

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

²Олег Сукач, к. т. н., ¹Юрій Габрієль, ²Віктор Шевчук, к. т. н., ¹Степан Хімка, к. т. н., ¹Мирон Магац, к. т. н., ²Андрій Домінік, к. т. н.

¹Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл. Україна,
e-mail: 19oleg85@ukr.net

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.035>

Сукач О., Габрієль Ю., Шевчук В., Хімка С., Магац М., Домінік А. Обґрунтування способу керування маніпуляторними установками вантажних автомобілів

Під час перевезень часто виникає необхідність завантаження або розвантаження вантажів поза межами стаціонарних складів, у полі тощо. Для цих потреб прийнято використовувати вантажні автомобілі, обладнані маніпуляторами. Найчастіше в маніпуляторах використовується гідропривід, який забезпечує належну потужність і продуктивність й може інтегруватись у штатну гідросистему автомобіля.

Для обґрунтування ефективної системи керування гідроприводом маніпулятора розроблено модель борта вантажного автомобіля, що складається з таких складових частин: бортова платформа, поворотний модуль, силова частина (стріла, балка), гідропривід, електротехнічна частина (привід, управління), вантажозахоплювач з сервоприводом.

Запропоновано раціональну модель електронної системи керування гідроприводом крана-маніпулятора для використання в універсальних кран-маніпуляторних установках на автомобільних, самохідних та причіпних шасі. Це дає можливість підвищити ефективність навантажувально-розвантажувальних операцій, зменшуючи при цьому кількість техніки та працівників, залучених до вантажопереробки поза межами складів.

Запропонована архітектура керування маніпуляторними установками з невисокою вартістю її реалізації та простим зрозумілим налаштуванням. Використання запропонованої технології та схеми електронного керування забезпечує управління складною системою приводів, дозволяє проводити гнучкі налаштування за потребою користувача. Наприклад, керувати кран-маніпулятором дистанційно через радіоканал чи обмежити величину ходу в певних напрямках.

Для управління виконавчими механізмами крана-маніпулятора використовувалася апаратно-обчислювальна платформа з мікроконтролером Arduino із середовищем розробки програмного забезпечення Processing/Wiring на мові програмування, яка є підмножиною C/C++ і забезпечує: безперебійну роботу механізмів під час роботи; їх пуск і гальмування; інформативність, точність і оперативність механізмів; мінімальні статичні та динамічні навантаження зі зниженою інерційною дією під час переміщення вантажу.

Ключові слова: кран-маніпулятор, гідропривід, сервопривід, електронна система керування.

Sukach O., Habriiel Yu., Shevchuk V., Khimka S., Mahats M., Dominik A. Justification of the method of controlling the manipulator installations of trucks

Transportation often requires loading and unloading cargo in areas beyond fixed warehouses, such as the field. To meet these needs, trucks equipped with manipulators are typically utilized. Hydraulic drives are commonly used in these manipulators, as they provide sufficient power and performance and can be easily integrated into a car's standard hydraulic system.

To substantiate the effective control system of the manipulator's hydraulic drive, a model of the truck's side was developed, consisting of an on-board platform; rotary module, power part (arrow, beam), hydraulic drive, electrical part (drive, control), and cargo lifter with servo drive.

A rational model of the electronic hydraulic drive control system of a manipulator crane for use in universal crane-manipulator installations on an automobile, self-propelled, and trailer chassis is proposed. This helps to increase the efficiency of loading and unloading operations while reducing the number of equipment and workers involved in cargo handling outside warehouses.

The authors propose an architecture of control of manipulator installations with a low cost of its implementation and a simple, understandable setting. The use of the proposed technology and electronic control scheme provides control of a complex system of drives, and allows for flexible settings according to the user's needs, e.g. to control the manipulator crane remotely via a radio channel or limit the amount of movement in certain directions.

To control the executive mechanisms of the manipulator crane, a hardware-computing platform with an Arduino microcontroller was used with the Processing/Wiring software development environment in the programming language, which is a subset of C/C++ and ensures: uninterrupted operation of the mechanisms during operation; their start and braking; informativeness, accuracy, and efficiency of mechanisms; minimal static and dynamic loads with reduced inertial action during cargo movement.

Key words: manipulator crane, hydraulic drive, servo drive, electronic control system.

Постановка проблеми. Під час перевезень часто виникає необхідність у переміщенні вантажів, які різняться габаритами [1; 15], масою, формою та особливостями поведіння. Також виникає необхідність завантаження або розвантаження поза межами стаціонарних складів, на будівництві, у зоні щільної житлової забудови, у полі тощо. Для цих потреб прийнято вико- ристовувати вантажні автомобілі, обладнані маніпу- ляторами, що забезпечує низку переваг, серед яких: зменшення кількості одиниць техніки, підвищення ступеня їх використання; зменшення кількості працівників, підвищення продуктивності їхньої праці; зменшення загальних затрат на перевезення [14].

