

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ГУРКО ОЛЕКСАНДР ГЕННАДІЙОВИЧ



УДК 621.87:681.5

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГІДРОМАНІПУЛЯТОРАМИ
БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

05.05.04 – машини для земляних, дорожніх і лісотехнічних робіт

13 – механічна інженерія

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Кириченко Ігор Георгійович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри будівельних та дорожніх машин ім. А.М. Холодова, декан механічного факультету.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Кузьмінець Микола Петрович,
Національний транспортний університет, завідувач кафедри комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну;

доктор технічних наук, професор
Александров Євген Євгенович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин ім. О.О. Морозова;

доктор технічних наук, професор
Маслов Олександр Гаврилович,
Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, завідувач кафедри галузевого машинобудування.

Захист відбудеться « 12 » квітня 2018 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 64.059.01 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна) та на сайті університету: <http://www.khadi.kharkov.ua/nauka/naukovo-doslidna-chastina/specializovani-vcheni-radi/d-6405901.html>

Автореферат розісланий « 02 » березня 2018 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доцент



Р. В. Смолянук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В різноманітних галузях промисловості широко використовуються машини з робочим обладнанням у вигляді однієї або декількох кінематичних пар з обертальним чи поступальним рухом. До них належать екскаватори, будівельні маніпулятори, машини для лісотехнічних робіт, автобетононасоси, автогідропіднімачі тощо. Фактично, ці машини є маніпуляторами з гідравлічним приводом, що переміщуються на транспортному засобі. Для виконання робочого процесу всі вони повинні переміщувати робочий орган (РО) за заданою траєкторією з певними швидкостями та прискореннями за обмежень, що накладаються як кінематичними параметрами самих маніпуляторів, так і конфігурацією робочої зони. Основні відмінності під час керування робочими процесами цих машин обумовлені, в першу чергу, особливостями робочих процесів: робочі органи одних машин не контактують безпосередньо з іншими тілами, тоді як інші машини спрямовані на взаємодію з зовнішнім середовищем, причому сили, що виникають у результаті цієї взаємодії, як правило, до кінця не визначені. Найбільш поширеною та однією з найскладніших серед таких машин є одноківшевий гідравлічний екскаватор (ОГЕ). Саме тому в подальшому розглядається керування гідроманіпулятором будівельної машини на прикладі ОГЕ. Підвищення ефективності виконання робочого процесу ОГЕ потребує підвищення точності виконання робочої операції копання та зниження енергетичних і часових витрат на здійснення всього робочого процесу та є складною *науково-прикладною проблемою*.

До недавнього часу вирішення цієї проблеми здійснювалося в основному традиційними методами, а саме завдяки удосконаленню конструкцій вузлів та механізмів машин, у тому числі і за рахунок забезпечення їх універсальності шляхом урізноманітнення номенклатури та складності РО, збільшення числа його степенів вільності тощо. Це утруднює роботу оператора та вимагає від нього високої кваліфікації. Крім того, ускладнення машини спричиняє те, що оператор вже не в змозі реалізувати всі її можливості, оскільки людина не спроможна одночасно керувати трьома та більше ланками, обирати раціональні, а тим більше, оптимальні режими руху. До того ж неправильні дії оператора можуть призвести до нештатних режимів роботи і нещасних випадків. Таким чином, рішення вказаної проблеми можливе лише за рахунок впровадження автоматизованих систем керування робочим процесом (АСКРП) ОГЕ та автоматичного керування гідроманіпулятором (САКГМ) ОГЕ як складової АСКРП ОГЕ, що допоможуть оператору при виконанні робочого процесу або повністю візьмуть на себе функції керування ОГЕ. Наявність АСКРП та САКГМ, що повинні стати невід'ємними частинами машини, по суті, перетворює ОГЕ у складну мехатронну систему.

Проте розробка та впровадження таких систем і, зокрема, САКГМ ОГЕ здійснюється вкрай повільно. Це обумовлено, по-перше, складністю формалізації моделей синтезу САКГМ ОГЕ, що враховують нестаціонарність і невизначеність значень як параметрів математичної моделі гідроманіпулятора ОГЕ, так і діючих на нього збурень (наприклад, сил взаємодії ковша з ґрунтом) а, по-друге, відсутністю чітких вимог до таких систем, єдиного підходу щодо вибору методів керування гідроманіпулятором в умовах невизначеності, відсутністю критеріїв ефективності

САКГМ ОГЕ. У зв'язку з цим на практиці поширені лише допоміжні автоматизовані системи нівелювання і моніторингу виконання процесу копання, а також системи керування транспортним переміщенням ковша, і на цей час не існує ОГЕ, що серійно випускаються, з повністю автоматичним виконанням робочого циклу.

Отже, автоматизація (навіть часткова) робочого процесу ОГЕ дозволить усунути *протиріччя* між розвитком теорії і практики екскаваторобудування та відсутністю методологічних основ, що складаються з єдиних підходів, моделей і методів синтезу САКГМ ОГЕ та, як наслідок, поліпшить якість і енергетичну ефективність виконання робочого процесу ОГЕ.

Один з підходів щодо проектування САКГМ ОГЕ пов'язаний з розгляданням системи «стріла-рукоять-ківш» як маніпулятора промислового робота з гідравлічним приводом. Такий підхід виправданий, оскільки очевидні паралелі між «класичними» промисловими роботами і роботизованими екскаваторами. Однак при цьому необхідно враховувати і ряд принципових відмінностей, зокрема ОГЕ переміщається по робочій поверхні (будівельному майданчику), при цьому активно змінюючи її. Більше того, нестаціонарність властивостей ґрунту робить роботу гідроманіпулятора ОГЕ набагато складнішою, ніж звичайного промислового маніпулятора. Викладене визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає державній програмі стратегії розвитку України «Україна 2020: Стратегія національної модернізації», Закону України «Про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»», а саме напрями «Інформаційні та комунікаційні технології», а також Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» (напрямок 7 «розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки»).

Робота виконувалась на кафедрі будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету в рамках загального напрямку наукової діяльності кафедри – «Підвищення ефективності і ресурсозбереження дорожньо-будівельних машин» № 0116U009948, а також відповідно до держбюджетних науково-дослідницьких робіт за темами: № 0106U001363 «Розробка теорії керування екологічно чистим транспортним засобом», 2006-2008 рр. (виконавець); № 0113U000175 «Розробка моделей та методів синтезу системи автоматичного керування робочим обладнанням екскаватора», 2013-2014 рр. (відповідальний виконавець); госпдоговірною науково-дослідницькою роботою на замовлення ТОВ «Наукове-виробниче підприємство «Газтехніка» №42-11-14 «Моделі та методи керування робочим обладнанням машин для прокладання газотранспортних комунікацій», 2014 р. (відповідальний виконавець); а також у відповідності з планом наукового проекту ТЕС2010-17429 «Robust Sensor», що фінансувався Міністерством економіки та фінансів Іспанії та виконувався на базі Мадридського політехнічного університету (Universidad Politecnica de Madrid) у 2010-2013 рр. (виконавець).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності будівельних машин покращенням точності робочих процесів розробки ґрунту та зменшенням енергетичних витрат на виконання робочих процесів шляхом їх автоматизації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз наявних підходів та рішень щодо синтезу систем керування робочим процесом екскаваторів та їх маніпуляторами, а також автоматичного керування складними технічними об'єктами в умовах невизначеності для обґрунтування вибору науково-прикладної проблеми, об'єкта, предмета, мети і завдань дисертаційного дослідження, розробки вимог до системи керування гідроманіпулятором ОГЕ;
- обґрунтувати концепцію автоматизованого керування робочим процесом ОГЕ та визначити на її основі структурну та функціональну моделі автоматизованої системи керування робочим процесом ОГЕ;
- запропонувати метод розв'язання задачі кінематичного керування гідроманіпулятором ОГЕ для визначення раціональних законів зміни приєднаних координат гідроманіпулятора для здійснення рухів робочого органа за заданими траєкторіями;
- побудувати та дослідити удосконалену математичну модель синтезу нестационарної нелінійної системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ з урахуванням наявності факторів невизначеності;
- синтезувати регулятор для автоматичного керування рухом гідроманіпулятора ОГЕ в детермінованих умовах керування;
- обґрунтувати використання та удосконалити за рахунок використання математичного апарату теорії R -функцій метод множинної ідентифікації стану системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ в умовах невизначеності щодо діючих збурень;
- розробити закон керування рухом гідроманіпулятора ОГЕ в умовах невизначеності;
- запропонувати ефективну з обчислювальної точки зору процедуру визначення керуючих впливів на виконавчі механізми гідроманіпулятора ОГЕ;
- експериментально підтвердити ефективність впровадження результатів дисертаційної роботи шляхом проведення досліджень на діючій моделі екскаватора з системою автоматичного керування його маніпулятором та виконати техніко-економічну оцінку ефективності впровадження.

Об'єктом дослідження є процес керування гідроманіпулятором будівельної машини.

Предмет дослідження – система автоматичного керування гідроманіпулятором будівельної машини.

Методи дослідження. В теоретичній частині дисертаційної роботи використовувались: наукові методи системного аналізу для структуризації та синтезу автоматизованої системи керування робочим процесом ОГЕ і системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ; методи математичного моделювання для побудови та дослідження кінематичних та динамічних моделей гідроманіпулятора ОГЕ; теорії автоматичного керування в умовах невизначеності, методи керування промисловими роботами-маніпуляторами для розробки законів керування гідроманіпулятором ОГЕ; метод множинної ідентифікації для визначення стану системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ та математичні методи опису множин за допомогою апаратів лінійних матричних нерівностей і R -функцій

для побудови множин можливих станів системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ; методи об'єктно-орієнтованого програмування для імітаційного моделювання робочого процесу ОГЕ та системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ під час виконання робочого процесу.

Експериментальні дослідження проводилися на натурному стенді екскаватора EO2621A зі встановленою системою автоматичного керування його маніпулятором і на екскаваторі *Борекс-2201* з використанням методів планування експерименту, статистичної обробки експериментальних даних та методів числового аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів. У процесі дисертаційного дослідження на основі робастного підходу до керування складними технічними об'єктами в умовах невизначеності дістали подальшого розвитку методологічні основи автоматичного керування гідроманіпулятором будівельної машини на прикладі ОГЕ під час виконання робочого процесу в умовах невизначеності. При цьому до нових, отриманих особисто автором, слід віднести наступні результати.

Вперше:

- розроблена функціональна модель автоматизованої системи керування робочим процесом ОГЕ як комплексної просторово-розподіленої ієрархічної системи керування, що дозволило визначити основні етапи синтезу автоматизованої системи керування робочим процесом ОГЕ та виділити з них найменш розроблені;

- запропоновано метод розв'язання задачі кінематичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, в тому числі і надлишкового, який, на відміну від традиційних, враховує способи виконання операцій копання, що дозволяє визначити раціональні закони зміни приєднаних координат гідроманіпулятора з точки зору мінімізації енергетичних витрат на його рух, та забезпечує переміщення робочого органа за довільною траєкторією в операційному просторі з високою точністю;

- запропоновано закон керування рухом гідроманіпулятора ОГЕ під час виконання робочого процесу в умовах невизначеності, який, на відміну від відомих, враховує інформацію про обмежені множини значень невизначених факторів, до яких належать неточно відомі сили взаємодії робочого органа з ґрунтом, щільність самого ґрунту, а також шуми вимірювань значень приєднаних координат, що забезпечує високу якість виконання робочого процесу для довільних значень компонентів векторів невизначених факторів, що належать відомим множинам;

- розроблено процедуру визначення керуючих впливів на виконавчі механізми гідроманіпулятора ОГЕ, яка, на відміну від відомих, ґрунтується на аналізі розташування у просторі станів точки, що зображує поточний стан системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ відносно дна функції Ляпунова, що дозволяє здійснювати розрахунок керуючого впливу за одну ітерацію.

Удосконалено:

- методологію синтезу системи автоматизованого керування робочим процесом ОГЕ, що заснована на обґрунтованій системній концепції автоматизованого керування робочим процесом ОГЕ, яка, на відміну від наявних, базується на інтегрованій взаємодії завдань організації та планування заходів з проведення земляних робіт парком машин, автоматичного керування гідроманіпулятором та переміщеннями окремої машини, що дозволило створити єдине комплексне уявлення про структуру автоматизованої системи керування

робочим процесом ОГЕ для покращення ефективності використання кожного ОГЕ, підвищення точності та енергоефективності виконання земляних робіт;

- математичну модель синтезу системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ в просторі станів, що на відміну від наявних, ураховує вплив компонентів векторів невизначених факторів та гарантує стійкість та високу якість процесу керування рухом гідроманіпулятора ОГЕ в умовах невизначеності щодо сил взаємодії робочого органа з ґрунтом та шумів вимірювань приєднаних координат гідроманіпулятора;

- метод множинної ідентифікації координат стану системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, який відрізняється від відомих використанням для побудови множин можливих станів системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ математичного апарату R -функцій, а також визначенням компонентів вектора стану, що використовується під час обчислення керуючих впливів на виконавчі приводи гідроманіпулятора побудовою множини найбільш вірогідних значень координат стану системи керування як сукупності точок, які геометрично рівновіддалені від границі вихідної інформаційної множини можливих станів системи керування, що підвищує точність та обчислювальну ефективність процесу ідентифікації стану системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ та дозволяє наблизити режими руху гідроманіпулятора до раціональних.

Дістав подальшого розвитку метод керування маніпуляторами шляхом обчислення моменту на основі пропорційно-диференціюючого закона керування з динамічними фільтрами високочастотних коливань за рахунок розповсюдження його на новий клас об'єктів – гідроманіпулятор ОГЕ, що дозволяє зменшити помилки керування, викликані неточним знанням параметрів моделі гідроманіпулятора ОГЕ та шумів вимірювань його приєднаних координат, і підвищує запаси стійкості системи керування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- істотному підвищенні точності розробки ґрунту (до 1,5 см у порівнянні з 10–12 см під час ручного керування) і, як наслідок, зменшенні обсягу ручної праці під час доробки земляних споруд та підвищенні продуктивності від 10,1 до 25,7% у залежності від кваліфікації оператора;

- збереженні до 25% енергоресурсів при виконанні робочого процесу за рахунок забезпечення раціональних законів зміни узагальнених координат гідроманіпулятора ОГЕ;

- скороченні часу виконання робіт за рахунок зменшення кількості проходів під час розробки забою та забезпечення спільного руху усіх ланок гідроманіпулятора ОГЕ, що позитивно позначиться на фінансових і трудових витратах;

- забезпеченні можливості безперервного виконання робіт, що підвищує продуктивність екскаваторів;

- спрощенні умов роботи оператора, зменшенні його фізичного навантаження, вимог до його кваліфікації, а також скороченні часу на професійну підготовку;

- програмній реалізації імітаційних моделей робочих процесів ОГЕ та системи керування цими процесами, що дозволяє здійснювати обчислювальні експерименти

для оцінювання динамічних характеристик гідроманіпулятора ОГЕ, ефективності САКГМ ОГЕ;

– розробці вимірювального комплексу, призначеного для автоматизованого збору експериментальних даних про динамічні параметри САКГМ ОГЕ.

Результати роботи можуть також бути корисними для синтезу систем керування робочим процесом інших машин з робочим обладнанням маніпуляторного типу, у робототехніці для створення нових та модернізації наявних промислових маніпуляторів.

Результати дисертаційної роботи використовуються на Державному підприємстві Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, ПАТ Харківський машинобудівельний завод «Світло шахтаря», ТОВ «Науково-виробниче підприємство «Газтехніка», ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «Харківський насосний завод», ТОВ «Харківський завод «Машгідропривід», а також у навчальному процесі для підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальностями 133 «Галузеве машинобудування», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (ХНАДУ) та аспірантів у Автономному університеті Нижньої Каліфорнії (UABC), м. Мехікалі, Мексика.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно та опубліковані в роботах [1–43]. Роботи [5,6,8,9,13,14,15,18,23,27–31,34,40,41,42] виконані й опубліковані одноосібно. У друкованих працях, що опубліковані у співавторстві, автору належать: метод ідентифікації стану динамічних об'єктів у вигляді опуклих багатогранників в умовах невизначеності [1,7]; розв'язок задачі кінематичного керування гідроманіпулятором ОГЕ поліноміальними методами планування траєкторій [10,37]; розв'язок задачі синтезу регулятора з обчислювальним моментом та регулятора з динамічними компенсаторами для фільтрації дій невизначених факторів [19,38]; робастний регулятор на основі гарантованого підходу для керування рухом маніпулятора [11]; нові методи кінематичного керування маніпулятором промислового робота та гідроманіпулятором ОГЕ [20,36,39]; регулятор для керування рухом стріли автогідропідіймача [21]; результати аналізу датчиків у системах автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, результати експериментальних досліджень потенціометричних датчиків для системи керування гідроманіпулятором ОГЕ [12]; результати аналізу кінематичної моделі механізму автогідропідіймача [22]; модифікований протокол обміну даними між мікропроцесорною системою та ПЕОМ за реалізації стенда екскаватора з САКГМ [16]; вимірювальний комплекс для дистанційної реєстрації даних про динамічні параметри робочого обладнання маніпуляторного типу [17]; імітаційні моделі роботів-маніпуляторів [24]; метод пошуку квазіоптимального керування, заснований на аналізі взаємної орієнтації множини можливих станів САКГМ і еквіпотенціальних поверхонь функції Ляпунова [2]; метод оцінювання вектора стану динамічної системи з використанням R-функцій для побудови множин можливого стану САКГМ [3,33]; робастна система керування процесом копання роботизованим екскаватором [4,26,43]; метод робастного керування динамічним об'єктом на основі функції Ляпунова [32];

робастний регулятор для робота-екскаватора [35], програмне забезпечення стенда роботизованого екскаватора [25].

