661-01. Operation manual 2661.00.00.000RE / A.K. Gerasimovich, A.A. German, L.L. Gumennikov, G.M. Vashkevich, L.V. Kondratchik, A.I. Melyashkevich, L.A. Samushchenko, – Mn.: OJSC "Amkodor, managing company of the Idinga", 2013. – 207 p.
 24. Magnetic position sensors. Series CST-CSV-CSH, CSB-CSC-CSD, CSG: Catalog Version 9.1. / Camozzi Spa / Products for industrial use.

References

1. Zemánek T., Filo P. Influence of intelligent boom control in forwarders on performance of operators // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2022. – V. 43. – No. 1. – pp. 47–64.
2. Garcês J.V.A. et al. Intent-Based Management for Open RAN: Intelligent Network Configuration Automation via Chatbot // 2024 IEEE 13th International Conference on Cloud Networking (CloudNet). – IEEE, 2024. – pp. 1–9.
3. V. Jovanovic and D. Jano 'sevi 'c, "Analysis and regulation of mechatronic systems in advanced mobile 'ma-chines," J. Eng. Manag. Syst. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 140–149, 2023.
4. J. Shen, J. Zhang, H. Zong, M. Cheng and B. Xu, "Hierarchical Decoupling Controller With Cylinder Separated Model of Hydraulic Manipulators for Contact Force/Motion Control," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 28, no. 2, pp. 1081–1092, April 2023.
5. Mustalahti P. Improving Automated Operations of Heavy-Duty Manipulators with Modular Model-Based Control Design. – 2023.
6. M. Cheng, C. Shen and B. Sun. Modular Dynamic Modeling for Precision Motion Control of Hydraulic Manipulator. 2023 9th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Lanzhou, China, 2023, pp. 1–9.