Маніпулятори широко представлені на ринку України, їх ціна різниться залежно від вантажопідйомності та функціональних можли- востей. Вартість найбільш технологічних маніпу- ляторів може перевищувати вартість самого автомобіля, тоді як простіші зразки можуть бути частково механізовані, а їх ціна буде невисокою.

Найчастіше в маніпуляторах вико- ристовується гідропривід, який може бути автоно- мним або ж використовувати штатну гідро- систему автомобіля [13]. Система управління таким маніпулятором, виконана у вигляді моно- блоку гідророзподільників з механічними важел- ями й розміщена на рамі автомобіля. Для комбінованих типів приводу системи керування маніпуляторами є складнішими й досить варті- сними. Тому актуальним є обґрунтування простої та ефективної системи керування маніпулятором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За загальноприйнятою класифікацією кран- маніпуляторні установки поділяють за типом підвішування вантажу: жорстке, гнучке [2; 15] на стрілі (для переміщення вантажів використовують трос з гаком, стропа, петлі). За способом складання ланок їх поділяють на: Z-подібні, L- подібні та телескопічні установки. За констру- ктивним виконанням стріли Z-подібні стріли використовують переважно європейські ви- робники техніки.

Для приводу робочих органів та силових частин вантажопідйомних машин найчастіше застосовуються об'ємні гідроприводи безпо- середньої дії, в яких гідронасос нагнітає рідину, яка передає зусилля безпосередньо до викона- вчого механізму – гідроциліндра або гідромотора. Об'ємні гідроприводи знайшли широке застосу- вання через можливість змінювати обертальний рух на поступальний й простоту регулювання робочих швидкостей виконавчих пристроїв, реверсного переміщення робочих органів та здат- ність реалізовувати великі передатні числа [3].

Переважна більшість досліджень стосується динаміки та режимів [1; 7; 13] руху ланок стрі-

лової системи, їх стійкості та режимів руху вантажу різної маси [12], однак мало уваги приді- ляється питанням розробки нових конструкторських маніпуляторів та їх випробування.

Постановка завдання. Використання уні- версальних кран-маніпуляторних установок на автомобільних, самохідних та причіпних шасі дає змогу підвищити ефективність навантажувально- розвантажувальних операцій, зменшуючи при цьому кількість техніки та працівників, залучених до вантажопереробки поза межами складів.

Метою дослідження є обґрунтування раціо- нальної моделі електронної системи керування гідроприводом крана-маніпулятора з такими конструктивними та експлуатаційними вимогами:

- застосування системи управління, що забезпечує механізм приводу маніпулятора інформативність, точність та слідкуючу дію механізмів під час переміщення;
- велика кількість степенів вільності шарнірних з'єднань, гнучкість та плавність ро- боти механізмів;
- можливість подальшого розширення функціональних можливостей та елементної бази (дистанційного керування, передачі відеозобра- ження з вантажозахоплювача, сенсорів відстані, руху);
- підтримання початкового рівня прохід- ності, маневреності автомобіля;
- забезпечення необхідної мобільності завдяки складанню маніпулятора в транспортне положення з габаритами, що не перевищують аналогічних розмірів автомобіля;
- можливість використання додаткових елементів керування та адаптивність їх нала- штунув.

Виклад основного матеріалу. Існують різні конструктивні рішення й підходи щодо [3] розробки маніпуляторів. Їх поділяють за типом приводу (пневматичний, електричний, гідрав- лічний); мобільністю (стаціонарний або рух- ливий); системою координат переміщення (прямо- кутна, циліндрична, сферична, ангулярна); спо- собом управління (механічний, електричний, електронний). Головне питання, що виникає при розробці маніпуляторів, – вибір кінематичної схеми, структури елементної бази та алгоритму роботи. Найпрогресивніші маніпулятори подібні до людської руки, мають плече, кисть і зап'ястя й можуть рухатися з аналогічними степенями вільності (ангулярна система). Тоді як для простіших операцій досить лише два ступені рухливості (прямокутна, циліндрична система). Можливість рухатися в циліндричній системі координат дозволяє розширити робочу зону маніпулятора й обертатися навколо своєї осі на 360 град. Сферична система являє собою робочу

зону у вигляді сфери, маніпулятори з такою системою координат виділяються універсальністю та покращеними технічними можливостями.

Така кінематична схема складніша за попередні, тому виникають труднощі з виготовленням складних механізмів, їх міцністю, стійкістю та управлінням, однак він може переміщатися складнішою траєкторією і виконуватися для складних траєкторій переміщення.