Апробація результатів дисертації. У повному обсязі дисертаційна робота обговорена на розширеному засіданні кафедри будівельних та дорожніх машин ХНАДУ, на розширеному семінарі науковців кафедр інституту інженерної механіки, автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного лісотехнічного університету України, м. Львів, а також на науковому семінарі факультету інженерії Автономного університету Нижньої Каліфорнії, м. Мехікалі, Мексика. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідались на щорічних науково-практичних конференціях працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів ХНАДУ (2005-2017 рр.); I міжнародній науково-технічній конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» м. Харків, ХНАДУ (2009 р.); IX міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики та моделювання - 2009», м. Харків, НТУ «ХПІ» (2009 р.); IX міжнародній міждисциплінарній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації керування», м. Харків, ХНУ ім. В.Н. Каразіна (2009); IX-XIII міжнародних міждисциплінарних науково-практичних школах-конференціях «Сучасні проблеми науки та освіти» (Алушта, Севастополь, Ялта, Євпаторія, Одеса) (2009-2013 рр.); XVI науково-технічній конференції «Транспорт, Екологія - Устойчиво развитие», м. Варна, Болгарія (2010 р.); XXII IEEE осінній міжнародній конференції та промисловій виставці з комунікаційних технологій, комп'ютерної техніки, електроніки, автоматизації та робототехніки IEEE ROC&C2011, м. Акапулько, Мексика (2011 р.); XVIII міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика/Automatics – 2011» (2011 р.) та XII міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (2015 р.), м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»; XIX міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика/Automatics – 2012», м. Київ, НУХТ, (2012); IX міжнародній конференції за підтримки IEEE з інформатики в керуванні, автоматизації та робототехніці ICINCO-2012 (стендова доповідь), м. Рим, Італія (2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні комп'ютерно-інноваційні технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг та аеродромів», м. Харків, ХНАДУ (2012 р.), щорічній IEEE конференції з промислової електроніки IEEE IECON 2013, м. Відень, Австрія (2013 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку дорожньо-транспортного і будівельного комплексів», м. Кіровоград, Кіровоградський національний технічний університет (2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання прикладних задач математики, фізики, механіки» (ММАР-2013)», м. Харків, ХНАДУ (2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології і мехатроніка», м. Харків, ХНАДУ (2014 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні дослідження в будівельному та сільськогосподарському машинобудуванні», м. Рівне, Національний університет водного господарства та природокористування (2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції студентів і молодих вчених «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у дорожньо-будівельній галузі», м. Харків, ХНАДУ, (2014, 2015 рр.); XII міжнародній

конференції за підтримки IEEE з інформатики в керуванні, автоматизації та робототехніці ICINCO-2015, м. Кольмар, Франція (2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Нові досягнення в дослідженнях будівельних, дорожніх і підйомно-транспортних машин», м. Харків, ХНАДУ (2016 р.), а також регулярних засіданнях Науково-методичної комісії за фахом «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини та устаткування» МОН України (2012 – 2017 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 43 друкованих працях, у тому числі у 21 роботі, що опубліковані у фахових виданнях України, 1 з них – у журналі, що індексується у наукометричній базі даних Thomson Reuters Web of Science (WoS); 4 статтях у закордонних виданнях, що входять до наукометричної бази даних SCOPUS; 1 Патенті України на корисну модель; 16 матеріалах і тезах міжнародних науково-технічних конференцій (у тому числі IEEE), серед яких конференції у Болгарії, Мексиці, Італії, Австрії, Франції, причому 3 останні входять до наукометричної бази даних SCOPUS; матеріалах 1 всеукраїнської конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел із 363 найменувань (38 сторінок), та 2-х додатків. Повний обсяг роботи складає 400 сторінок, у тому числі 305 сторінок основного тексту, 17 таблиць, 187 ілюстрацій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ дисертаційної роботи містить обґрунтування актуальності теми та наукових завдань; інформацію про зв'язок роботи з науковими програмами; мету й завдання дослідження; об'єкт, предмет і методи дослідження; характеристику наукової новизни та практичного значення отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача; дані щодо реалізації, апробації та публікації результатів.

У **першому розділі** наведено результати аналізу наявних методів підвищення ефективності керування робочим обладнанням ОГЕ, керування складними технічними об'єктами в умовах невизначеності, а також підходів до математичного моделювання взаємодії робочого органа машини для земляних робіт (МЗР) з ґрунтом.

Завдання оптимізації режимів та автоматизації виконання робочого процесу МЗР, а також підйомно-транспортних машин розглядалися багатьма авторами. Значний внесок у розвиток цього напрямку внесли такі вчені, як В.І. Баловнєв, О.В. Григоров, О.А. Залесов, С.В. Кравець, В.С. Ловейкін, В.П. Ломакін, М.С. Ломакін, В.О. Мещеряков, П.О. Міхирєв, В.П. Павлов, Л.Д. Певзнер, Л.А. Хмара, В.С. Щербаков, D.A. Bradley, A.J. Koivo, S. Tafazoli, P.K. Vaha та інші. Аналіз робіт згаданих та інших авторів показав, що імплементація у практику значних теоретичних досягнень щодо визначення раціональних та оптимальних режимів роботи машин потребує розробки та впровадження мехатронних систем для автоматизації виконання робочого процесу. Основна тенденція під час створення таких систем пов'язана з роботизацією ОГЕ, розгляданням системи «стріла-рукоятків» як маніпулятора промислового робота з гідравлічним приводом і, відповідно, застосуванням методів робототехніки з урахуванням особливостей робочого процесу екскаватора. На цей час серійно випускаються автоматизовані системи

керування гідроманіпулятором ОГЕ, що використовують бортові ЕОМ з людино-машинним інтерфейсом, які в реальному часі відображають інформацію про стан машини та конфігурацію її гідроманіпулятора. На основі одержаної інформації оператор має можливість коригувати свої дії з метою підвищення якості виконання робочого процесу.

Проведений аналіз відповідних досліджень показав, що практичному втіленню більш складних, автоматичних, систем заважає відсутність наукової та методологічної бази для їх синтезу. Потребують подальшого розвитку методи прийняття рішень щодо раціональних і оптимальних режимів руху гідроманіпулятора та РО. Оскільки керувати гідроманіпулятором ОГЕ доводиться в умовах невизначеності, то виникає завдання ідентифікації в режимі реального часу параметрів математичної моделі гідроманіпулятора ОГЕ та вектора станів системи керування ним для визначення керуючих впливів; необхідне удосконалення власне законів керування гідроманіпуляторами ОГЕ в умовах невизначеності на базі використання сучасних досягнень теорії автоматичного керування, зокрема, робастного підходу та прогресивних інформаційних технологій.

На основі результатів аналізу проблеми автоматизації робочого процесу ОГЕ обґрунтовано системну концепцію автоматизованого керування робочими процесами ОГЕ, відповідно до якої окремі етапи виконання земляних робіт розглядаються як частини єдиної системи, що постійно знаходиться у динаміці. Концепція базується на інтегрованій взаємодії завдань планування земляних споруд, виконання проектних робіт, здійснення логістичних робіт з доставки необхідних вантажів, матеріалів та машин до будівельного майданчика, а також керування робочим процесом кожної з машин. При цьому хід та результати виконання завдань на кожному з етапів постійно впливають на інші етапи, що може потребувати корекції запланованих рішень.

Постановка узагальненого завдання такої системи представлена наступним чином. Відомо: проект земляної споруди, план будівельного майданчика, наявний парк ОГЕ та характеристики машин. Необхідно: а) з наявного парку ОГЕ обрати машини, використання яких найбільш доцільне для виконання запланованих робіт, надати завдання кожній з машин у вигляді цифрової карти місцевості з конфігурацією забою та планом траєкторій руху в глобальній системі координат; б) на рівні кожної машини забезпечити виконання запланованого робочого процесу з високою якістю та енергетичною ефективністю.

Впровадження вказаної концепції автоматизованого керування робочими процесами ОГЕ пов'язана з розробкою АСКРП ОГЕ та потребує створення системи проектного офісу, удосконалення технічних засобів для визначення стану РО та навантажень у ньому, приводів для здійснення руху ланок гідроманіпулятора, синтезу бортової мережі машини тощо. На цей час завданням створення АСКРП ОГЕ як комплексної системи для автоматизації виконання земляних робіт приділяється недостатня увага, чітко не визначена ієрархія АСКРП ОГЕ, тому в результаті вирішення завдання структурного синтезу АСКРП ОГЕ запропоновано її ієрархічну структуру (рис. 1), де за аналогією зі структурою АСУТП на нижньому рівні розташовано датчики, виконавчі механізми та засоби їх узгодження з керуючими пристроями, зв'язку між підсистемами та надання інформації

операторів; середній рівень – рівень обчислювальних та керуючих пристроїв, а верхній рівень – це рівень проектного офісу, де здійснюється планування земляних робіт та контроль їх виконання. Запропонована структуризація дозволила визначити набір завдань синтезу АСКРП ОГЕ для кожного з її рівнів.

Шляхом декомпозиції завдань, що вирішуються на кожному з рівнів АСКРП ОГЕ, розроблено її функціональну модель як комплексної просторово-розподіленої системи (рис. 2), що дозволило визначити функціональні структури підсистем та місця розташування їх пристроїв, а також виділити найменш розроблені структурні елементи АСКРП ОГЕ.

Для рівня керування екскаватором ними є підсистеми планування рухів гідроманіпулятора ОГЕ та реалізації цих рухів в умовах невизначеності. Вказані завдання вирішуються САКГМ ОГЕ.

Сформульовано основні вимоги до САКГМ ОГЕ як складової АСКРП ОГЕ, які полягають у виконанні операції робочого циклу ОГЕ з максимальною потужністю та швидкістю, але виключаючи перевантаження і динамічні удари в кінематичних ланцюгах і гідроприводі; забезпеченні плавності законів зміни узагальнених координат гідроманіпулятора ОГЕ, уникаючи при цьому крайніх положень штоків гідроциліндрів і спрацьовувань запобіжних клапанів; забезпеченні постійного значення кута різання, який відповідає мінімальній енергоємності процесу копання; розробці земляної споруди з високою точністю в умовах невизначеності щодо властивостей ґрунту. При цьому основна увага дослідників спрямована лише на вирішення останнього завдання. Отже, на підставі проведеного аналізу виявилось

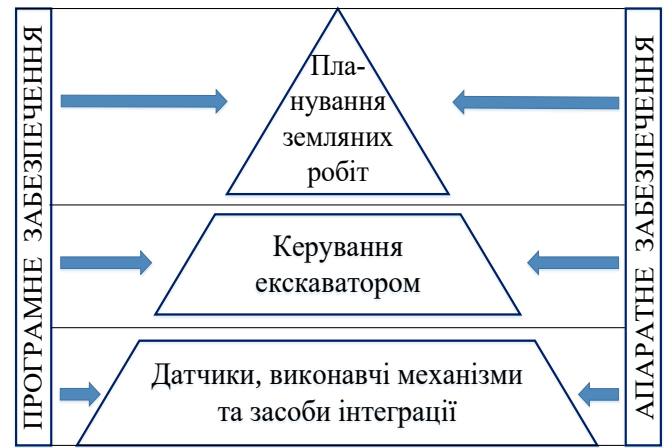


Рисунок 1 – Ієрархічна структура АСКРП ОГЕ

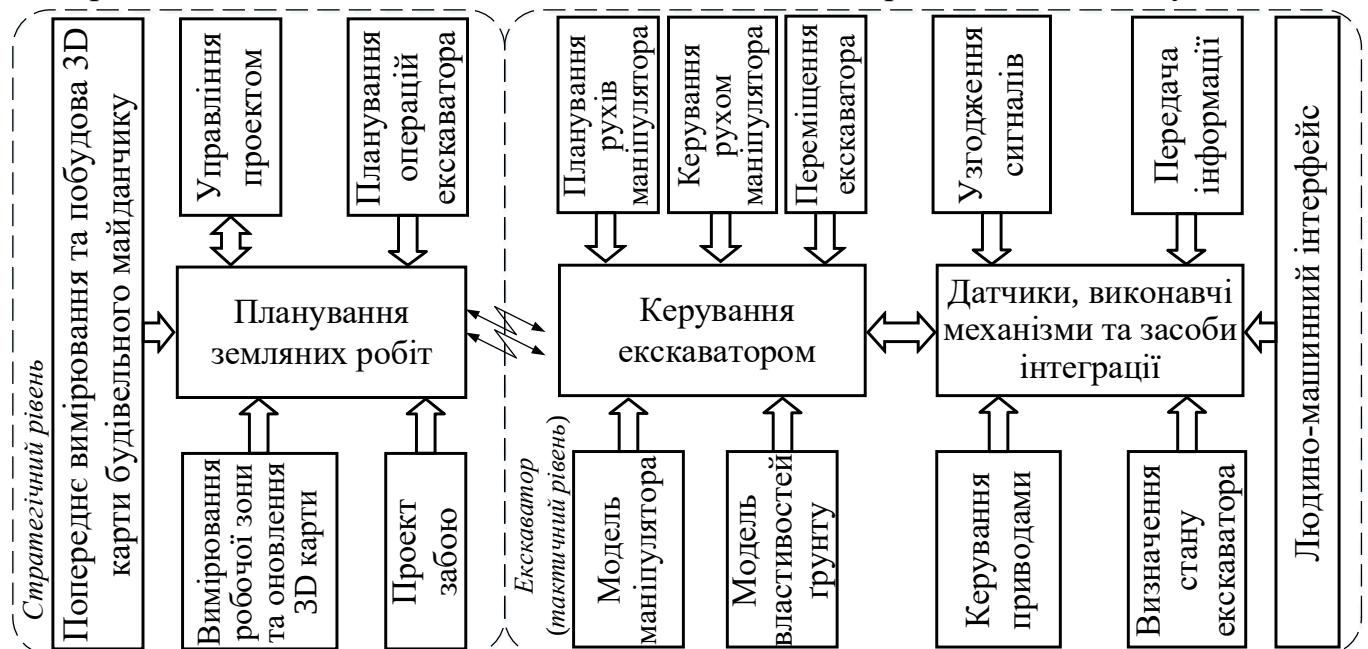


Рисунок 2 – Функціональна модель системи керування екскаватором

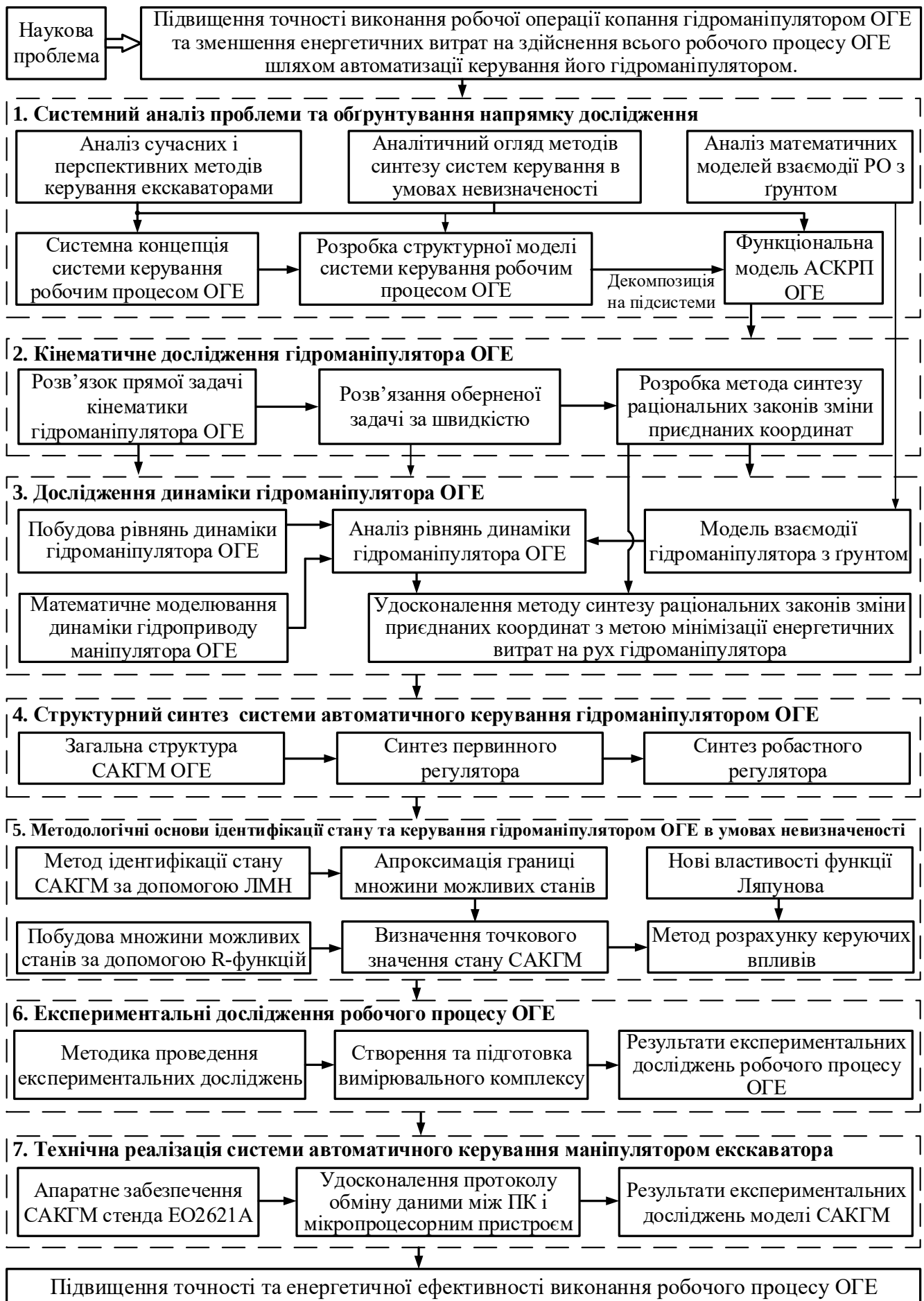


Рисунок 3 – Спрощена структурно-логічна схема дослідження

необхідним здійснити дослідження, спрямовані на розробку методологічних основ синтезу системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, а саме – розробити методологічні основи, що складаються з моделей і методів, які забезпечать створення ефективної системи керування гідроманіпулятором ОГЕ в умовах невизначеності. Структуру дослідження ілюструє рис. 3.