Принципова схема [5] й пропонується кінематична конфігурація маніпулятора (рис. 1)

передбачає використання широкої робочої зони завдяки переміщенню основи поворотного модуля в циліндричній системі координат, тоді як вантажозахоплювач переміщається у сферичній системі, за рахунок чого досягається вища гнучкість рухомих ланок. Точність й повторюваність системи забезпечується роздільною здатністю керуючих сигналів, люфтів у з'єднаннях, алгоритмів керування та зовнішніх впливів.

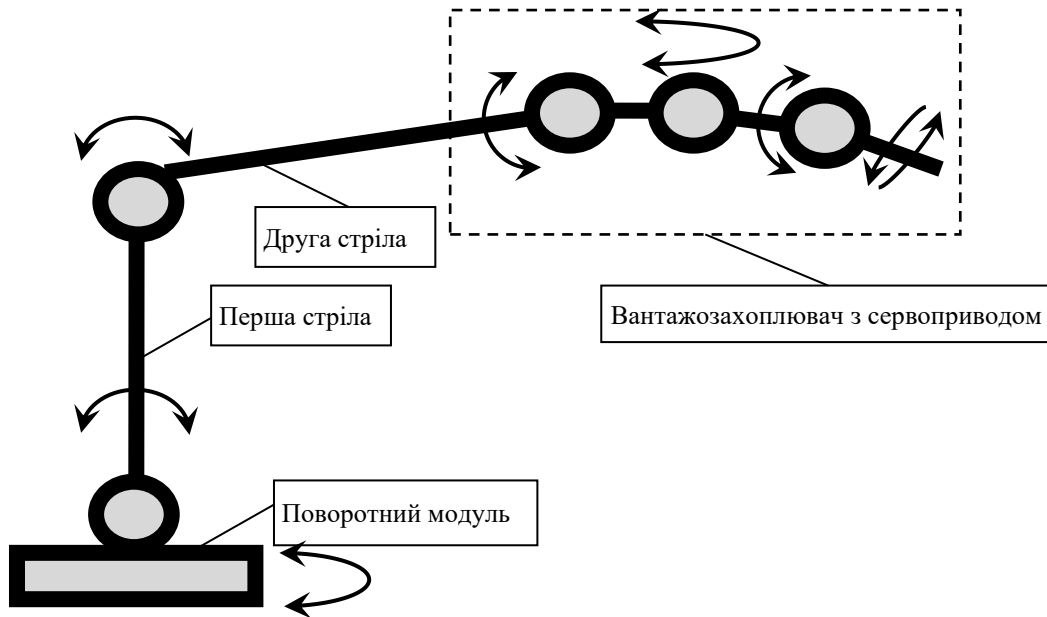


Рис. 1. Принципова кінематична схема маніпулятора
Fig. 1. Basic kinematic scheme of the manipulator

Управління маніпулятором включає декілька функціональних блоків: генерування та сприйняття сигналів, обробки даних та силового приводу виконавчих механізмів [5; 6; 11]. Принципову функціональну схему та алгоритм роботи запропонованого маніпулятора наведено на рис. 2.