У другому розділі в рамках вирішення поставлених завдань виконане кінематичне дослідження гідроманіпулятора. Для опису просторового положення і орієнтації РО гідроманіпулятора умовної будівельної машини з довільною кількістю ланок (рис. 4) використано апарат матриць **T** однорідного перетворення. Для завдання систем координат ланок гідроманіпулятора ОГЕ застосовано векторно-матричний метод Денавита-Хартенберга. Для випадку ОГЕ з традиційним компонованням гідроманіпулятора (рис. 5) положення і орієнтація ковша відносно бази ОГЕ визначається наступним чином:

$${}_{0_0}\mathbf{P}_{O_4} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \\ \sin \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \\ l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

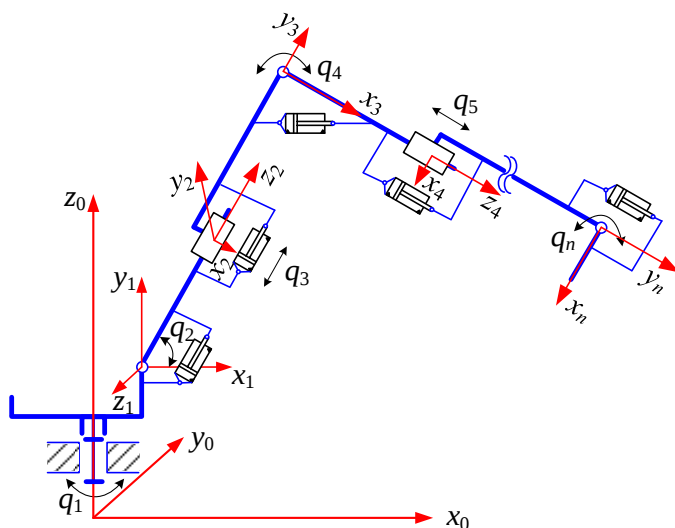


Рисунок 4 – Приклад кінематичного ланцюга гідроманіпулятора умовної будівельної машини

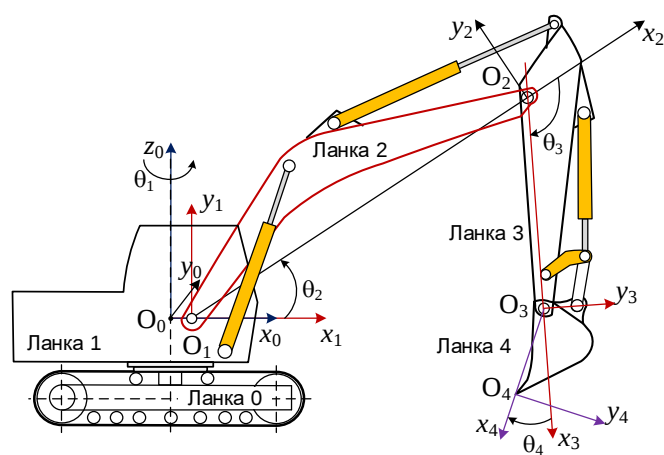


Рисунок 5 – Ланки гідроманіпулятора ОГЕ і відповідні системи координат

Зв'язок між значеннями переміщень штоків виконавчих гідроциліндрів і приєднаними координатами θ_2 , θ_3 і θ_4 ланок гідроманіпулятора ОГЕ встановлюють наступні вирази (рис. 6):

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{l_{O_1A_1}^2 + l_{O_1A_2}^2 - l_{A_1A_2}^2}{2l_{O_1A_1}l_{O_1A_2}} \right) - \varphi_1 - \varphi_2, \quad (2)$$

$$\theta_3 = \pi - \gamma_2 - \varphi_3 - \varphi_4, \quad (3)$$

$$\theta_4 = \pi + \varphi_6 + \varphi_7 - \gamma_3 - \gamma_4 - \gamma_5, \quad (4)$$

де

$$\gamma_2 = \arccos \left(\frac{l_{B_1B_2}^2 + l_{B_1O_2}^2 - l_{O_2B_2}^2}{2l_{B_1B_2}l_{O_2B_2}} \right), \quad (5)$$

$$\gamma_3 = \varphi_5 - \arccos \left(\frac{l_{C_1C_4}^2 + l_{C_2C_4}^2 - l_{C_1C_2}^2}{2l_{C_1C_4}l_{C_2C_4}} \right), \quad (6)$$

$$\gamma_4 = \arccos \left(\frac{l_{C_3O_3}^2 + l_{C_2C_3}^2 - l_{O_3C_4}^2 + l_{C_2C_4}^2 - 2l_{O_3C_4}l_{C_2C_4}\cos\gamma_3}{2l_{C_3O_3}l_{C_2C_3}} \right), \quad (7)$$

$$\gamma_5 = \arccos \left(\frac{l_{C_2O_3}^2 + l_{C_2C_3}^2 - l_{O_3C_3}^2}{2l_{C_2O_3}l_{C_2C_3}} \right) + \arccos \left(\frac{l_{C_2O_3}^2 + l_{C_2C_4}^2 - l_{O_3C_4}^2}{2l_{C_2O_3}l_{C_2C_4}} \right). \quad (8)$$

Одержані результати розв'язку прямої задачі кінематики необхідні для планування рухів у САКГМ ОГЕ, зокрема для перевірки досяжності тієї чи іншої точки простору.

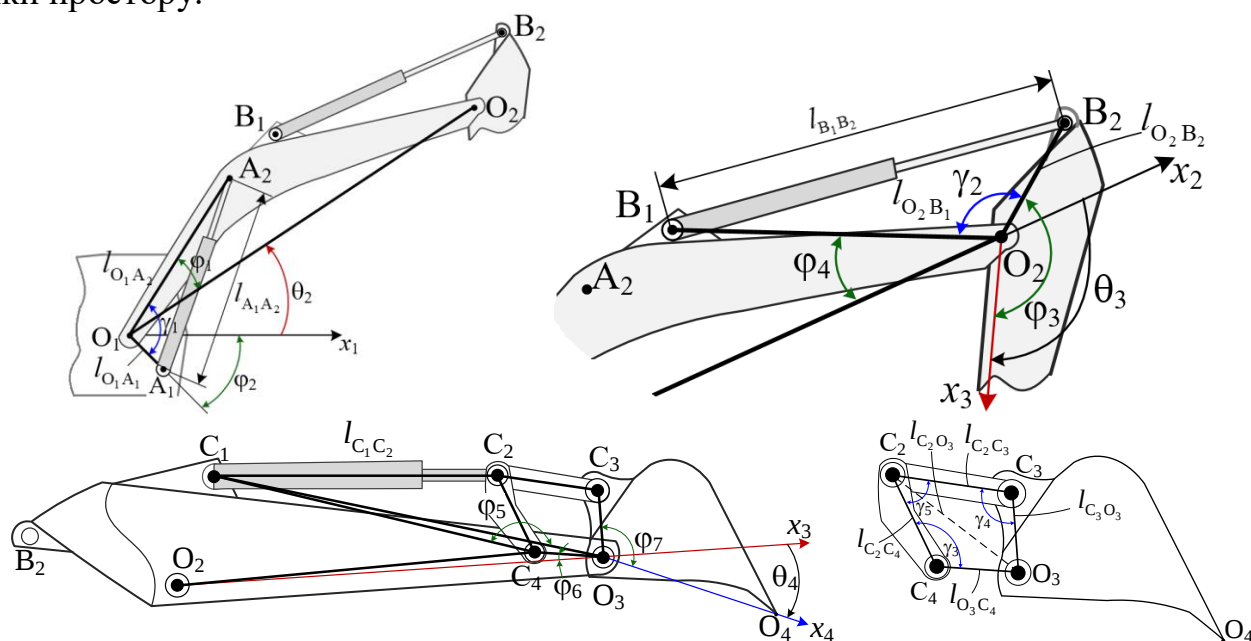


Рисунок 6 – До визначення зв'язку між переміщеннями штоків гідроциліндрів і приєднаними координатами θ_2 , θ_3 і θ_4 ланок гідроманіпулятора ОГЕ

Згідно з розробленою функціональною моделлю АСКРП ОГЕ запропоновано метод синтезу кінематичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, що полягає в знаходженні значень приєднаних координат θ_i за заданими обмеженнями на їх швидкості $\dot{\theta}_i$ і прискорення $\ddot{\theta}_i$, $i = \overline{2, n}$ у кінематичних парах гідроманіпулятора з n -ланками, що забезпечують заданий рух і орієнтацію РО відносно абсолютної системи координат $x_0O_0z_0$ (рис. 7). Сутність методу полягає у розв'язанні наступної системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$(\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k + \lambda \mathbf{C}) \mathbf{\Theta}_k = \mathbf{H}_k^T \mathbf{F}_k, \quad (9)$$

де $(\mathbf{\Theta}_k)_{i-1} = \Delta \theta_i^k$ – вектор-стовпець, що містить шукані приращення кутів при зміні кроку k за часом; λ – малий довільний позитивний параметр, що забезпечує

стійкість обчислення матриці $(\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k + \lambda \mathbf{C})^{-1}$; $\mathbf{C}$ – квадратна $(n \times n)$ -матриця; $\mathbf{F}_k = [-\Delta x_4^k \quad \Delta z_4^k]^T$ (рис. 7); $\mathbf{H}_k$ – прямокутна матриця, елементи якої дорівнюють:

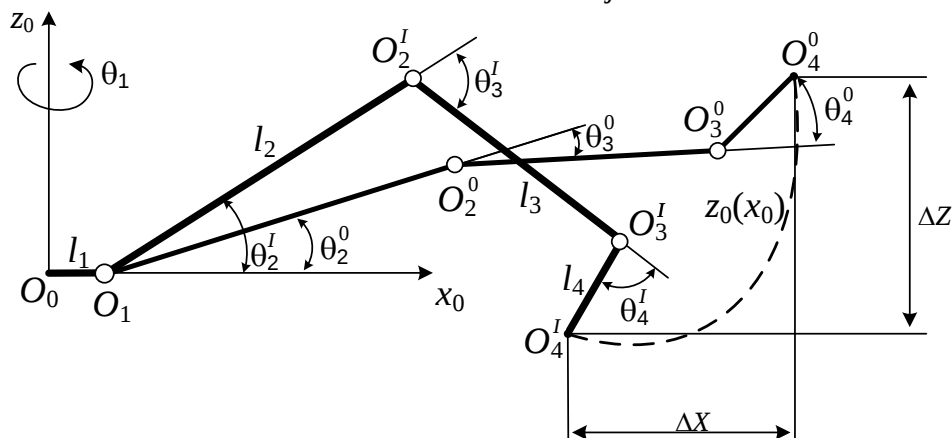
$$(\mathbf{H}_k)_{1,i-1} = \sum_{j=i}^n l_j \sin \alpha_j^{k-1}, \quad (\mathbf{H}_k)_{2,i-1} = \sum_{j=i}^n l_j \cos \alpha_j^{k-1}; \quad \alpha_i = \sum_{j=2}^i \theta_j; \quad i = \overline{2, n}.$$


Рисунок 7 – Схема гідроманіпулятора ОГЕ і траєкторія зубів ковша

З урахуванням специфіки вектора Θ_k матриця $\mathbf{C}$ вважається діагональною, ненульові елементи якої задаються за формулою:

$$(\mathbf{C})_{i-1,i-1} = \gamma_i \quad (i = \overline{2, n}). \quad (10)$$

Для звуження області можливих рішень уведено критерій оптимальності:

$$J_k = \sum_{i=2}^n \gamma_i \cdot (\Delta \theta_i^k)^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

на кожному часовому кроці k , де $\Delta \theta_i^k$ ($i = \overline{2, n}$) – приріст приєднаних координат.

Для ОГЕ з традиційним гідроманіпулятором (рис. 5) значення вагових коефіцієнтів γ_i ($i = \overline{2, 4}$) у (10) обираються наступним чином. Значення γ_2 задається свідомо великим, що відповідає мінімізації переміщення стріли. Значення γ_3 і γ_4 залежать від способу копання: під час копання ґрунту поворотом ковша $\gamma_3 \gg \gamma_4$; під час копання рукояттю $\gamma_4 \gg \gamma_3$; під час сумісного копання рукояттю і ковшем співвідношення між коефіцієнтами γ_3 і γ_4 обираються такими, щоб вирівняти максимальні значення кутових прискорень ε_i відповідних ланок.

Для підвищення продуктивності ОГЕ необхідно забезпечити близьку до максимальної швидкість v руху ланок його гідроманіпулятора в базовій системі координат. Оскільки синтез законів зміни приєднаних координат гідроманіпулятора виконано в просторі цих координат, отримано зв'язок між лінійними і кутовими швидкостями РО ОГЕ та швидкостями зчленувань його гідроманіпулятора на основі матриці Якобі $\mathbf{J}(\theta) \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $m \leq 6$:

$$\dot{\theta} = \mathbf{J}^{-1}(\theta) \mathbf{v}, \quad (12)$$

де $\mathbf{v} = (v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$ – вектор, компонентами якого є лінійні швидкості v та кутові швидкості ω , відкладені на осях x, y, z у базовій системі координат.

Для наведеного вище ОГЕ (рис. 5):

$$\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{l_2 l_3 \sin \theta_3} \begin{pmatrix} l_3 \cos \theta_{23} & l_3 \sin \theta_{23} & l_3 l_4 \sin \theta_4 \\ -l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_{23} & -l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin \theta_{23} & -l_2 l_4 \sin \theta_{34} - l_3 l_4 \sin \theta_4 \\ l_2 \cos \theta_2 & l_2 \sin \theta_2 & l_2 l_3 \sin \theta_3 + l_2 l_4 \sin \theta_{34} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

З (13) слідує, що для ОГЕ з традиційним гідроманіпулятором (рис. 5) при куті повороту рукояті $\theta_3 = 0$ гідроманіпулятор втрачає один степінь вільності і неможливо отримати однозначний зв'язок між лінійними і кутовими швидкостями РО ОГЕ зі швидкостями зчленувань його гідроманіпулятора, що необхідно для забезпечення раціонального руху гідроманіпулятора ОГЕ. Ці умови є додатковими обмеженнями при синтезі САКГМ ОГЕ законів зміни приєднаних координат. Проте, за малих кутів повороту рукояті $\theta_3 \approx 0$, малі швидкості в операційному просторі ОГЕ спричиняють великі швидкості в приєднаному просторі.

Ефективність запропонованого методу підтверджують обчислювальні експерименти, що проведені для ОГЕ 3-ї розмірної групи для різних траєкторій зубів ковша в операційному просторі (рис. 8). Одержані закони забезпечують точність руху зубів ковша за бажаною траєкторією з точністю не гірше ніж 0,5%.

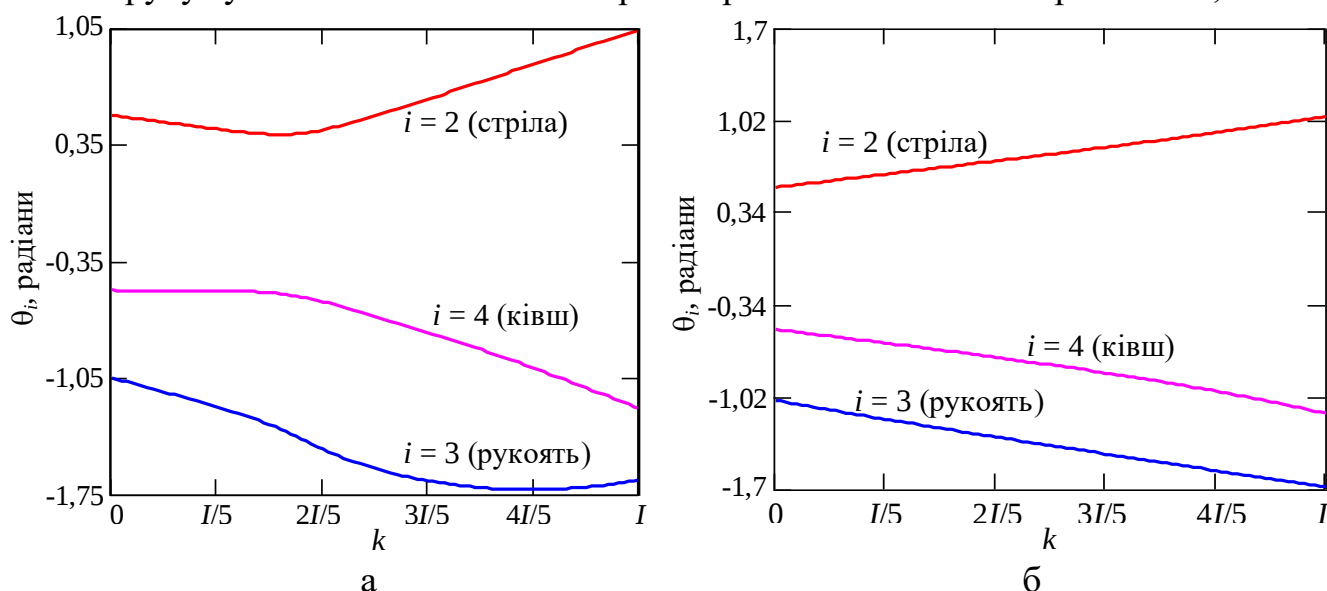


Рисунок 8 – Результати розв'язку задачі кінематичного керування при параболічній (а) та прямолінійній (б) траєкторіях зубів ковша

Третій розділ присвячений дослідженню динаміки гідроманіпулятора ОГЕ. Динамічну модель гідроманіпулятора ОГЕ побудовано за допомогою методу Ньютона-Ейлера. Для компактності представлення та зручності обчислень рівняння динаміки зведені до наступної, відомої в робототехніці матричної форми:

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{B}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{M} + \mathbf{M}_L, \quad (14)$$

де $\mathbf{D}(\boldsymbol{\theta}) = [d_{i,j}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – симетрична позитивно визначена матриця сил інерції гідроманіпулятора; $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = [c_{i,j}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матриця, що містить всі відцентрові і

коріолісові члени; $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = [g_i]^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор сил гравітації; $\mathbf{B}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) = [\ell_i \dot{\theta}_i]^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор сил тертя; $\mathbf{M} = [M_i]^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор керуючих моментів, що розвиваються гідроприводом; $\mathbf{M}_L = [M_{Li}]^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор моментів сил опору, що виникають під час руху гідроманіпулятора ОГЕ, його компоненти залежать від типу гідроманіпулятора, режиму роботи та ін. і в загальному випадку до кінця не визначені; $i = \overline{1, n}$; n – число степенів вільності гідроманіпулятора, для класичного ОГЕ $n = 3$.

Момент M_i , що розвивається i -им гідроциліндром залежить від степеня висунення x_{pi} його штока:

$$M_i = \frac{\partial x_{pi}}{\partial \theta_i} \cdot (A_{Ai} p_{Ai} - A_{Bi} p_{Bi} - F_{fri}(\dot{x}_{pi})), \quad (15)$$

де A_{Ai}, A_{Bi} – площі поршнів гідроциліндрів з боку безштокової А і штокової В порожнин; p_{Ai}, p_{Bi} – тиски у відповідних порожнинах гідроциліндрів; $F_{fri}(\dot{x}_{pi})$ – сила тертя; $i = \overline{1, n}$ (рис. 9).

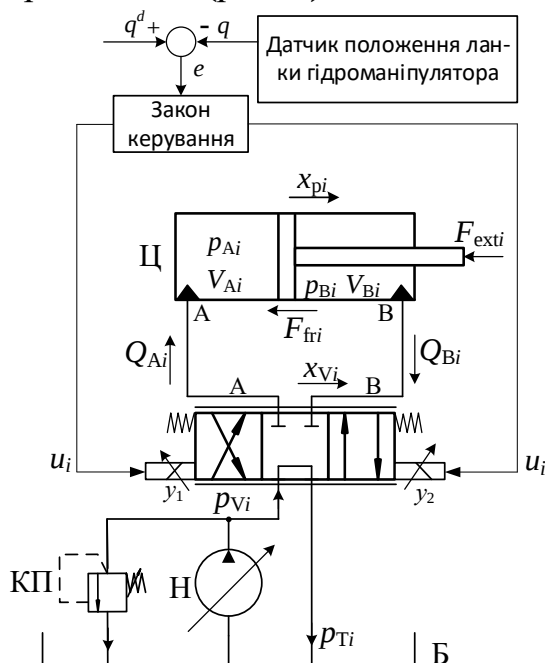


Рисунок 9 – Спрощена схема гідропривода i -ї ланки гідроманіпулятора ОГЕ

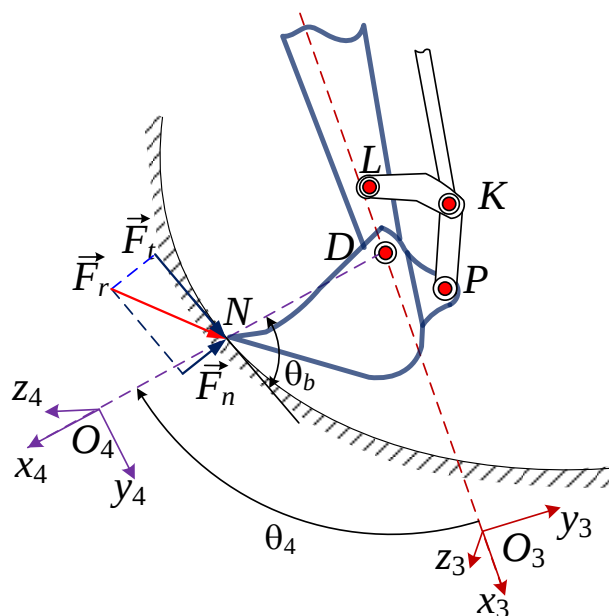


Рисунок 10 – Сили, що діють на ківш при взаємодії з ґрунтом

У рівнянні динаміки (14), моменти, що викликані дією сил опору, відображені вектором $\mathbf{M}_L$. Як показали дослідження, основний внесок у формування моментів опору для ОГЕ робить сила опору копанню. Для визначення сил, що діють на ланки гідроманіпулятора ОГЕ в процесі копання (рис. 10) використано формули М.Г. Домбровського, а вектор $\mathbf{F}_r$ результуючої сили, що діє на ківш під час копання в системі координат (x_4, y_4, z_4) визначено як:

$$\mathbf{F}_r = \begin{bmatrix} -F_t \cos \theta_b - F_n \sin \theta_b \\ F_t \sin \theta_b - F_n \cos \theta_b \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Тоді моменти сил опору для кожної з ланок:

$$\mathbf{M}_L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_2(F_t \sin(\theta_3 + \theta_4 - \theta_b) + F_n \cos(\theta_3 + \theta_4 - \theta_b)) \\ -l_3(F_t \sin(\theta_4 - \theta_b) + F_n \cos(\theta_4 - \theta_b)) \\ l_4(F_t \sin \theta_b - F_n \cos \theta_b) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Окрім точності відпрацювання бажаних траєкторій зубів ковша САКГМ ОГЕ повинна розрахувати такі закони зміни приєднаних координат гідроманіпулятора ОГЕ і такий спосіб їх реалізації (в тому числі з використанням суміщених рухів), щоб мінімізувати витрати енергії під час виконання робочого циклу. З цією метою досліджено динамічні властивості гідроманіпулятора ОГЕ під час його переміщення в просторі (рис. 11, 12). У загальному випадку діагональні елементи d_{ij} при $i = j$ матриці $\mathbf{D}(\theta)$ в (14) пов'язують момент, що діє в i -му зчленуванні, з прискоренням i -ї приєднаної координати, а недіагональні елементи d_{ij} при $i \neq j$ визначають моменти (або сили), що виникають в i -й ланці під впливом прискорення j -ї ланки. Оскільки матриця $\mathbf{D}(\theta)$ симетрична, то $d_{ij} = d_{ji}$.

Компоненти вектора $\mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ в (14) містять доданки, що пропорційні квадрату від кутових швидкостей ланок гідроманіпулятора ОГЕ, а також доданки, що пропорційні добутку цих швидкостей. Наявність доданків $c_{ijj}\dot{\theta}_j^2$ обумовлена дією на i -ту ланку відцентрової сили за рахунок руху j -ї ланки. Аналогічно, обертання j -ї ланки викликає момент, що виникає через відцентрову силу в i -ій ланці; доданки $c_{iii} = 0$. Доданки $c_{ijk}\dot{\theta}_j\dot{\theta}_k$, що пропорційні добутку приєднаних швидкостей, відображають дію коріолісових сил, що породжуються в i -ій ланці швидкостями j -ї і k -ї ланок.

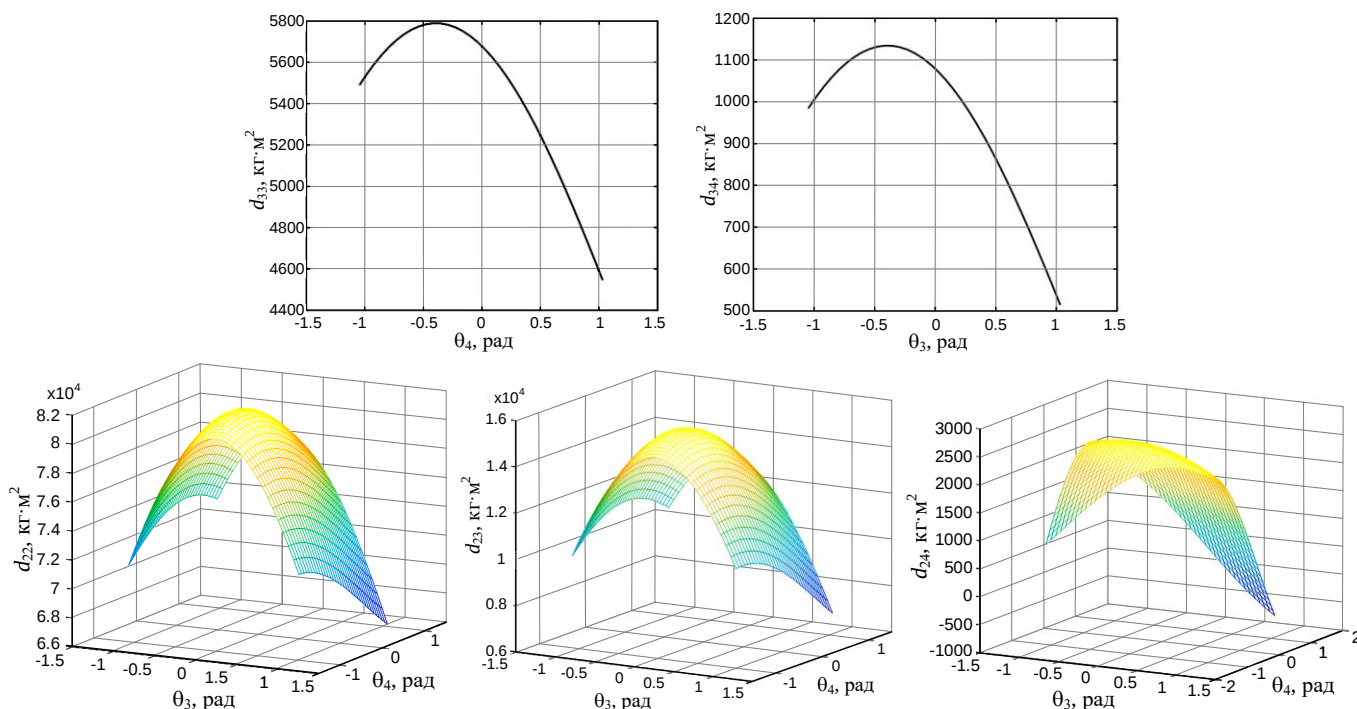


Рисунок 11 – Залежність елементів матриці $\mathbf{D}(\theta)$ від положення ланок гідроманіпулятора ОГЕ

Компоненти вектора $\mathbf{G}(\theta)$ характеризують сили, з якими наступні ланки гідроманіпулятора ОГЕ впливають на попередні ланки під дією сили тяжіння і

присутні навіть коли гідроманіпулятор знаходиться в спокої. Момент, що діє на стрілу, рукоять і ківш ОГЕ внаслідок сили тяжіння, істотно залежить від їх поточного положення у просторі (рис. 12). Таким чином, рівняння динаміки гідроманіпулятора ОГЕ характеризуються моментами інерції, що залежать від просторового положення гідроманіпулятора, моментами сил тяжіння, моментами, викликаними взаємним впливом ланок одна на одну, а також присутністю відцентрового і коріолісового ефектів.

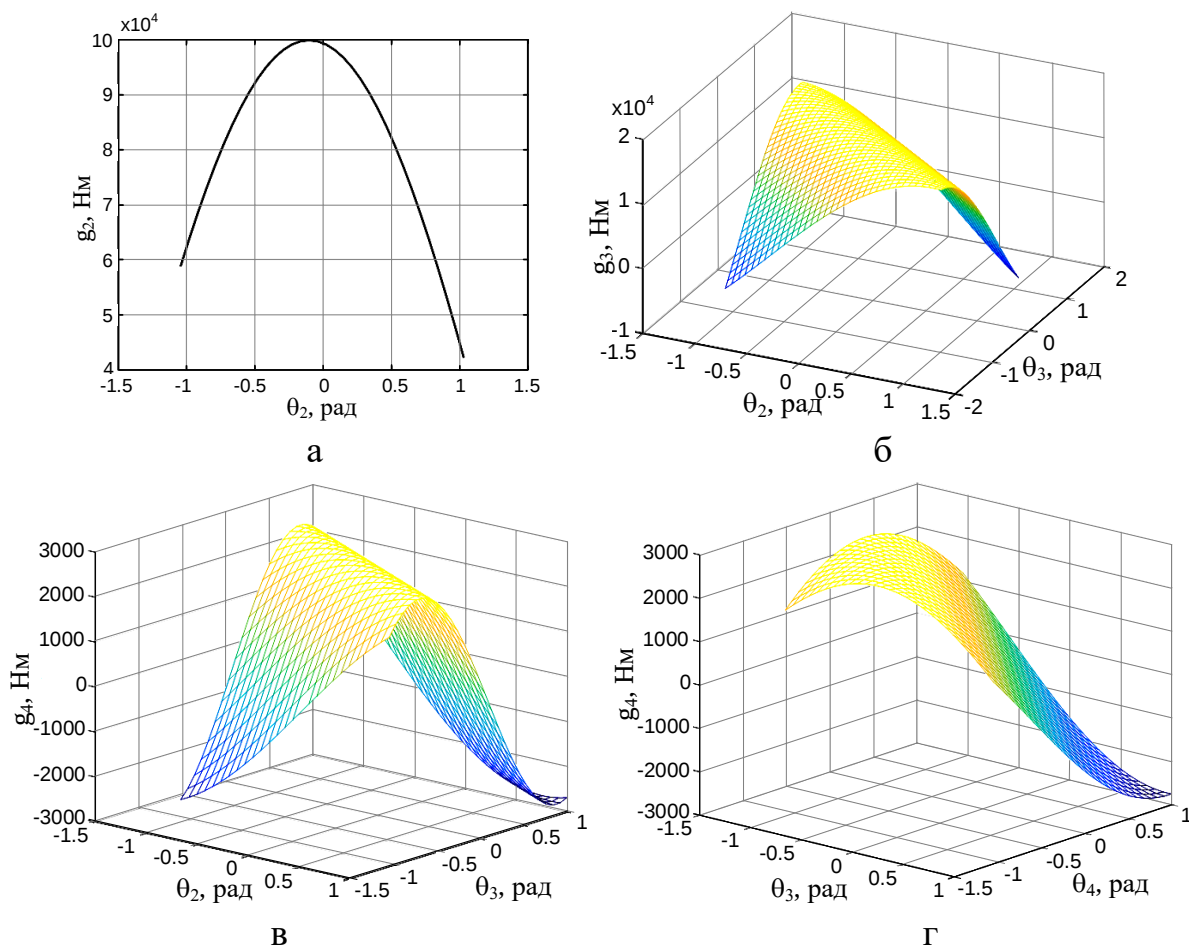


Рисунок 12 – Зміна гравітаційного моменту: а – на стрілі; б – на рукоятці; в – на ковші (ківш зафіксовано, повертаються стріла і рукоять); г – на ковші (стріла нерухома, повертаються рукоять і ківш)

Знання властивостей рівнянь динаміки дозволило синтезувати САКГМ ОГЕ, що забезпечує мінімізацію витрат енергії на виконання робочих операцій за високої їх якості. Зниження енергоємності робочого процесу ОГЕ досягнуто шляхом удосконалення запропонованого вище методу синтезу кінематичного керування гідроманіпулятором ОГЕ за рахунок додавання до критерію якості (11) енергетичної складової у вигляді роботи A , що здійснюються під час виконання робочого процесу; тоді у випадку гідроманіпулятора ОГЕ з оберतालними зчленуваннями:

$$J_k = \sum_{i=2}^n \gamma_i \cdot (\Delta\theta_i^k)^2 + \sum_{i=2}^n M_i \Delta\theta_i^k \rightarrow \min. \quad (18)$$

Мінімум критерію (18) спричиняють оптимальні значення елементів γ_i матриці (10), однак оскільки передбачити точні значення діючих на гідроманіпулятор ОГЕ

збурень неможливо, доцільно говорити не про оптимальні, а лише про найбільш раціональні значення. Їх пошук для ОГЕ 3-ї розмірної групи та траєкторії зубів (рис. 13) здійснено за допомогою генетичного алгоритму. Для скорочення часу оптимізації зменшено області допустимих значень коефіцієнтів γ_i за допомогою побудованих залежностей роботи A від коефіцієнтів γ_i (рис. 14). Крім того було накладено додаткові умови щодо постійності кута різання. В результаті оптимізації одержано раціональні закони зміни приєднаних координат гідроманіпулятора ОГЕ (рис. 15), на реалізацію яких витрачається робота $A = 69,126$ кДж проти $A = 89,438$ кДж при значеннях вагових коефіцієнтів, отриманих за методом, запропонованим у другому розділі, що також до 25% менше від значень A , які одержані під час синтезу законів $\theta(t)$ відомими в робототехніці методами.

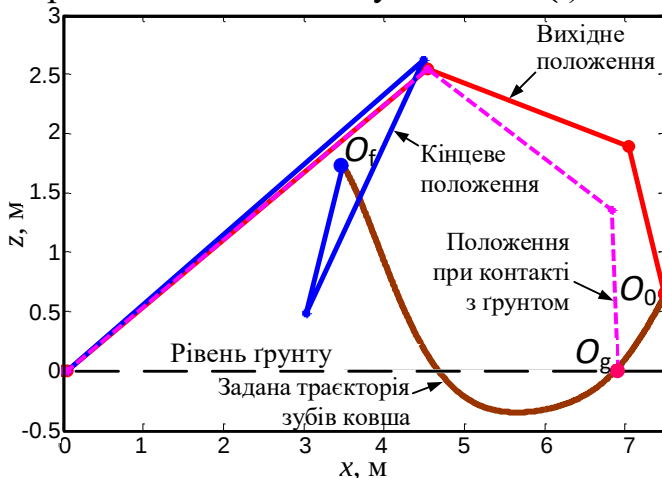


Рисунок 13 – Бажані траєкторія та конфігурації гідроманіпулятора ОГЕ

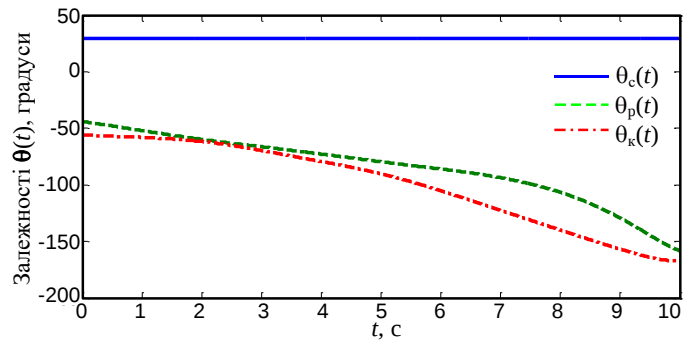


Рисунок 15 – Раціональні зміни кутів повороту ланок гідроманіпулятора

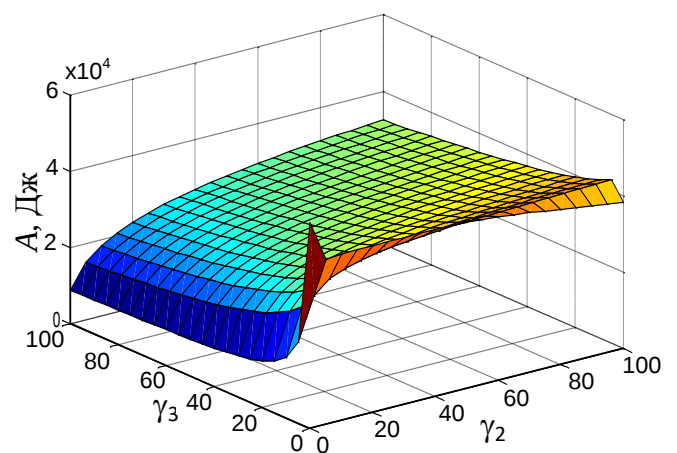


Рисунок 14 – Залежність роботи A від коефіцієнтів γ_2 та γ_3

Четвертий розділ роботи присвячено структурному синтезу САКГМ ОГЕ, що працює в умовах неповноти інформації щодо значень параметрів моделей та зовнішніх впливів, зокрема, завдяки невизначеності параметрів ґрунту.

Запропоновано структурну модель САКГМ ОГЕ (рис. 16) як складової ієрархічної структури АСКРП ОГЕ; вона має як вертикальні зв'язки зі стратегічним рівнем планування земляних робіт, та рівнем датчиків, виконавчих механізмів та засобів інтеграції, так і горизонтальні зв'язки в рамках тактичного рівня керування ОГЕ. Зокрема, на стратегічному рівні вирішується завдання планування траєкторій L_d РО в операційному просторі. Ця траєкторія є вихідними даними для вирішення завдань тактичного рівня. У свою чергу, на тактичному рівні вирішуються завдання кінематичного керування гідроманіпулятором ОГЕ для знаходження бажаних законів $\theta_d(t)$, $\dot{\theta}_d(t)$ та $\ddot{\theta}_d(t)$, керування рухом його ланок з метою визначення керуючих моментів M_d , які необхідні для забезпечення бажаного руху з урахуванням масово-інерційних параметрів і в припущенні про детерміновані умови (первинний

регулятор), а також корекції керуючих впливів $\mathbf{M}_{\alpha}$ для компенсації дії невизначених зовнішніх збурень $\mathbf{w}$ та шумів вимірювань $\mathbf{v}$ (робастний регулятор).