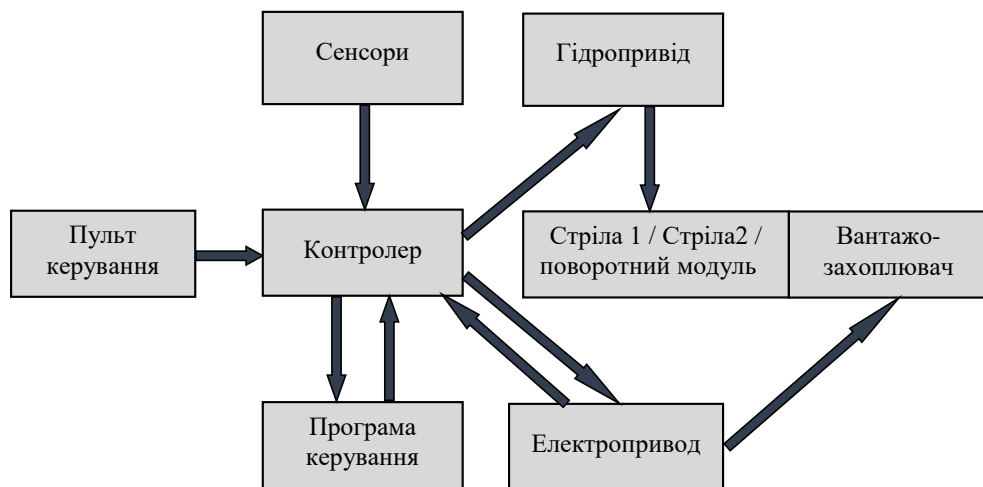
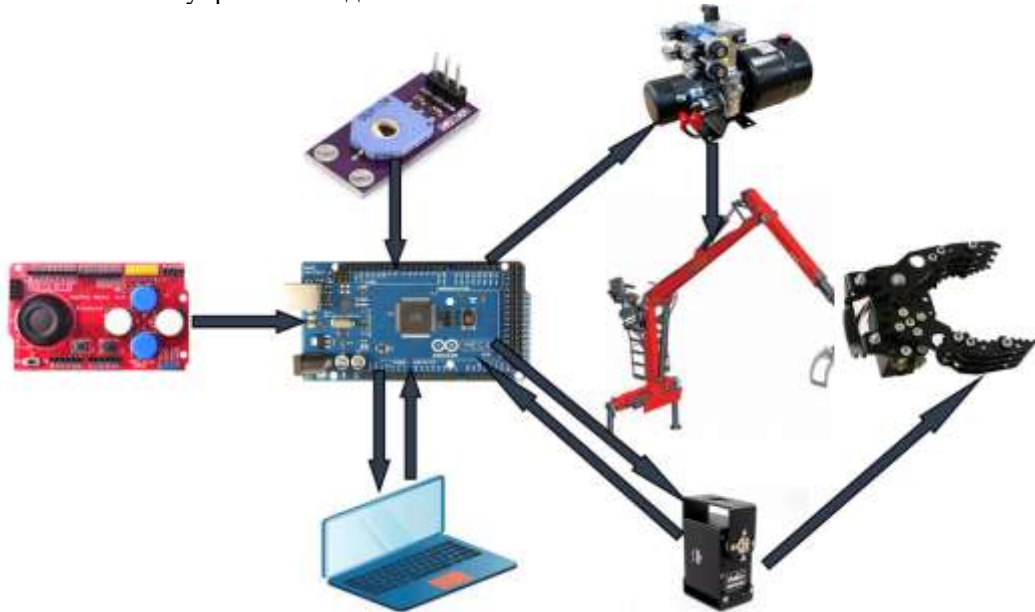


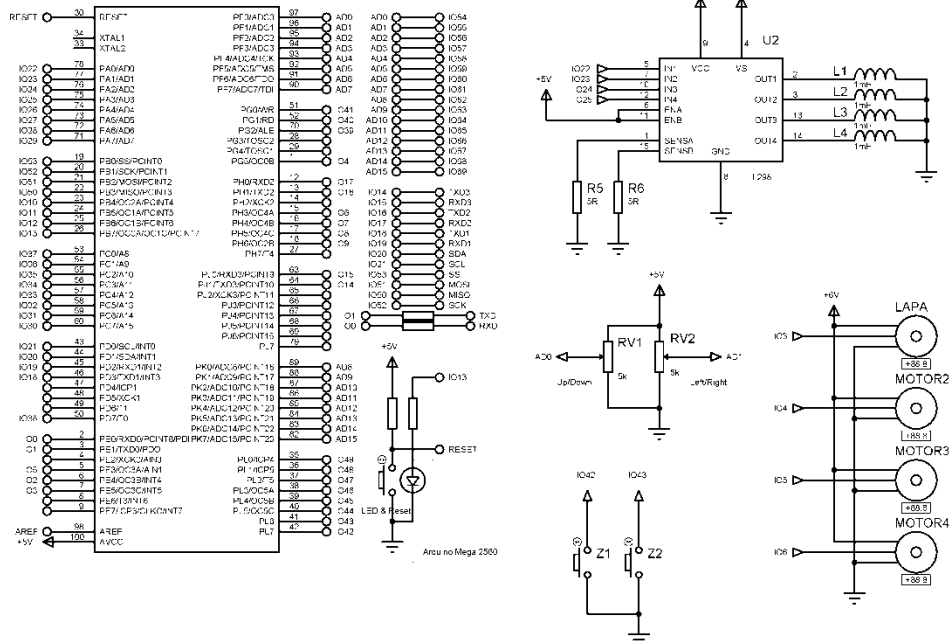
Рис. 2. Функціональна схема та алгоритм керування маніпулятора
Fig. 2. Functional diagram and control algorithm of the manipulator

На наступному етапі здійснено обґрунтування й вибір технології та елементної бази для реалізації принципової схеми управління маніпулятором. Проведено підбір компонентів для забезпечення алгоритму роботи гідро- та електроприводу усіх ланок маніпулятора. Для силового приводу сформовано гідравлічний блок з електронно-керованими розподільниками та блок живлення напругою 5/24 В. Управління маніпулятором здійснюється за допомогою двох джойстиків та кнопок. Сигнали управління з джойстиків

дають змогу керувати усіма ланками, забезпечуючи їх переміщення в усіх степенях вільності. Реалізована система керування містить такі елементи: блок живлення 24В 5А, Arduino Mega [7], драйвери керування електромагнітними клапанами системи гідроприводу на базі мікросхем L298 – 2 шт., джойстики керування з кнопками – 2 шт., сервопривід вантажозахоплювача, елемент перетворювача DC/DC з вихідною напругою 7В для живлення сервоприводів (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Схема керування маніпулятором:

а – елементна база; б – схема підключення елементів в програмі Proteus

Fig. 3. Manipulator control scheme:

a – element base; b - scheme of connecting elements in the Proteus program

Для управління електричними виконавчими механізмами маніпулятора використано апаратну обчислювальну платформу з мікроконтролером Arduino [4; 8; 9] та програмним середовищем розробки Processing/Wiring на мові програмування, що є підмножиною C/C++. Перевагою використання цієї платформи є доступність електронних компонентів та відкритих програмних кодів (стандартних бібліотек), що є у вільному доступі, для найбільш популярних схем управління [10]. На більшості плат Arduino бібліотека Servo підтримує керування не більше 12 сервоприводами, а на Arduino Mega – 48.

Бібліотеки для керування сервоприводами (Servo) і для роботи з приймачами/передавачами на 433 МГц VirtualWire використовують аналогічне переривання. Це означає, що їх можна використовувати в одній схемі одночасно, тобто

використовувати провідне або безпроводне управління [7].

На рис. 3 зображено фрагмент електричної схеми маніпулятора. Змінні резистори RV1 та RV2 – елементи джойстика керування. При центральному положенні джойстика резистори перебувають у середньому положенні (що відповідає значенню АЦП 512 одиниць), під час впливу на джойстик значення відповідного каналу змінюються від 0 до 1023 одиниць, залежно від чого і приводиться в дію відповідний гідравлічний контур маніпулятора. При переведенні джойстиків у вихідне положення гідро розподільники перебувають у нейтральному положенні і насосна станція працює в холостому режимі, а стріла маніпулятора залишається нерухомою [3].

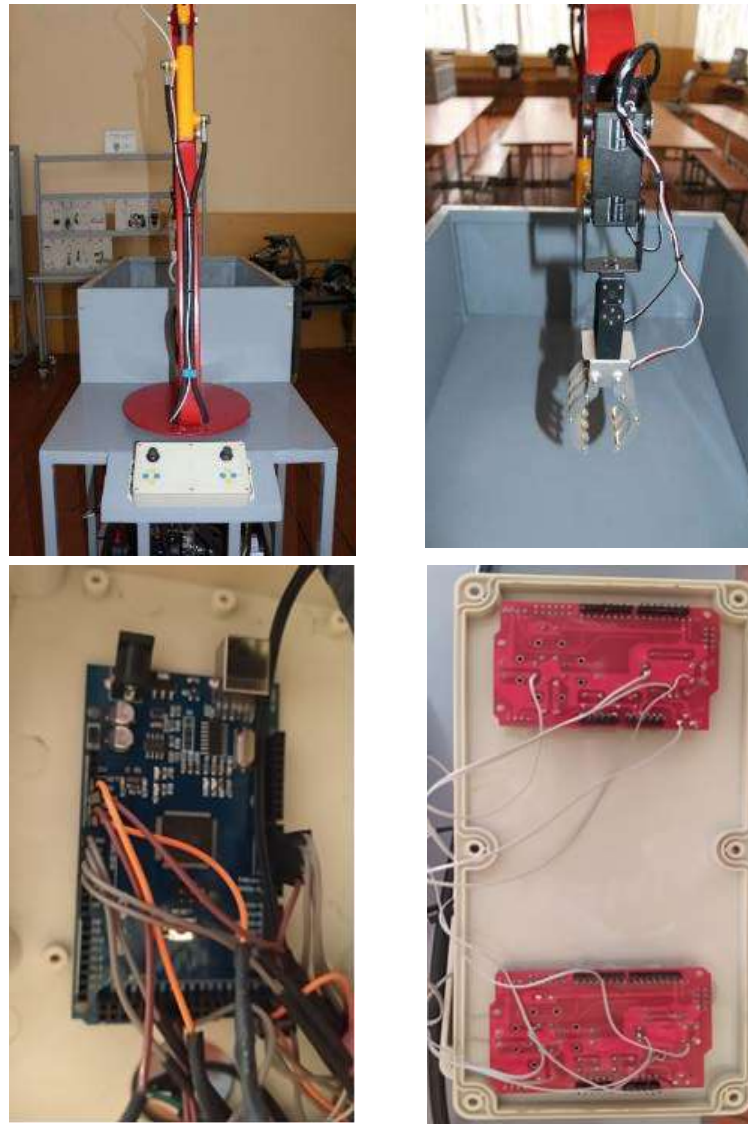


Рис. 4. Електронна схема управління маніпулятором на базі програмно-апаратної платформи Arduino
Fig. 4. Electronic manipulator control scheme based on the Arduino hardware and software platform

Перевірка коректності побудови електричної схеми та її працездатності проводилась за допомогою моделі, складеної у середовищі Proteus. Згідно з моделлю, за допомогою кнопок керування Z1 та Z2 маємо можливість керувати вантажозахоплювачем, тобто стискати або розтискати захват.