Виконано синтез первинного регулятора, у якості якого використано регулятор з обчислюваним моментом до якого для компенсації помилок керування, що викликані спрощенням моделі, введено динамічні фільтри:

$$\mathbf{M} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\theta})(\ddot{\mathbf{e}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{v}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) + \mathfrak{B}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{M}_L, \quad (19)$$

де $\mathbf{K}_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$ і $\mathbf{K}_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – симетричні позитивно визначені матриці коефіцієнтів зворотних зв'язків за швидкістю і положенням; $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$ – вектор, що створений шляхом фільтрації помилок керування за положенням $\mathbf{e}$ і за швидкістю $\dot{\mathbf{e}}$:

$$\mathbf{v} = -\frac{p}{p + \lambda} \dot{\mathbf{e}} - \frac{1}{p + \lambda} (\mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}), \quad (20)$$

де p – оператор диференціювання; λ – позитивна константа.

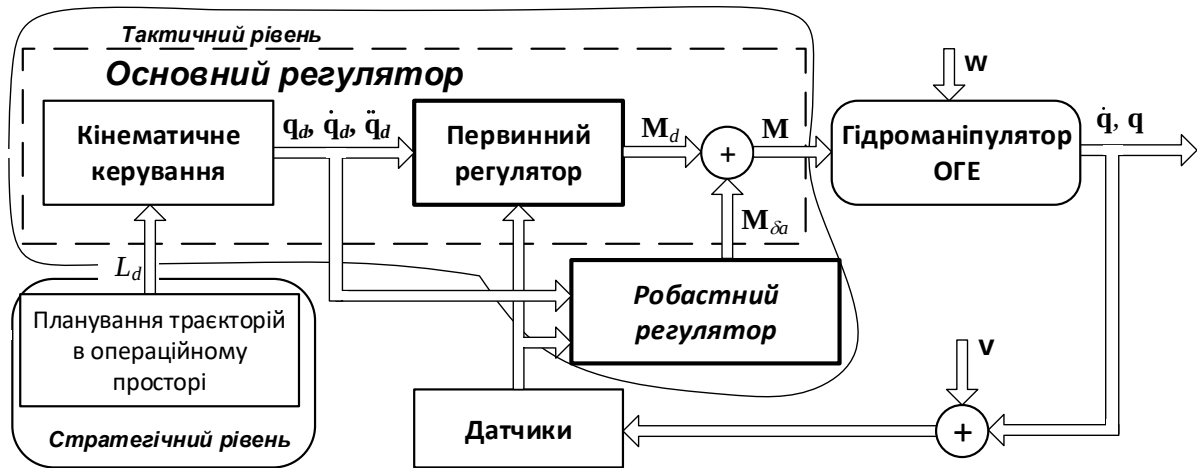


Рисунок 16 – Структура САКГМ ОГЕ

Аналіз роботи системи з запропонованим регулятором для вимірювання приєднаних координат з 1% шумом показує, що помилка керування досягає 0,03 рад за абсолютною величиною для стріли та 0,25 рад для рукояті (рис. 17), однак, система залишається стійкою, в той час як САКГМ ОГЕ з класичним регулятором з обчислюваним моментом втрачає стійкість. Тим не менш, необхідне використання додаткового контуру керування для компенсації дії факторів невизначеності. Ця невизначеність може бути пов'язана зі спрощеннями, прийнятими для побудови моделей гідроманіпулятора ОГЕ, неповнотою інформації про значення таких параметрів, як: маси і моменти інерції ланок, сили тертя у зчленуваннях, можливі зовнішні збурення і шуми вимірювань. Крім того, значення деяких параметрів – як наприклад, моменти інерції ланок і поточна маса ковша з ґрунтом – можуть значно змінюватися в процесі виконання робочого процесу. Зазначені невизначеності, як показали дослідження, істотно впливають на ефективність роботи системи керування (рис. 17), і навіть можуть стати причиною втрати системою стійкості.

Для забезпечення інваріантності САКГМ ОГЕ по відношенню до наявних факторів невизначеності розроблено ефективний і відносно простий з обчислювальної точки зору робастний регулятор.

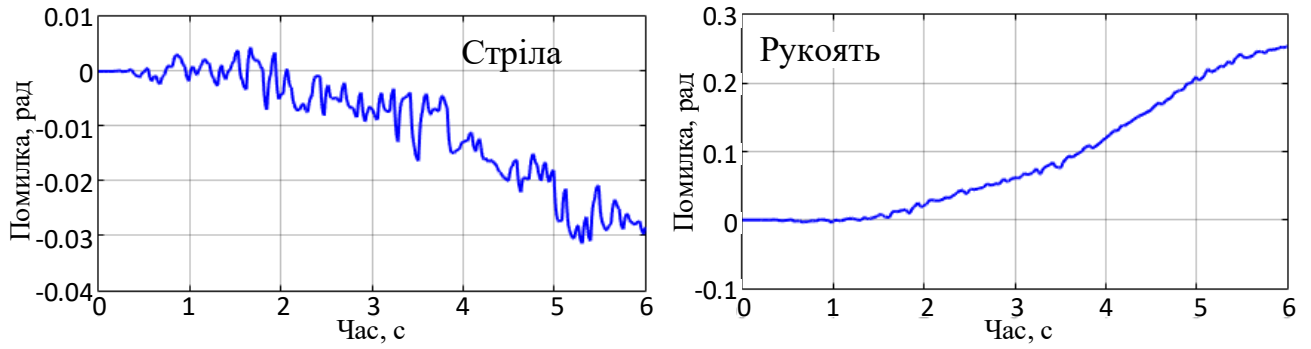


Рисунок 17 – Помилки відпрацювання бажаних кутів регулятора з компенсаторами при одинвідсотковому шумі вимірювань

Обравши як вектор стану $\mathbf{x}_k = [\mathbf{e}_k^T \quad \dot{\mathbf{e}}_k^T]^T$, одержано лінійне різницеве рівняння для помилки руху замкненої системи:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\{\boldsymbol{\eta}_k - \delta\mathbf{a}_k\} \quad (k=0,1,\dots,N-1), \quad (21)$$

де $\delta\mathbf{a}_k \in \mathbb{R}^n$ – додатковий керуючий вплив, що покликаний компенсувати дію невизначеності $\boldsymbol{\eta}_k$; $\mathbf{A}$ і $\mathbf{B}$ – блочні матриці з коефіцієнтами $\mathbf{K}_p$ і $\mathbf{K}_v$ з (19); k – моменти квантування.

В результаті вимірювання приєднаних координат формується вектор результатів вимірювань $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^p$, на основі якого розраховується керування:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k), \quad (k=1,2,\dots,N-1), \quad (22)$$

де $\mathbf{C}$ – вектор виходу; $\mathbf{v}_k$ – вектор шумів вимірювань; p – кількість вихідних координат системи, що вимірюються.

Рівняння (21) і (22) є удосконаленими рівняннями динаміки САКГМ ОГЕ (рис. 18) у просторі станів, що, на відміну від відомих, гарантує її асимптотичну стійкість та забезпечує квазіоптимальний (у сенсі обраного критерію якості) результат стеження за заданою траєкторією для будь-яких значень компонентів вектора невизначеностей $\boldsymbol{\eta}_k$, що належать відомій множині, тобто є робастною системою. На рис. 18 $\mathfrak{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) + \mathfrak{B}(\dot{\boldsymbol{\theta}})$, а символ « $\wedge$ » означає оцінку відповідного параметра.

Завданням регулятора є визначення керуючого впливу $\delta\mathbf{a}_k \equiv \mathbf{u}_k$, який забезпечує стійкість замкнутої системи (21) – (22) керування гідроманіпулятором ОГЕ і на кожному кроці квантування за часом k вирішує завдання:

$$J_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \min_{\mathbf{u}_k \in \Omega^u} \max_{\substack{\mathbf{w}_k \in \Omega^w, \\ \mathbf{v}_k \in \Omega^v}} \{V_k(\mathbf{x}_{k+1}) + \omega_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)\}, \quad (23)$$

де V_k – функція Ляпунова, яка дозволяє оцінювати якість руху гідроманіпулятора ОГЕ в момент часу $[k+1]$ за відсутності збурень; ω_k – задана функція, яка визначає витрати енергії на реалізацію керування і встановлює обмеження на їх числові значення. Визначення енергії, потрібної для руху маніпулятора ОГЕ, визначається роботою A .

Таким чином, метою керування є досягнення мінімуму значення функції $V_k(\mathbf{x}_{k+1})$ з мінімальними витратами енергії в умовах, коли послідовність збурень $\mathbf{w}_k$ і завад вимірювань $\mathbf{v}_k$ цілеспрямовано намагаються їх максимізувати.

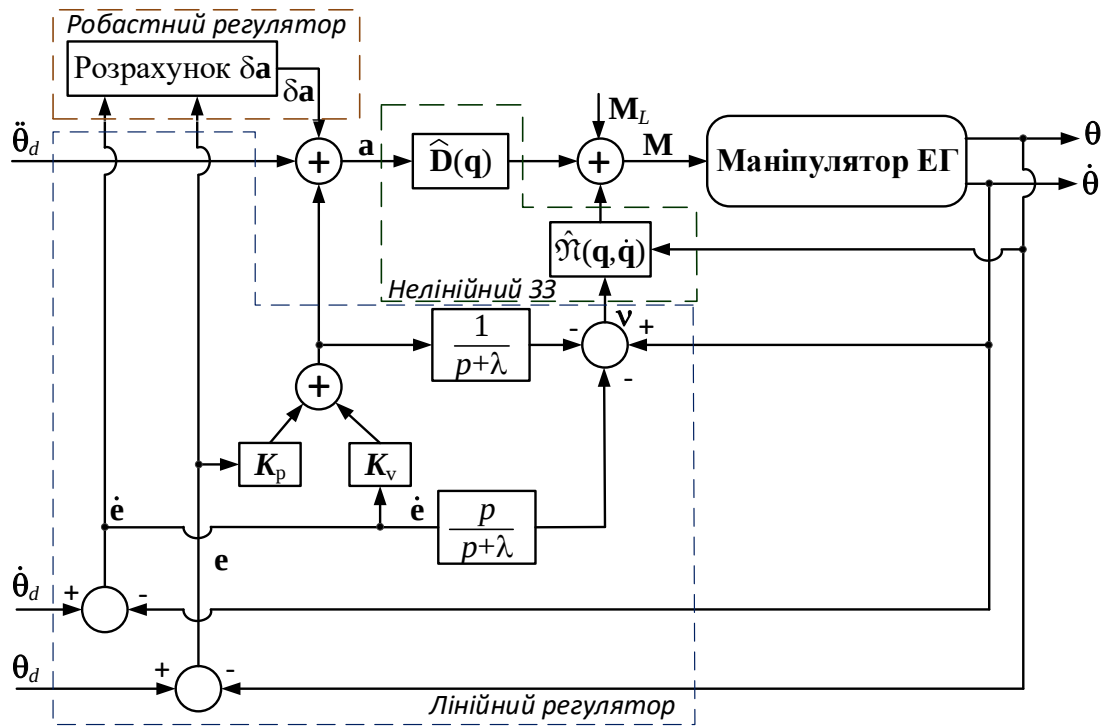


Рисунок 18 – Структурна схема робастної САКГМ ОГЕ

Коректна постановка задачі мінімізації критерію (23) вимагає знання значень координат стану $\mathbf{x}_k$ гідроманіпулятора ОГЕ в поточний момент квантування k . Для цього необхідно довизначити інформацію про невизначеності.

У **п'ятому розділі** наведено методологічні основи ідентифікації стану і керування гідроманіпулятором ОГЕ в умовах невизначеності. Вирішено завдання ідентифікації координат стану САКГМ ОГЕ в процесі виконання робочого циклу, що є необхідною умовою функціонування запропонованого регулятора.

На основі робастного підходу до керування складними технічними системами в умовах невизначеності вважається, що інформація про всі невизначеності в САКГМ ОГЕ обмежена лише їх належністю до відомих інформаційних множин Ω . Це дозволяє гарантувати прийнятну якість функціонування САКГМ ОГЕ при будь-якому поєднанні факторів невизначеності.

Обмеженість інформації про $\mathbf{w}_k$ та $\mathbf{v}_k$ у вигляді відповідних множин призводить до того, що в результаті вимірювання вихідних координат системи інформація про значення поточних координат стану гідроманіпулятора ОГЕ виходить у вигляді множинної оцінки $\mathbf{x}_k \in \Omega_k^r$. В розділі запропоновано методи ідентифікації стану САКГМ ОГЕ та розрахунку керуючого впливу, який пояснює рис. 19.

В процесі функціонування САКГМ ОГЕ множини можливих станів змінюють свою потужність і форму, а також переміщуються в просторі координат стану, тобто еволюціонують у часі. У зв'язку з цим, побудова множини станів САКГМ ОГЕ в довільний момент часу k є нетривіальною задачею. Для побудови множин Ω можливих станів САКГМ ОГЕ, що еволюціонують, розроблено два методи: на основі лінійних матричних нерівностей та за допомогою математичного апарату теорії R -функцій.

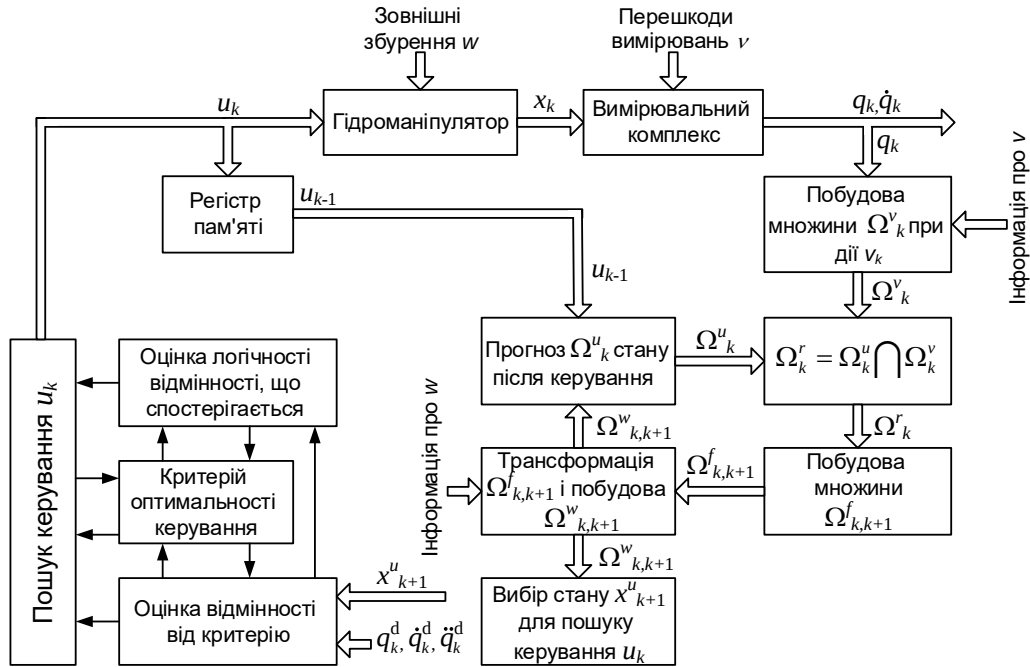


Рисунок 19 – Ідентифікація стану та керування гідроманіпулятором ОГЕ

У першому випадку кожна з множин Ω можливих станів описується за допомогою трьох матриць: матриці граней $\Gamma = [\gamma_{\ell,r}]$, де $\ell \in [1, M]$, $r \in [1, m+1]$, M – загальна кількість граней; матриці вершин $\mathcal{V} = [v_{i,j}]$, де $i \in [1, m]$, $j \in [1, n]$, n – загальне число вершин та матриці зв'язку $\mathcal{C} = [c_{\ell,j}]$, де $\ell \in [1, M]$, $j \in [1, n]$. В кожному ℓ -му рядку матриці Γ розташовано опис відповідної грані. На r -му місці рядка розміщено коефіцієнт $\gamma_{\ell,r}$ при координаті x_r , а на $(m+1)$ -му місці – вільний член у рівнянні грані. Дозволений ℓ -ю гранню півпростір виділяється нерівністю:

$$\sum_{r=1}^m \gamma_{\ell,r} \cdot x_r + \gamma_{\ell,m+1} \leq 0. \quad (24)$$

В j -му стовпці матриці $\mathcal{V}$ розташовані координати j -ї вершини, а в матриці $\mathcal{C}$ елементи $c_{\ell,j} = 1$, якщо j -та вершина належить ℓ -й грані; в іншому випадку $c_{\ell,j} = 0$. В процесі роботи САКГМ ОГЕ множини можливих станів еволюціонують, при цьому з'являються нові точки – кандидати у вершини, які перевіряються на відповідність нерівності (24): якщо нерівність виконується, то відповідна точка не є вершиною нової множини.

У зв'язку з обчислювальною складністю методу побудови множин можливих станів САКГМ ОГЕ за допомогою лінійних матричних нерівностей, запропоновано альтернативний метод на основі математичних засобів теорії R -функцій що дозволяє істотно зменшити кількість даних, необхідних для оцінювання стану, оскільки для цього достатньо інформації про координати вершин множин у вигляді відповідної матриці вершин $\mathcal{V}$. Якщо в k -й момент квантування за часом можливі стани системи формують множину Ω_k , яка обмежена сукупністю відповідних граничних елементів $\partial\Omega_k$, тоді опис даної множини здійснюється за допомогою R -функції $\varphi(x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k})$, яка володіє наступними властивостями:

$$\begin{aligned}
\varphi(x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}) &> 0, \text{ якщо } (x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}) \in \Omega_k, \\
\varphi(x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}) &= 0, \text{ якщо } (x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}) \in \partial\Omega_k, \\
\varphi(x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}) &< 0, \text{ якщо } (x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}) \notin \Omega_k \cup \partial\Omega_k.
\end{aligned} \tag{25}$$

R -функції, які описують множини Ω_k^v , Ω_k^u , Ω_k^r , $\Omega_{k,k+1}^f$ і $\Omega_{k,k+1}^w$ (рис. 20) можливих станів САКГМ ОГЕ, позначено, відповідно, через $\varphi^v(x_k)$, $\varphi^u(x_k)$, $\varphi^r(x_k)$, $\varphi^f(x_k)$ і $\varphi^w(x_k)$. Наприклад, множина Ω_k^r описується R -функцією з використанням R -операції кон'юнкції (рис. 20):

$$\varphi^r(\mathbf{x}_k) = \varphi^u(\mathbf{x}_k) \underset{R}{\wedge} \varphi^w(\mathbf{x}_k), \tag{26}$$

де $\underset{R}{\wedge}$ – R -операція кон'юнкції:

$$\varphi^u \underset{R}{\wedge} \varphi^w = \varphi^u + \varphi^w - \sqrt{(\varphi^u)^2 + (\varphi^w)^2} \tag{27}$$

Істотною проблемою під час побудови регулятора для САКГМ ОГЕ є необмежене збільшення кількості вершин і граней множин Ω_k при $k \rightarrow \infty$. В роботі встановлено, що орієнтація граней граничної множини Ω_k^r практично співпадає з власним вектором матриці $\mathbf{A}$ в (21). Це означає, що бортовій ЕОМ необхідно зберігати у своїй пам'яті кінцеву кількість вершин множин, що визначають можливі стани системи.

Для розрахунку керуючого впливу $\mathbf{u}_k$ з прогнозованої множини можливих станів $\Omega_{k,k+1}^w$ САКГМ ОГЕ (рис. 19) визначається така точкова оцінка $\mathbf{x}_{k+1}^u \in \Omega_{k,k+1}^w$ стану САКГМ ОГЕ, яка забезпечує максимум заданого критерію якості (26). Однак, чим менше об'єм вихідної інформації про діючі на систему невизначені фактори, тим більші потужності мають відповідні інформаційні множини $\Omega_{k,k+1}^w$, що потребує більших зусиль для визначення керування $\mathbf{u}_k$. У зв'язку з цим запропоновано процедуру обґрунтованого зменшення потужності множини $\Omega_{k,k+1}^w$, тобто побудови множини $\Omega_{k,k+1}^* \subset \Omega_{k,k+1}^w$ з метою пошуку найбільш вірогідного значення $\mathbf{x}_{k+1}^u \in \Omega_{k,k+1}^*$. Процедура основана на побудові нормальної в області $\Omega_{k,k+1}^w$ функції $\varphi^*(\mathbf{x}_k)$ шляхом встановлення положення певної точки множини по відношенню до найближчої (у напрямку до нормалі) до неї точки границі $\partial\Omega_{k,k+1}^w$. Обчислювальні експерименти показали ефективність використання множини $\Omega_{k,k+1}^*$ найбільш імовірних значень координат стану САКГМ ОГЕ, при цьому особливий інтерес викликає випадок, коли на систему діють можливі

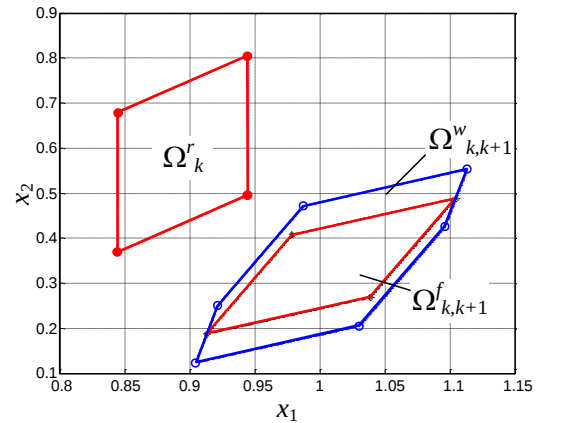


Рисунок 20 – Множини, що побудовані за допомогою R -функцій

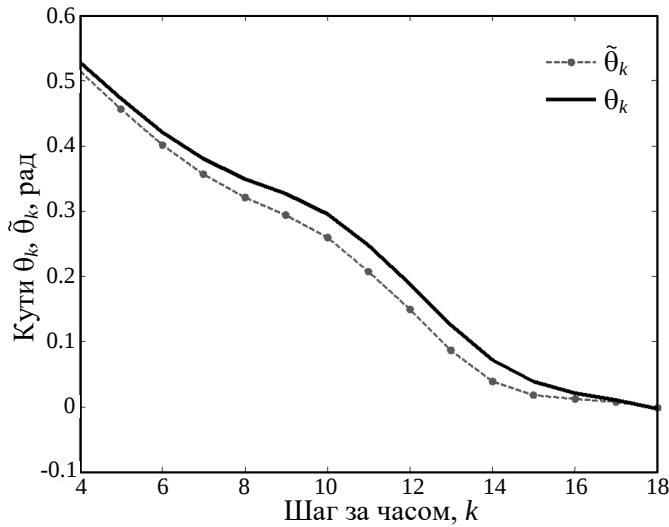


Рисунок 21 – Порівняння роботи САКМЕГ з (θ_k) та без $(\tilde{\theta}_k)$ використання множини $\Omega_{k,k+1}^*$

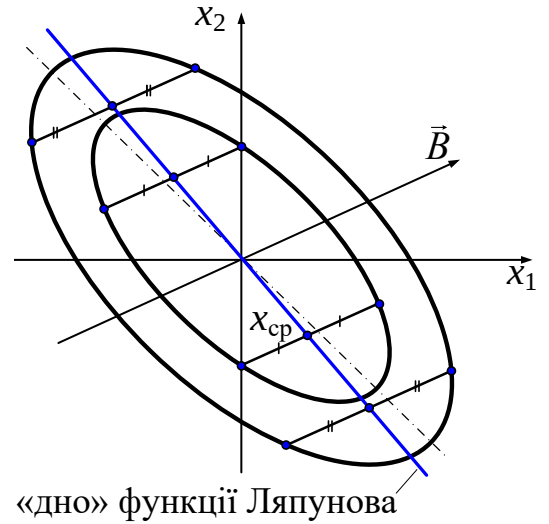


Рисунок 22 – «Дно» функції Ляпунова

збурення (моменти квантування $k = \overline{5,9}$ на рис. 21). У цьому випадку істинне значення стану системи не належить інформаційній множині $\Omega_{k,k+1}^*$. З рис. 21 добре видно, що кут повороту θ_k ланки гідроманіпулятора ОГЕ під час використання множини $\Omega_{k,k+1}^*$ відрізняється від кута $\tilde{\theta}_k$, отриманого під час використання множини $\Omega_{k,k+1}^w$, однак це відхилення досить швидко ліквідується.

Використання для визначення керуючих впливів $\mathbf{u}_k$ відомих пошукових методів у загальному випадку не гарантує знаходження екстремуму критерію (23) за кінцеву кількість ітерацій, через це розроблено метод побудови раціонального керування $\mathbf{u}_k$, що заснований на аналізі взаємної орієнтації множини можливих станів САКГМ ОГЕ і поверхонь однакового рівня функції Ляпунова.

Дослідження властивостей функції Ляпунова під час руху гідроманіпулятора ОГЕ під дією зовнішніх впливів дозволило визначити нову її властивість, а саме наявність «дна», під яким розуміється пряма, що ділить навпіл відрізки прямих, паралельних вектору $\mathbf{B}$ у рівнянні (21) стану САКГМ ОГЕ, які розміщені всередині границі $V(\mathbf{x}) = \text{const}$ при довільній $\text{const} > 0$ (рис. 22).

$$(\mathbf{PB})^T \mathbf{x} = 0, \quad (28)$$

де $\mathbf{P}$ – симетрична позитивно визначена матриця, що знаходиться з розв'язку рівняння Ріккаті. Зазначимо, що «дно» в загальному випадку не співпадає з геометричною віссю поверхні однакового рівня.

Інтерес до існування дна функції Ляпунова пов'язаний з тим, що невизначені збурення $\mathbf{w}_k$ «розмивають» по каналу керування $\mathbf{u}_k$ результат дії $\mathbf{u}_k$ саме в напрямку, що задається $\mathbf{B}$ у рівнянні (21). Таким чином, визначено такі властивості функції Ляпунова: а) для довільних зображувальних точок, що характеризують стан $\mathbf{x}_k$ системи, які паралельні вектору $\mathbf{B}$ у рівнянні (21) та рівновіддалені від дна функції Ляпунова, швидкість зміни значення функції Ляпунова однакова; б) для всіх станів $\mathbf{x}_k$, вільний рух з яких спричиняє стани $\mathbf{x}_{k+1}^c$, зображувальні точки яких розташовані на одній прямій, що паралельна «дну» функції Ляпунова, керування $\mathbf{u}_k$ буде однаковим:

$$\mathbf{u}_k = \frac{1}{\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}} \cdot \mathbf{z}, \quad (29)$$

де константа $\mathbf{z}$ визначає найкоротшу відстань від точки $\mathbf{x}_k$ до дна.

З урахуванням вказаних властивостей ідентифікація стану САКГМ ОГЕ (рис. 19) та визначення керування $\mathbf{u}_k$ здійснюється наступним чином.

1. У довільний момент k в результаті вимірювання (22) вихідних координат визначається стан $\mathbf{x}_k$ САКГМ ОГЕ. Оскільки вимірювання здійснюється з перешкодою $\mathbf{v}_k$, а на систему діють збурення $\mathbf{w}_k$, відносно яких відома лише їх приналежність інформаційним множинам, то дійсний стан об'єкта буде належати деякій множині Ω_k^r .

2. Здійснюється відображення множини Ω_k^r на простір станів $\mathbf{x}_{k+1}$ за допомогою матриці $\mathbf{A}$ об'єкта в (21). Отримана множина $\Omega_{k,k+1}^f$ являє собою прогноз можливого стану САКГМ ОГЕ в момент $[k+1]$ під час вільного руху.

3. Шляхом «розмивання» множини $\Omega_{k,k+1}^f$ невизначеним збуренням $\mathbf{w}_{k,k+1}$ формується множина $\Omega_{k,k+1}^w$ можливих станів в $[k+1]$ -й момент під час дії перешкод вимірювань $\mathbf{v}_k$ і зовнішніх збурень $\mathbf{w}_{k,k+1}$.

4. Знаходяться значення функції Ляпунова в усіх вершинах множини $\Omega_{k,k+1}^w$. Визначається вершина з максимальним значенням $V_{\max}$ функції Ляпунова. Оскільки відображення проводиться у вільному русі (при $\mathbf{u}_k = 0$), то керування $\mathbf{u}_k \neq 0$ має забезпечити $\omega_k \leq V_{\max}$.

5. Визначається аналітичний опис функції питомих втрат ω в (23) для кожної i -ї вершини під час руху множини за вектором $\mathbf{B}$. Для кожної i -ї вершини знаходяться координати точки $\mathbf{x}_i^0$, у якій $\omega_{i,k}$ досягає мінімуму.

6. Для кожної i -ї вершини визначається керування $u_{i,k}$, що переміщує її в точку $\mathbf{x}_{i,k+1}^0$.

7. Для кожної i -ї вершини визначається керування $u_{i,\max}$, що переміщує її в точку, де досягається загальний по всіх вершинах максимум $V_{\max}$ функції Ляпунова.

8. Керування $\mathbf{u}_k$ має знак, що співпадає зі знаком керування у вершині, де досягається $V_{\max}$. Рух частини вершин під впливом $\mathbf{u}_k$ буде здійснюватися в напрямку зменшення V_i , а рух іншої частини – в бік збільшення V_i . При цьому можливі дві наступні ситуації:

а) всі $u_{i,k}$ мають однакові знаки (множина можливих станів знаходиться по один бік від дна функції Ляпунова). В цьому випадку діапазон пошуку визначається співвідношенням:

$$\min_i |u_{i,k \max}| \geq |u_k| \geq \min_i |u_{i,k}|, \quad (30)$$

б) $u_{i,\max k}$ мають різні знаки. В цьому випадку діапазон пошуку $\mathbf{u}_k$ визначається співвідношенням:

$$\min_i |u_{i,\max k}| \geq |u_k| > 0. \quad (31)$$

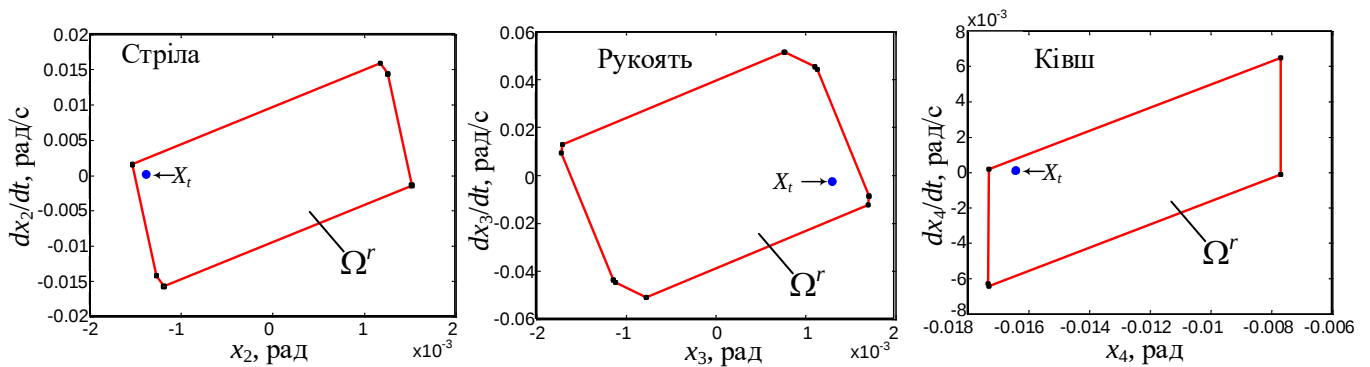


Рисунок 23 – Прогнозовані множини Ω^r та істинні стани X_t САКГМ

Наведені співвідношення дозволили встановити діапазон пошуку u_k і знайти його за один цикл, тоді як метод рівномірного пошуку давав від 4-х до 69-ти циклів (під час кроку пошуку 0,1), а метод золотого перетину – до 15-ти циклів. Зазначимо також, що керування u , розраховане за допомогою запропонованого методу, відрізняється від керування, розрахованого методами рівномірного пошуку і золотого перетину, не більше ніж на 0,01%.

Ефективність одержаних у роботі результатів перевірено шляхом проведення машинного експерименту з керування гідроманіпулятором ОГЕ 3-ї розмірної групи. Під час керування вимірювалися тільки приєднані кути θ_i , $i = \overline{2,4}$, їх швидкості розраховувалися шляхом інтегрування. Стосовно невизначених факторів САКГМ ОГЕ була відома наступна інформація. Як ґрунт розглядався суглинок, щільність якого довільним шляхом варіювалася у діапазоні $1600 \leq \rho_s \leq 1900$ кг/м³. Сили опору копанню ґрунту розраховувалися за формулами М.Г. Домбровського: $F_n = k_c b h$, $F_t = \psi F_n$ де значення коефіцієнта k_c вважалось невідомим, крім факту його належності множині $117,6 \leq k_c \leq 245$ кН/м², $\psi = 0,25$. Шум вимірювання належав інтервалу $|v_i| \leq 0,5$ градусів і підпорядковувався рівномірному закону розподілення. Під час моделювання також бралася до уваги зміна маси ковша. Для побудови множин можливих станів використано математичний апарат R-функцій.

На рис. 23 представлені прогнозовані множини Ω^r можливих станів САКГМ ОГЕ, а також істинні стани X_t системи в момент часу $t = 4$ с, якому відповідає максимальне значення помилки копання. Помилка відпрацювання розрахованих законів зміни приєднаних координат менш ніж 0,1, 0,2 та 1 градус для стріли, рукояті та ковша (рис. 24), що відповідає помилці зведення земляної споруди менш ніж 1,2 см або 3,5% (рис. 25). Таким чином, результати моделювання показують, що розроблена САКГМ забезпечує високу точність виконання робочого процесу ОГЕ в умовах невизначеності.

У шостому розділі проведено експериментальні дослідження робочого процесу ОГЕ Борекс-2201 (рис. 26) з ручним керуванням з метою збору даних про параметри робочого процесу в динаміці для ідентифікації гідроманіпулятора ОГЕ і перевірки адекватності математичних моделей динаміки гідроманіпулятора ОГЕ, а також дослідження ефективності копання оператором. Керування ОГЕ здійснювалося оператором із семирічним стажем роботи.

Для реєстрації даних про динамічні параметри кожної з ланок гідроманіпулятора ОГЕ розроблено вимірювальний комплекс, що складається з

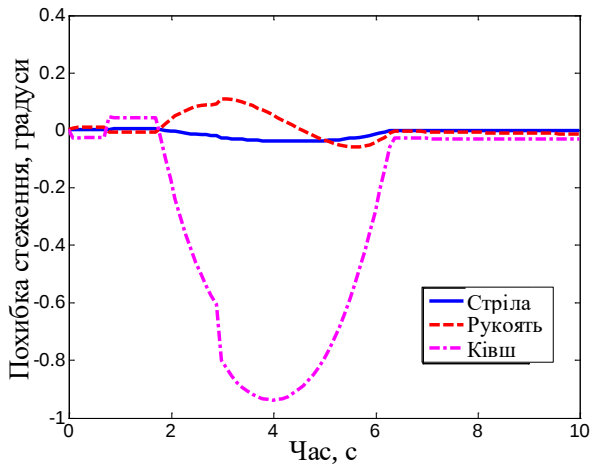


Рисунок 24 – Помилки відпрацювання бажаних кутів

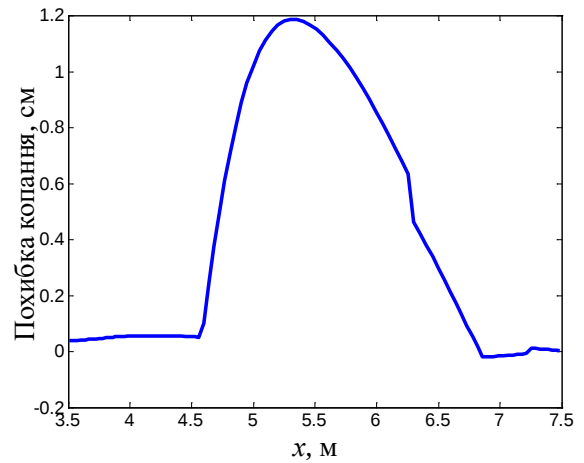


Рисунок 25 – Помилка копання

датчика GY-521, який має у своєму складі трьохкоординатні гіроскоп і акселерометр; мікропроцесорні пристрої (МПП) для попередньої обробки показань; віддалену ПЕОМ для збереження та подальшого аналізу результатів і радіопередавальний модуль SE08R01 для бездротового обміну даними МПП / ПЕОМ.

У результаті дослідження холостих рухів гідроманіпулятора ОГЕ встановлено, що його рух здійснюється з достатньо великими кутовими швидкостями та лінійними прискореннями (до 60 градусів/с та понад 2 м/с²). Це призводить до перевантаження у конструктивних вузлах гідроманіпулятора ОГЕ та його гідроприводі. Прагнення оператора знизити час виконання робочого циклу призводить до того, що він залишає занадто мало часу на гальмування, що спричиняє коливання РО з великими амплітудами, а під час зіткнення РО з ґрунтом – ударні навантаження на ланки гідроманіпулятора і гідропривід. Експериментальні дослідження показали, що навіть під час рухів на холостому ході кромка ковша не повторює свою попередню траєкторію, розбіжність може досягати 0,1 м, що свідчить про потенційно невисоку точність виконання земляних робіт та, зокрема, профілювальних.