Сервоприводи зазвичай мають обмежений кут обертання 180 градусів, або ж постійне обертання. У нашому випадку кожна пара сервоприводів керується окремим джойстиком, а замикання-розмикання «руки» керується за допомогою кнопок (рис. 4).

Використання ШІМ сигналу для керування електромагнітними розподільниками гідрос-

танції дозволяє змінювати швидкість переміщення робочих органів маніпулятора внаслідок зміни поперечного перерізу гідророзподільника. Це відбувається залежно від потреби, тобто від ступеня натискання на джойстик керування. Програмно передбачено невелику «зону нечутливості» для запобігання небажаним переміщенням маніпулятора при незначному впливі на джойстики чи кнопки.

До основних складових частин крана-маніпулятора належать: бортова платформа; поворотний модуль; силова частина (стріла, балка); гідропривід; електротехнічна частина (привід, управління); вантажозахоплювач із сервоприводом (рис. 5).

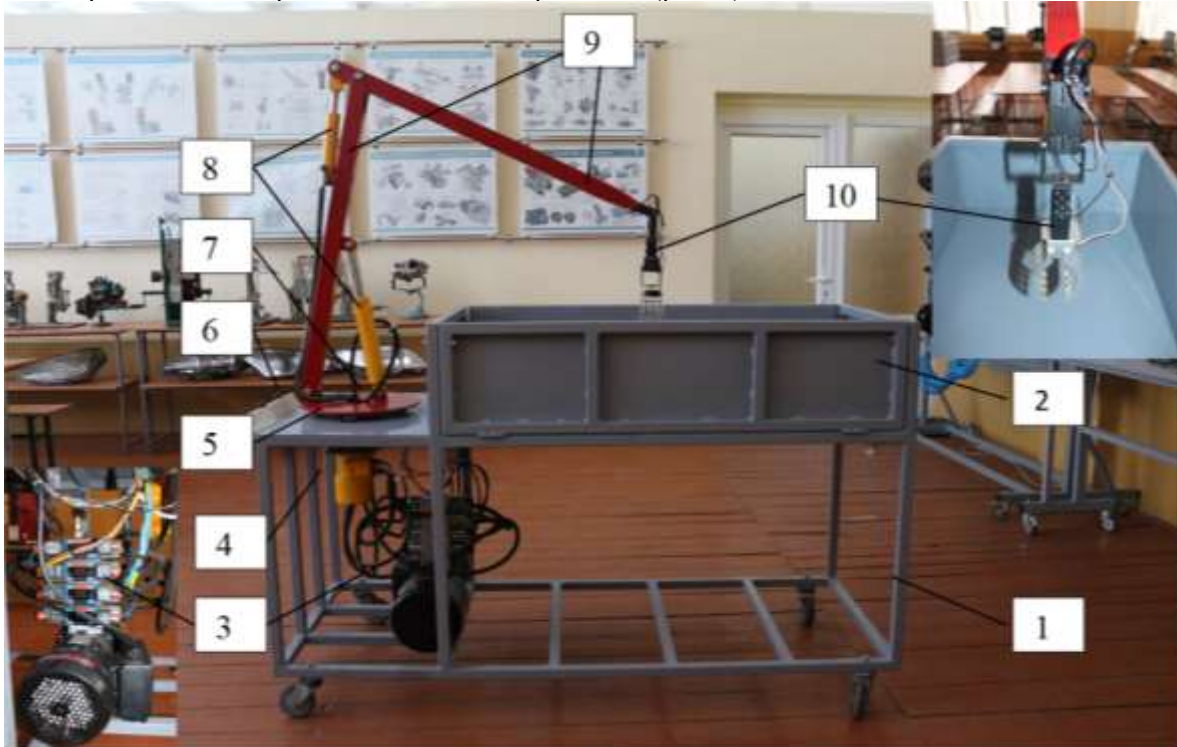


Рис. 5. Електронно-керований маніпулятор: 1 – монтажна рама; 2 – вантажна платформа з відкидними бортами; 3 – гідростанція для гідроборта НРР 160/6/0,75; 4 – поворотний механізм; 5 - монтажна плита поворотного модуля; 6 – пульт керування; 7 – поворотний модуль; 8 – гідроциліндри; 9 – перша та друга стріла; 10 – вантажозахоплювач із сервоприводом

Fig. 5. Electronically controlled manipulator: 1 – mounting frame; 2 – cargo platform with folding sides; 3 – hydraulic station for hydroboard HPP 160/6/0.75; 4 – rotary mechanism; 5 mounting plate of the rotary module; 6 – control panel; 7 – rotary module; 8 – hydraulic cylinders; 9 – first and second arrows; 10 – cargo lifter with a servo drive

Для монтажу гідроприводу крана маніпулятора використано гідростанцію для гідроборта НРР 160/6/0,75 потужністю 0,75 кВт. Монтаж блока розподільників відбувається через набірний каскад монтажних плит із запобіжними клапанами (рис. 6).