До переліку завдань проведення експерименту належали оцінка точності позиціонування кромки ковша оператором і оцінка ефективності обраної траєкторії руху в декартовій системі координат. Фіксувалася точність позиціонування різальної кромки і кут входу ковша в ґрунт. Встановлено, що оператор позиціонує ківш з достатньо високою точністю, яка підпорядковується нормальному закону розподілу з математичним очікуванням 25,4 мм і 7,3 мм за довжиною та шириною і середньоквадратичними очікуваннями 6,0 та 2,6 мм, відповідно. Проте, після позиціонування ковша оператор виконує корекцію його положення для встановлення раціонального кута різання. Характерна траєкторія кромки ковша за ручного позиціонування наведена на рис. 27.

З метою розширення області застосування отриманих у роботі результатів, а також перевірки



Рисунок 26 – Розташування датчиків на маніпуляторі ОГЕ

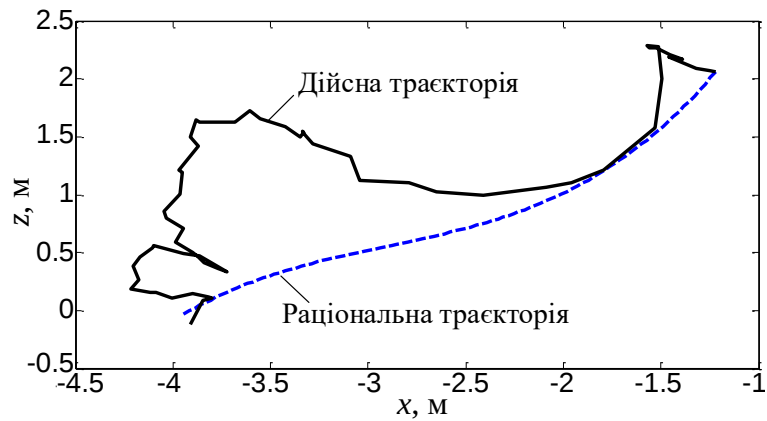


Рисунок 27 – Траєкторія зубів ковша під час керування оператором і раціональна траєкторія

їх ефективності запропонований у розділі 2 метод визначення законів зміни приєднаних координат поширено на синтез траєкторій руху гідроманіпулятора ОГЕ в операційному просторі (рис. 27). Розраховані траєкторії дозволяють знизити витрати енергії на здійснення руху маніпулятора до 58,8%, зменшити тривалість операції позиціонування до 33%. Крім того, позиціонування ковша в точку копання проводиться з урахуванням раціонального кута різання.

Дослідження процесу копання виконувалося на прикладі розробки траншей з наступними параметрами: довжина 3500 мм, глибина 1000 мм, ширина 1200 мм. Краї майбутньої траншеї позначалися маркерами. Глибину траншеї оператор оцінював візуально. В ході проведення експерименту визначалися: траєкторія руху різальної кромки ковша; глибина копання за прохід; точність копання траншеї. Дослідження проводилися для комбінованого типу ґрунту: I - III категорій (число ударів ударника ДорНДІ в різних місцях від 3 до 15), переважно пісок і суглинок з включеннями гравію. Варіювання ґрунтових умов у широких межах дозволило більш глибоко вивчити процеси, що відбуваються під час взаємодії РО з ґрунтом, і наблизити умови проведення експерименту до реальних польових умов.

Тривалість одного копання визначалася від початку руху рукояті або ковша до моменту, з якого починається поворот РО на розвантаження; операція з розвантаження ґрунту у відвал не враховувалася. Типові залежності абсолютних кутів α повороту ланок гідроманіпулятора ОГЕ та відповідна траєкторія кромки ковша наведені на рис. 28. Траєкторія руху зубів ковша (рис. 28, б) розбита на ділянки: 1,3 – копання із суміщенням рухів рукояті і ковша, 2,4 – копання ковшем, 5 – підйом завантаженого ковша. Вся 3-тя ділянка і частина 4-ї ділянки (приблизно з 2-ї до 5,75-ї секунди копання) супроводжувалися нахилом екскаватора відносно лінії горизонту (рис. 28, а) і його переміщенням на 0,28 м. Це означає, що кут між дотичною до траєкторії і передньою гранню різальної кромки під час повороту рукояті стає близьким до нуля, відбувається вдавнення днища ковша в ґрунт, а тиск у гідроприводі різко збільшується.

Після завершення копання конфігурації одержаних траншей значно відрізнялися від заданої: краї траншеї мають заокруглення радіусом до 0,62 м (на відміну від необхідної прямокутної форми), мінімальна абсолютна помилка копання за глибиною складає 0,117 м (по центру траншеї), а мінімальна абсолютна помилка за шириною – 42 мм та 16 мм біля дна траншеї.

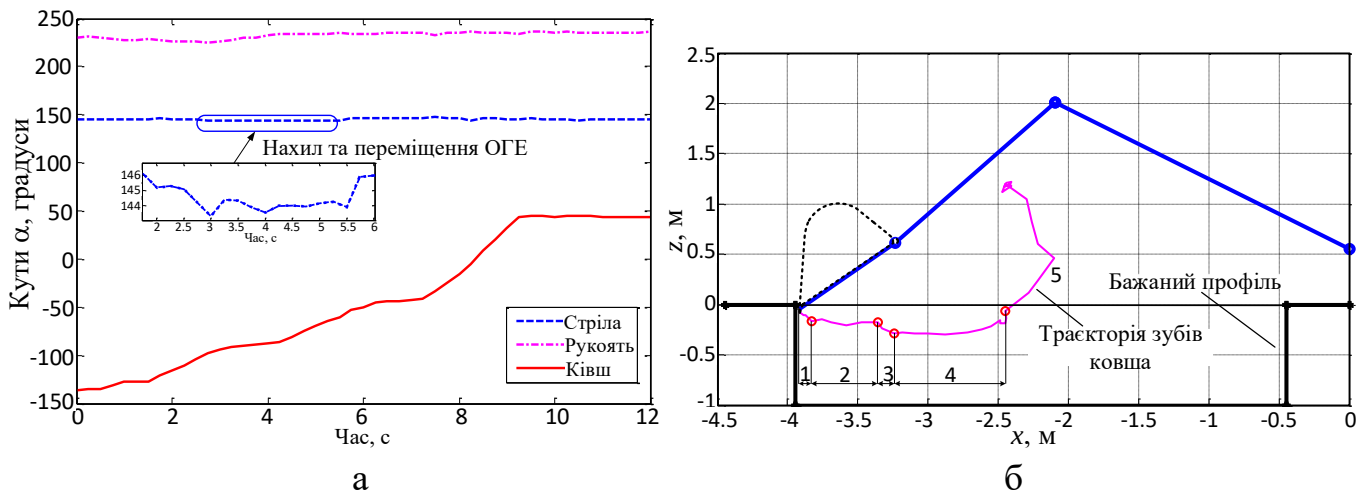


Рисунок 28 – Кути повороту ланок гідроманіпулятора ОГЕ (а) та відповідна траєкторія зубів ковша (б)

Аналогічні експериментальні дослідження проводилися і для іншої машини з робочим обладнанням маніпуляторного типу, а саме автогідропіднімачем. Порівняння експериментальних досліджень з результатами моделювання показує ефективність використання САКГМ і для цих машин. Зокрема, за рахунок суміщення рухів ланок значно (до 50 %) скорочується час операції переміщення.

Сьомий розділ присвячено визначенню ефективності одержаних у роботі рішень. З цією метою вони реалізовані в системі автоматичного керування маніпулятором станда екскаватора EO2621A (рис. 29), морально і фізично застаріла керуюча апаратура якого була замінена новою. Вона являє собою сукупність вимірювального і керуючого обладнання, а також програмного забезпечення, в якому реалізовані основні результати дослідження. Принцип роботи системи полягає в керуванні маніпулятором екскаватора у ручному і автоматичному режимах з контролем і коригуванням виконання робіт за допомогою аналізу даних, отриманих від мережі датчиків. Система включає в себе: ПЕОМ, блок керування на основі МПП; симісторно-релейний силовий блок з фазовим керуванням; органи керування (виконавчі приводи); мережу потенціометричних датчиків; для переходу на ручне керування маніпулятором передбачено під'єднання джойстиків.

Досліджуючи роботу станду встановлено, що стандартний протокол обміну МПП / датчики / ПЕОМ має недоліки, пов'язані з непостійністю періоду часу між отриманням вибірки даних, неможливістю паралельного отримання даних про стан САКГМ ОГЕ, а також нераціональним використанням ресурсів ПЕОМ. Для усунення вказаних недоліків удосконалено протокол обміну даними між ПЕОМ і МПП, який, на відміну від наявного, забезпечує більш високу якість керування такими динамічними багатовимірними процесами як робочий процес ОГЕ за рахунок зменшення запізнювання у визначенні координат стану маніпулятора ОГЕ під час послідовного звернення до аналогових портів МПП.

Суть удосконалення полягає в тому, що під час запиту ПЕОМ на читання даних від одного датчика з відповідного порту МПП виконується аналогово-цифрове перетворення даних з усіх датчиків з подальшою послідовною передачею отриманих даних до ПЕОМ, що зменшує область невизначеності стану САКГМ ОГЕ; функції попередньої обробки показань датчиків виконуються засобами МПП,

що підвищує гнучкість САКГМ ОГЕ за рахунок можливості зміни апаратного забезпечення без зміни програмного коду і протоколу обміну з ПЕОМ.



Рисунок 29 – Стенд одноківшевого екскаватора ЕО2621А: 1 – стріла; 2 – рукоять; 3 – ківш; 4, 5, 6 – приводи стріли, рукояті і ковша, відповідно; 7, 8, 9 – потенціометричні датчики кутів повороту стріли, рукояті і ковша; 10 – пульт релейно-контакторного керування екскаваторним маніпулятором; 11 – важелі керування маніпулятором; 12 – силовий блок керування екскаваторним маніпулятором; 13 – контейнер з ґрунтом

Результати випробувань моделі САКГМ (рис. 30) в умовах невизначеності щодо властивостей ґрунту та значень масово-інерційних параметрів маніпулятора екскаватора показують її високу ефективність, а, отже, й ефективність отриманих у даному дослідженні результатів. Зокрема, середньоквадратичні значення помилок відпрацювання кутів повороту ланок маніпулятора екскаватора для кожного моменту дискретизації за часом (рис. 30 а) не перевищують 0,5 градусів. Це призводить до того, що максимальне значення помилки відпрацювання траєкторії руху ковша не перевищує 1,5 см, що добре узгоджується з результатами моделювання (до 1,2 см) і відповідає заявленій точності наявних світових розробок (1–2 см), проте, на відміну від існуючих, виконує робочий процес в автоматичному режимі.

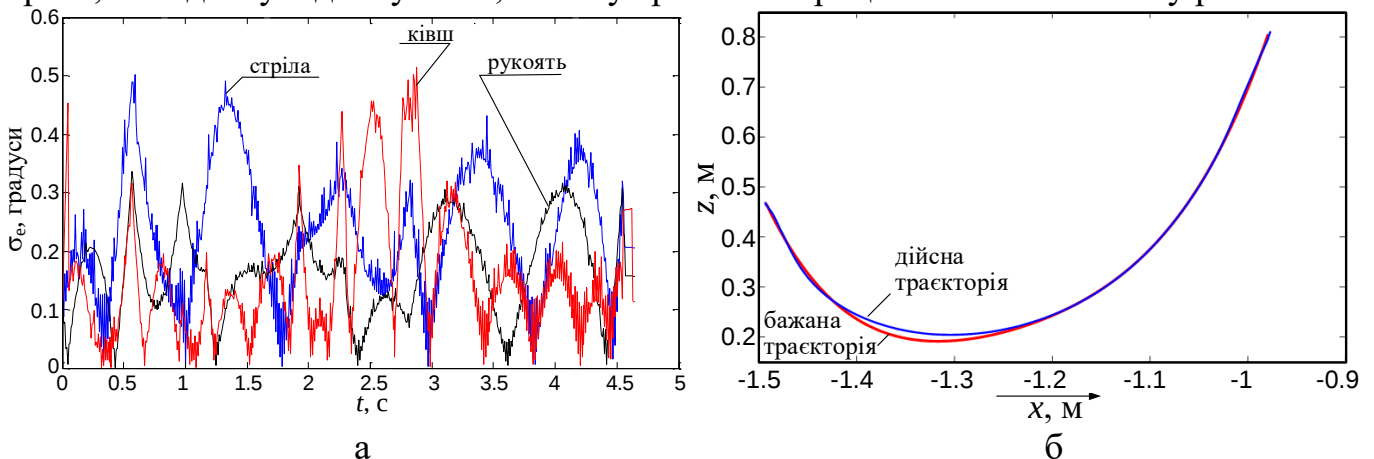


Рисунок 30 – Результати дослідження роботи стенда з моделлю САКГМ ОГЕ: а – середньоквадратичне відхилення вимірених значень приєднаних координат від бажаних; б – проходження ковшем заданої траєкторії

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідницькою роботою, у якій вирішено актуальну науково-прикладну проблему підвищення точності розробки ґрунту гідроманіпулятором ОґЕ та зменшення енергетичних витрат на здійснення всього робочого процесу ОґЕ шляхом автоматизації керування його гідроманіпулятором.

1. Поведено аналіз наявних підходів щодо підвищення ефективності виконання робочого процесу ОґЕ в результаті якого встановлено, що сучасна тенденція вирішення зазначеної проблеми пов'язана зі створенням та впровадженням мехатронних систем для автоматизації керування робочим обладнанням. При цьому доцільне розглядання робочого обладнання ОґЕ як маніпулятора промислового робота з гідравлічним приводом.

Виявлена відсутність єдиного підходу до створення вказаних мехатронних систем, практично не розглядаються питання раціоналізації рухів гідроманіпулятора ОґЕ під час його автоматичного керування, мінімізації енергетичних витрат на їх здійснення.

Установлено, що системи автоматичного керування гідроманіпуляторами ОґЕ розробляються і функціонують в умовах невизначеності як щодо параметрів самого гідроманіпулятора і параметрів робочого процесу, що ним виконується, так і щодо діючих на гідроманіпулятор збурень.

Визначено передумови для розробки методологічних основ автоматизації керування гідроманіпулятором ОґЕ для забезпечення високої точності виконання процесу копання та енергоефективності виконання всього робочого процесу в умовах невизначеності.

2. В рамках розвитку методологічних основ автоматизації виконання земляних робіт запропоновано і обґрунтовано концепцію автоматизованого керування робочим процесом ОґЕ на основі якої:

- розроблено ієрархічну структуру автоматизованої системи керування робочим процесом ОґЕ, що дозволила одержати єдине комплексне уявлення про систему і є основою для декомпозиції задачі синтезу цієї системи;

- побудовано функціональну модель автоматизованої системи керування робочим процесом ОґЕ, визначено функціональні структури підсистем та місця розташування їх пристроїв, а також виділено найменш розроблені її структурні елементи. Для рівня керування екскаватором ними є підсистеми планування рухів гідроманіпулятора ОґЕ та реалізації цих рухів в умовах невизначеності. Вказані завдання вирішуються системою автоматичного керування гідроманіпулятором ОґЕ.

3. Уточнені та досліджені математичні моделі руху гідроманіпулятора ОґЕ як нелінійної нестационарної системи з метою вирішення завдань аналізу та синтезу системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОґЕ як однієї з ключових підсистем автоматизованої системи керування робочим процесом ОґЕ, в результаті чого:

- установлено, що гідроманіпулятор ОґЕ з класичною конфігурацією у вигляді системи «стріла - рукоять - ківш» з обертовими рухами при куті повороту рукояті, рівному нулю, втрачає один степінь вільності, що означає неможливість отримання однозначного зв'язку між лінійними і кутовими швидкостями РО ОґЕ зі

швидкостями зчленувань його гідроманіпулятора, який необхідний для синтезу найбільш раціональних траєкторій гідроманіпулятора ОГЕ;

- розроблено новий універсальний метод розв’язання задачі кінематичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, в тому числі і надлишкового, що дозволяє визначити найбільш раціональні закони зміни приєднаних координат гідроманіпулятора з точки зору мінімуму енергетичних витрат на його рух та забезпечує переміщення РО за довільною траєкторією в операційному просторі з відносною похибкою в 0,3% та економію енергії під час виконання робочого процесу ОГЕ до 25% у порівнянні з наявними рішеннями. Застосування методу для планування траєкторій РО в робочому просторі на транспортних операціях робочого процесу дозволяє знизити витрати енергії на виконання транспортних операцій до 58,8% у порівнянні з ручним керуванням, зменшити час виконання операцій до 33% та забезпечує встановлення раціонального кута різання під час позиціонування ковша;

- удосконалено математичну модель синтезу робастної системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, що гарантує зберігання значень похибок керування у заданих допустимих межах, незважаючи на наявність у системі факторів невизначеності.

4. Обґрунтовано доцільність паралельного використання для керування рухом гідроманіпулятора ОГЕ двох регуляторів, один з яких виробляє керуючий вплив у припущенні про детерміновані умови виконання робочого процесу, а інший, робастний, призначений для компенсації впливу невизначених факторів.

Як первинний використано регулятор з обчислювальним моментом із динамічними фільтрами високочастотних коливань, що забезпечує відносну помилку відпрацювання траєкторії руху гідроманіпулятора ОГЕ не більше 9% під час невизначених зовнішніх збурень на гідроманіпулятор.

Із використанням запропонованого робастного регулятора відхилення дійсної траєкторії різальної кромки ковша від заданої становить не більше ніж 3,5%.

5. Обґрунтовано доцільність використання методу множинної ідентифікації координат стану системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, при цьому:

- доведено, що орієнтація граней граничної множини можливих станів системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ співпадає з власним вектором матриці об’єкта в рівнянні стану системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ. Цей факт дозволяє обмежити кількість вершин множини можливих станів системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, яка збільшується у часі, що значно зменшує вимоги до обчислювальної потужності та пам’яті бортової ЕОМ;

- обґрунтовано обчислювальну ефективність використання математичного апарату теорії R -функцій для побудови множин можливих станів системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, що еволюціонують у часі;

- запропоновано процедуру зменшення потужності множин можливих станів системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ для підвищення ефективності визначення найбільш вірогідного стану системи керування гідроманіпулятором.

6. Розроблено процедуру розрахунку керуючого впливу для системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, який дозволяє бортовій ЕОМ визначити керування за 1 програмний цикл у порівнянні з 4 – 16 циклами наявними методами.