Найбільш функціонально ефективною та надійною є типова «схема підключення гідроприводу 64», що дає змогу працювати системі в холостому режимі під тиском близько 20 бар. У разі ввімкнення гідророзподільника тиск у напірній лінії зростає й подається до каскаду розпо-

дільників. Відповідно до запропонованої схеми використано електронно керовані гідро розподільники серії WE6G з можливістю стандартизованого плитного монтажу, завдяки чому досягається загальна простота конструкції та компактність гідроблоку керування. Переріз напірної лінії гідророзподільника становить 6 мм, максимальний робочий тиск – 315 бар, продуктивність – до 40 л/хв.

Управління гідроприводом стріл маніпулятора та поворотного модуля відбувається за допомогою розподільників WE6 серії E, які

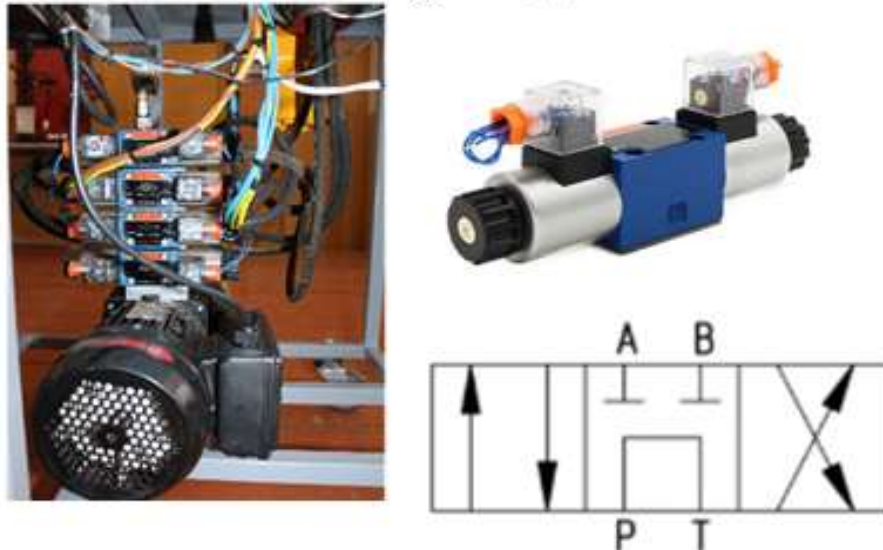


Рис. 6. Блок електромагнітних розподільників гідроприводу маніпулятора
Fig. 6. Block of electromagnetic distributors of the manipulator hydraulic drive

забезпечують підключення робочих органів за «типовою схемою 44». Вони також забезпечують [3] трипозиційне регулювання з можливістю підключення чотирьох ліній. У нейтральному положенні всі лінії закриті, а при подачі сигналу на один з електромагнітів відбувається з'єднання напірної лінії з першим виходом робочого органа, тоді як інший вихід з'єднаний зі зливом. Переміщення золотника гідроапарата відбувається двома електромагнітними котушками робочою напругою 12В, 24В або 110...220 В. Повернення золотника розподільника у вихідне положення відбувається за допомогою пружини.

Для перевірки справності електромагнітів приводу золотника гідророзподільника використано світлодіодну індикацію. Монтажний розмір стандартний та уніфікований і забезпечує належну взаємозамінність, тоді як монтаж здійснюється гвинтами М5х50.

Щоб забезпечити одночасну роботу всіх робочих органів гідроприводу крана маніпулятора, розроблено принципову схему підключення елементів. У процесі монтажу встановлено напрями потоків робочої рідини через гідророзподільники при прямому та зворотному ході гідроциліндрів. Підібрано компоненти гідросистеми відповідно до технічного завдання та схеми підключення: насосна установка – 1 шт.; гідроциліндр – 2 шт.; гідромотор – 1 шт.; гідророзподільник WE6 G (64 схема) – 1 шт.; гідророзподільник WE6 E (44 схема) – 3 шт.; дросель ПГ77-12 – 1 шт.; гідроклапан зворотний ПГ51-22 – 1 шт.; регулятор витрати зі зворотним клапаном МПГ 55-32 – 1 шт.