7. Розроблений стенд екскаватора з системою автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ дозволив експериментально довести доцільність та ефективність практичної реалізації результатів дослідження щодо автоматичного керування робочим процесом ОГЕ в умовах невизначеності, що забезпечують високу точність відпрацювання приєднаних координат маніпулятора ОГЕ (середньоквадратична помилка не перевищує 0,5 градусів, точність виконання земляних споруд до 1,5 см), підвищують продуктивність ОГЕ від 10,1 до 25,7% у залежності від кваліфікації оператора та знижують енергетичні витрати на здійснення робочого процесу до 25 %.

8. Отримані результати проведених досліджень упроваджені:

– у виробництво, про що свідчать відповідні документи про впровадження на підприємствах. Очікуваний економічний ефект від упровадження до експлуатації створеної системи автоматичного керування гідроманіпулятором одного ОГЕ становить 680,5 грн за рік;

– у навчальний процес для підготовки бакалаврів і магістрів у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті та аспірантів у Автономному університеті Нижньої Каліфорнії, Мексика.

9. Проведені дослідження поставили ряд нових завдань, зокрема розробки методів планування траєкторій РО в операційному просторі з урахуваннями конфігурації забою, параметрів машини та наявності перешкод, розробки підсистеми контролю навантаження на гідроманіпулятор ОГЕ, удосконалення гідравлічного привода маніпулятора машини тощо.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у міжнародній наукометричній базі даних SCOPUS

1. Eryemenko I. F., Gurko A. G. Realization of the game approach to control of second order linear objects // Journal of Automation and Information Sciences. 2009. V. 41, No. 10. P. 10–22. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v41.i10.20 (*Impact factor 0.024*)

2. Gurko A.G., Eryemenko I. F. Control of discrete system under bounded disturbances // Journal of Automation and Information Sciences. 2011. V. 43, No. 11. P. 18–29. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v43.i11.30 (*Impact factor 0.024*)

3. Gurko A. G., Kolodyazhny V. M. Estimating the state vector of a dynamic system under uncertainty // Cybernetics and systems analysis. 2013. V. 49, No.6, P. 821–828. DOI 10.1007/s10559-013-9571-7

4. Trajectory tracking control of an excavator arm using guaranteed cost control / A. Gurko, O. Sergiyenko, Juan Ivan Nieto Hipolito, et al // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. V. 383. P. 177–196. DOI: 10.1007/978-3-319-31898-1_10

**Статті у наукових фахових виданнях з переліку ДАК МОН України,
що входять до інших міжнародних наукометричних баз даних**

5. Гурко А. Г. К вопросу синтеза оптимального управления в условиях нестохастической неопределённости // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харьков, 2009. Вып. 25. С. 111–116. (*Index Copernicus, DOAJ*)
6. Гурко А. Г. Некоторые свойства функции Ляпунова на множестве состояний // Вестник национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск «Информатика и моделирование». / Нац. техн. ун-т «ХПИ». Харьков, 2010. Вып. 21. С. 46–51. (*DOAJ, OCLC, WorldCat, EBSCO, Genamics JournalSeek, SHERPA/RoMEO, ADAT*)
7. Гурко А. Г., Дробинин А. М. Повышение качества управления техническими объектами в условиях априорной неопределённости // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харьков, 2010. Вып. 27. С. 88–93. (*Index Copernicus, DOAJ*)
8. Гурко А. Г. К изучению свойств функции Ляпунова в пространстве состояний системы управления // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харьков, 2011. Вып. 28. С. 114–119. (*Index Copernicus, DOAJ*)
9. Гурко А. Г. Математическая модель манипулятора экскаватора с обратной лопатой // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т, Харьков, 2011. Вып. 55. С. 79–89. (*Index Copernicus, DOAJ*)
10. Гурко А. Г., Колобова И. А. Моделирование кинематики экскаватора в MATLAB Robotics Toolbox // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т, Харьков, 2013. Вып. 60. С. 59–65. (*Index Copernicus, DOAJ*)
11. Гурко А. Г., Янчевский И. В. Гарантированное управление движением манипуляционного робота // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2014. №2 (31). С. 174–181. (*Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory*)
12. Гурко А. Г., Плахтеев А. П., Плахтеев П. А. Выбор датчика положения рабочего оборудования экскаватора // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харьков, 2014. Вып. 35. С. 72–79. (*Index Copernicus, DOAJ*)
13. Гурко А. Г. Оценка энергоэффективности траекторий рабочего оборудования в виде манипулятора // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харьков, 2016. Вып. 73. С. 138–144. (*Index Copernicus, DOAJ*)
14. Гурко А.Г. Синтез энергоэффективных траекторий рабочего оборудования манипуляторного типа // Збірник наукових праць ПолтНТУ. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. 2016. Вип. 2 (47). С. 21–30. (*Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, ResearchBib, Cosmos Impact Factor, ISIFI, DRJI*)
15. Гурко О.Г. Структурна модель системи керування робочим процесом экскаватора // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харьков, 2016. Вып. 39. С. 33–38. (*Index Copernicus, DOAJ*)
16. Гурко А. Г., Плахтеев А. П., Плахтеев П. А. Повышение точности оценки состояния динамических объектов комплексом MATLAB-Arduino при проектировании кибер-физических систем // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2016. №1. С. 84–91. (*Web of Science, CrossRef, Index Copernicus, EBSCO, INSPEC, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat*)

17. Гурко О. Г., Доля Ю. О. Дослідження параметрів руху автогідропідіймача з обертальними зчленуваннями // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2016. №2. С. 121–127 (*Index Copernicus*)

Статті у наукових фахових виданнях з переліку ДАК МОН України

18. Гурко А. Г. Управление мобильным роботом для земляных работ // Технология приборостроения. 2010. Вып. 1. С. 21–25.

19. Кириченко И. Г., Гурко А. Г. Регулятор с вычисляемым моментом для управления рабочим оборудованием экскаватора // Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування: зб. наук. праць. Серія: Підйомно - транспортні, будівельні і дорожні машини і обладнання / Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. Дніпропетровськ, 2013. Вип. 72. С. 210–220.

20. Гурко А. Г., Янчевский И. В. Решение обратной задачи кинематики плоского шарнирного избыточного манипулятора // Механіка та машинобудування. 2014. №1. 136–147.

21. Гурко А. Г., Кириченко И. Г. Разработка системы управления движением автогидроподъёмника // Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування: зб. наук. праць. Серія: Підйомно - транспортні, будівельні і дорожні машини і обладнання / Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. Дніпропетровськ, 2014. Вип. 79. С. 210–220.

22. Гурко А. Г., Розенфельд Н. В., Доля Ю. А. Исследование положений стрелы двухзвенного автогидроподъёмника // Технология приборостроения. 2015. №1. С. 58–61.

23. Гурко А. Г. Анализ математической модели движения манипулятора экскаватора // Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування: зб. наук. праць. Серія: Підйомно - транспортні, будівельні і дорожні машини і обладнання / Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. Дніпро, 2016. №88. С. 147–153.

24. Гурко А. Г., М. Н. Кравцов, А. В. Лебединский. Анализ энергоэффективности методов планирования траекторий манипулятора // Технология приборостроения. 2016. №2. С. 70–73.

25. Гурко О. Г., Доля Ю. О., Молчанов К. В. Розробка стенду роботизованого экскаватора // Технология приборостроения. 2017. №2. С. 47–52.

Патент

26. Патент України на корисну модель №96818, МПК6 E02F 3/43, E02F 9/20. Спосіб керування процесом копання экскаватора / Гурко О.Г.; Плахтеев П.А.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. № u 2014 04665; заявл. 30.04.2014 ; опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4.

Матеріали конференцій та тези

27. Гурко А. Г. Процедура идентификации в задачах синтеза оптимального управления // Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації управління: матеріали 9-ї міжнародної міждисциплінарної наук.-практ. школи-конференції (м. Харків, 01-08 листоп. 2009 р.). Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2009. С. 157–158.

28. Гурко А. Г. Проблемы оптимального управления в условиях неопределённости // Сучасні проблеми науки та освіти: матеріали 9-ї міжнародної

міждисциплінарної наук.-практ. школи-конференції (м. Алушта, 30 квітня – 10 травня 2009 р.). Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2009. С. 79.

29. Гурко А. Г. Синтез гарантированного управления автономным мобильным роботом // Сборник доклады XVI научно - техническа конференция с международно участие «Транспорт, Экология - Устойчиво развитие», (Варна, България, 20 - 22 Май 2010). Варна: Издательство ТУ-Варна, 2010. С. 652–658.

30. Гурко А. Г. Робастное управление автономной машиной для земляных работ // Сучасні проблеми науки та освіти: матеріали 10-ї міжнародної міждисциплінарної наук.-практ. школи-конференції (м. Севастополь, 30 квітня – 10 травня 2010 р.). Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2010. С. 94–95.

31. Гурко А. Г. Оптимальное управление дискретной системой при ограниченных возмущениях // Сучасні проблеми науки та освіти: матеріали 11-ї міжнародної міждисциплінарної наук.-практ. школи-конференції (м. Ялта, 29 квітня – 09 травня 2011 р.). Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2011. С. 117–118.

32. Gurko A. Robust Control of Mobile Transport Object with 3D Technical Vision System / A. Gurko, O. Sergiyenko, V. Tyrsa, et al // Proceedings of IEEE Vigesimosegunda Reunion Internacional de otono ROC&C2011 (Acapulco, Mexico, 27 de noviembre al 3 de diciembre de 2011). Acapulco, 2011. 6p.

33. Гурко О. Г., Колодяжний В. М. Ідентифікація стану системи при неточно визначених обуреннях // Автоматика/Automatics–2011: матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Львів, 28–30 вересня. 2011 р.) Львів: Львівська політехніка, 2011. С. 207–208.

34. Гурко А. Г. Управление манипулятором гидравлического экскаватора // Сучасні проблеми науки та освіти: матеріали 11-ї міжнародної міждисциплінарної наук.-практ. школи-конференції (м. Євпаторія, 27 квітня – 9 травня 2012 р.). Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2012. – С. 130–132.

35. Gurko A. Robust Control of Excavation Mobile Robot With Dynamic Triangulation Vision / A. Gurko, W. Hernandez, O. Sergiyenko, et al // Proceedings of 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics [ICINCO 2012] (Rome, Italy, 28–31 July, 2012). SciTePress, 2012. V. 2. P. 481–484. (SCOPUS)

36. Гурко А. Г., Янчевский И. В. Оптимальное управление манипулятором одноковшового экскаватора // Автоматика / Automatics – 2012: матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Київ, 26-28 вересня 2012 р.). – К.: НУХТ, 2012. С. 149–150.

37. Гурко О. Г., Колобова І. О. Моделирование кинематики экскаватора в ROBOTICS TOOLBOX // Математичне моделювання прикладних задач математики, фізики, механіки: матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції (м. Харків, 10–25 травня 2013 р.). Харків: Екограф, 2013. С. 143–146.

38. Кириченко И. Г., Гурко А. Г. Автоматизация управления рабочим оборудованием экскаватора // Проблемы розвитку дорожньо-транспортного і будівельного комплексів: збірник статей і тез доповідей міжнар. наук.-практ. конференції, (м. Кіровоград, 03–05 жовтня 2013 р.). Кіровоград: ПП «Ексклюзив-Систем», 2013. С. 175–181.

39. Sergiyenko O.Yu. Optimal Kinematic Control of a Robotic Excavator with Laser TVS feedback / O. Yu. Sergiyenko, D. Hernandez-Balbuena, A. G. Gurko, et al //

Proceeding of 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (Vienna, Austria, 10–14 November, 2013). IEEE, 2013. P 4239–4244. (*SCOPUS*)

40. Гурко А. Г. Субоптимальное гарантированное управление роботом-манипулятором // Інформаційні технології і мехатроніка: матеріали всеукр. наук.-практ. конференції (м. Харків, 15 квітня 2014 р.). Харків, Стиль-Издат, 2014. С. 49–50.

41. Гурко А. Г. Моделирование динамики объёмного гидропривода // Технология приборостроения: материалы всеукраинской науч.-практ. конференции «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у дорожньо-будівельній галузі». 2014. Спеціальний випуск. С. 53–57.

42. Гурко О. Автоматичне керування робочим процесом БДМ з робочим обладнанням маніпуляторного типу // Матеріали 12-го міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 28-29 травня 2015 р.). Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. С. 144–145.

43. Gurko A. Guaranteed Control of a Robotic Excavator During Digging Process / A. Gurko, O.Yu .Sergiyenko, et al // Proceeding of 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics [ICINCO 2015], (Colmar, France, 21–23 July, 2015). SciTePress, 2015. V. 2. P. 52–59. (*SCOPUS*)

АНОТАЦІЯ

Гурко О. Г. Методологічні основи підвищення ефективності автоматичного керування гідроманіпуляторами будівельних машин. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.04 – машини для земляних, дорожніх і лісотехнічних робіт. – Харківський національний автомобільно-дорожній МОН України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення ефективності керування гідроманіпулятором будівельної машини на прикладі одноківшевого гідравлічного екскаватора (ОГЕ) за рахунок підвищення точності робочих процесів розробки ґрунту та зменшення енергетичних витрат на виконання робочих процесів шляхом створення нових та розвитку відомих методологічних основ синтезу системи автоматичного керування гідроманіпулятором в умовах невизначеності апріорної інформації щодо зовнішніх збурень та поточного стану системи керування гідроманіпулятором.

Для вирішення вказаної проблеми на підставі обґрунтованої системної концепції автоматизованого керування робочим процесом ОГЕ, яка базується на інтегрованих взаємодії задач організації та планування заходів з проведення земляних робіт парком машин, автоматичного керування гідроманіпулятором та переміщеннями окремої машини, визначено структурну та функціональну моделі автоматизованої системи керування робочим процесом ОГЕ та її основної підсистеми – системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, що працює в умовах невизначеності щодо значень зовнішніх та внутрішніх збурень.

На основі робастного підходу до керування складними технічними об'єктами в умовах невизначеності дістали подальшого розвитку методологічні основи синтезу системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, що гарантує зберігання значень похибок керування у заданих допустимих межах незважаючи на наявність в системі факторів невизначеності щодо властивостей ґрунту та похибок вимірювання

приєднаних координат гідроманіпулятора ОГЕ. Запропоновано використання та удосконалено метод множинної ідентифікації координат стану системи автоматичного керування гідроманіпулятором ОГЕ, який відрізняється від відомих використанням для побудови множин можливих станів системи математичного апарату R -функцій. Результати моделювання та натурних експериментів підтверджують ефективність використання основних положень дослідження при автоматичному керуванні гідроманіпулятором ОГЕ.

Ключові слова: одноківшевий гідравлічний екскаватор, робочий процес, гідроманіпулятор, точність, енергоефективність, невизначеність, автоматичне керування.

АННОТАЦИЯ

Гурко А. Г. Методологические основы повышения эффективности автоматического управления гидроманипуляторами строительных машин. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.05.04 – машины для земляных, дорожных и лесотехнических работ. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет МОН Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы повышения эффективности управления гидроманипулятором строительной машины на примере одноковшового гидравлического экскаватора (ОГЭ) за счёт повышения точности процессов разработки грунта и уменьшения энергетических затрат на выполнение рабочих процессов путём создания новых и развития известных методологических основ синтеза системы автоматического управления гидроманипулятором в условиях неопределённости априорной информации о внешних возмущениях и текущем состоянии системы управления гидроманипулятором.

Для решения указанной проблемы на основании обоснованной системной концепции автоматизированного управления рабочим процессом ОГЭ, которая базируется на интегрированном взаимодействии задач организации и планирования мероприятий по проведению земляных работ парком машин, автоматического управления гидроманипулятором и перемещениями отдельной машины, построены структурная и функциональная модели автоматизированной системы управления рабочим процессом ОГЭ и её основной подсистемы – системы автоматического управления гидроманипулятором ОГЭ, работающего в условиях неопределённости относительно значений внешних и внутренних возмущений.

На основе робастного подхода к управлению сложными техническими объектами в условиях неопределённости получили дальнейшее развитие методологические основы синтеза системы автоматического управления гидроманипулятором ОГЭ, гарантирующей сохранение значений ошибок управления в заданных допустимых пределах, несмотря на наличие в системе факторов неопределённости относительно свойств грунта и погрешностей измерения присоединённых координат гидроманипулятора ОГЭ. Предложено использование и усовершенствован метод множественной идентификации координат состояния системы автоматического управления гидроманипулятором

ОГЭ, который отличается от известных применением для построения множеств возможных состояний системы математического аппарата R -функций. Результаты моделирования и натурных экспериментов подтверждают эффективность использования основных положений исследования при автоматическом управлении гидроманипулятором ОГЭ.

Ключевые слова: одноковшовый гидравлический экскаватор, рабочий процесс, гидроманипулятор, точность, энергоэффективность, неопределённость, автоматическое управление.

ABSTRACT

Gurko O. G. Methodological Fundamentals to Increase Efficiency of Automatic Control of Construction Machine Hydraulic Manipulators. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Technical Sciences Degree: speciality 05.05.04 – Machines for Earth, Road and Forestry Engineering Works. – Kharkiv National Automobile and Highway University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

This thesis is devoted to a topical scientific and applied problem of increasing the efficiency of the construction machine hydraulic manipulator control when using a hydraulic single-bucket excavator due to the increase of the precision of soil development and the decrease of operation energy expenditure by means of both the creation of new methodological fundamentals and the upgrading of well-known ones for the synthesis of the hydraulic manipulator automatic control system in the conditions of the uncertainty of a priori information about external disturbances and a current state of the hydraulic manipulator control system.

To solve the problem on the basis of the substantiated system-based concept of the excavator operation automated control that is grounded on the integrated interaction between the tasks of the organization and planning of activities to carry out earth works using the pool of machines, the automatic hydraulic manipulator control and the movement of a separate machine, the structural and functional models of the automated system to control the excavator operation and its main subsystem – the excavator hydraulic automatic control system, which operates in the conditions of uncertainty using the values of external and internal disturbances, are created.

On the basis of a robust approach to control complex technical objects in the conditions of uncertainty, the methodological fundamentals of the synthesis of the excavator hydraulic manipulator automatic control system, which ensures control error values within acceptable limits in spite of the factors of uncertainty regarding the characteristics of soil and the noise of the measurement of the excavator hydraulic manipulator joint coordinates, are further developed. The method of the multiple identifications of the state coordinates of the excavator hydraulic manipulator automated control system is proposed and updated. It differs from the current methods by the use of the mathematical apparatus of R -functions to develop the sets of the possible states of the system. The results of modelling and full-scale experiments have proved the efficiency of the main provisions of research in course of the automatic control of the excavator hydraulic manipulator.

Key words: hydraulic single-bucket excavator, operation, hydraulic manipulator, accuracy, energy efficiency, uncertainty, automatic control.