Для обертання маніпулятора навколо своєї осі використано поворотний модуль, виготовлений у вигляді плити діаметром 350 мм, до якої кріпиться вал, змонтований через конічні роликові підшипники в гільзі. До плити за допомогою

гвинтів змонтовано маховик зі зубчастим вінцем. У контакт з маховиком через шарнірне кріплення підведено гідромотор з привідною шестернею, завдяки чому приводиться в рух поворотний модуль у двох напрямках. Для приводу поворотного модуля використано шестеренний гідромотор зовнішнього зачеплення з двома синхронними шестернями. При обертанні шестерень рідина в западинах зубів переноситься із зони всмоктування до зони нагнітання. Однак така простота конструкції має низку недоліків - у місці зачеплення шестерень утворюється зона замкненого об'єму, що призводить до пульсації тиску на виході насоса та шумності його роботи.

Висновки. Обґрунтовано раціональну модель електронної системи керування гідроприводом крана-маніпулятора для використання в універсальних кран-маніпуляторних установках на авто-мобільних, самохідних та причіпних шасі. Це дає змогу підвищити ефективність навантажувально-розвантажувальних операцій, зменшуючи при цьому кількість техніки та працівників, залучених до вантажопереробки поза межами складів.

Запропоновано архітектуру керування маніпуляторними установками з невисокою вартістю її реалізації та простим зрозумілим налаштуванням. Використання запропонованої технології та схеми електронного керування забезпечує управління складною системою приводів, дозволяє проводити гнучкі налаштування за потребою користувача, наприклад, керувати кран-маніпулятором дистанційно через радіоканал чи обмежити величину ходу в певних напрямках.

Бібліографічний список

1. Аулін В. В., Великодний Д. О. Методи формування системи транспортно-технологічного,

- забезпечення в АПК. *Транспорт і логістика: проблеми та рішення*: зб. наук. праць за матеріалами VIII Міжнар. наук.-практ. конф., 23-25 трав. 2018 р. Одеса: КУПРІЄНКО С. В., 2018. С. 15-17.
2. Бакай Б. Я. Попереднє представлення рівняння динаміки маніпулятора методом Лагранжа-Ейлера. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів: Вид-во НЛТУ України, 2011. Вип. 21.18. С. 322–327.
 3. Буренніков Ю. А., Неміровський І. А., Козлов Л. Г. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. посіб. Вінниця, 2013. 273 с.
 4. Antonelli G. Underwater Robots. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2018. Vol. 123. 136 p.
 5. Bozorg-Haddad O., Solgi M., Loáiciga H. Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc, 2017. 304 p.
 6. Chander A., Chatterjee A., Siarry P. A. New Social and Momentum Component Adaptive PSO Algorithm for Image Segmentation. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38, iss. 5. P. 4998–5004.
 7. Design of a Fractional Order PID Controller for an AVR Using Particle Swarm Optimization. Control / M. Zamani, M. Karimi-Ghartemani, N. Sadati, M. Parniani. *Engineering Practice*. 2009. Vol. 17. P. 1380-1387. doi: 10.1016/j.conengprac.2009.07.005.
 8. Evolutionary Artificial Neural Networks by Multi Dimensional Particle / S. Kiranyaz, T. Ince, A. Yildirim, M. Gabbouj. *Swarm Optimization. Neural Networks*. 2009. Vol. 22, iss. 10. P. 1448-1462. doi: 10.1016/j.neunet.2009.05.013.
 9. Greer R., Haas C., Gibson G. *Advances in Control Systems for Construction Manipulators*. Austin, 2014. 615 p.
 10. Heo J., Lee K., Garduno-Ramirez R. Multiobjective Control of Power Plants Using Particle Swarm Optimization Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21, iss. 10. P. 552-561. doi: 10.1109/TEC.2005.858078.
 11. Lewis F. L., Dawson D. M., Abdallah C. *T. Robot Manipulator Control Theory and Practice*. New York, 2004. 607 p.
 12. Loveikin V., Romasevich Y., Spodoba O. Mathematical model of the dynamics varying the radius jib system loader crane with a load at adjustment. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. 01. P. 141-149. doi: 10.31548/machenergy.
 13. Romasevych Y., Loveikin V. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. *Cybernetics and Information Technologies*, Bulgarian Academy of Sciences. 2018. Vol. 18(3). P. 62-74. doi: 10.2478/cait2018-0039.
 14. Shramenko N., Muzylyov D., Shramenko V. Methodology of costs assessment for customer transportation service of small perishable cargoes. *International Journal of Business Performance Management*. 2020. No 21(1-2). P. 132–148.
 15. The optimization of trucks fleet schedule in view of their interaction and restrictions of the European agreement of work of crews / M. Oliskevych, S. Kovalyshyn, M. Magats, V. Shevchuk, O. Sukach. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15(2). P 157–170.

Стаття надійшла 20.08.2023