

УДК 621.878.4

ОСОБЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНОГО І ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСКАВАТОРІВ

КИРИЧЕНКО І. Г.¹, д.т.н., проф.,ГУРКО О. Г.², к.т.н., доц.,ЯРИЖКО О. В.³, к.т.н., доц.

¹ Кафедра будівельних та дорожніх машин, Харківський національний автомобільно – дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: igk160450@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2128-3500

² Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний автомобільно – дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: gurko@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-9905-8584

³ Кафедра будівельних та дорожніх машин, Харківський національний автомобільно – дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: yaryzko@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Створення сучасних автоматизованих екскаваторів потребує використання новітніх підходів щодо їх моделювання та проектування. Використання різних програмних продуктів для комп'ютерного моделювання дозволяє значно спростити процес дослідження динамічних процесів, що протікають у системі. Застосування програмного продукту MATLAB, що включає до свого складу розширення Simscape та має можливість відносно простого зв'язку з фізичними світом, дозволяє створювати моделі системи так само, як збирається дійсна фізична система. Для перевірки адекватності одержаних рішень необхідно проведення відповідних експериментальних досліджень. **Мета.** У межах цієї публікації будуть представлені результати досліджень екскаватора з робочим обладнанням зворотна лопата, що виконані на стенді фізичного моделювання та на комп'ютерній моделі. **Висновок.** При розробці імітаційно-фізичної моделі розглянуті основні принципи побудови математичної моделі робочого обладнання екскаватора в середовищі MATLAB/Simulink з використанням бібліотек SimMechanics. Розглянуто розв'язок першої задачі динаміки, отримані режими перехідних процесів зміни значення узагальнених координат характерних точок, швидкості їх зміни, силові характеристики виконавчих механізмів. Одержані результати використано при розробці системи автоматичного керування робочим процесом екскаватора. В результаті проведення експериментальних досліджень на стенді екскаватора EO2621A встановлено, що запропонована система автоматичного керування забезпечує стеження ківша за заданою траєкторією в умовах невизначеності з високою точністю, що добре узгоджується з результатами моделювання і відповідає заявленій точності існуючих світових розробок.

Ключові слова: екскаватор; імітаційно-фізична модель; MATLAB; система керування; стенд; експериментальні дослідження

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРОВ

КИРИЧЕНКО И. Г.¹, д.т.н., проф.,ГУРКО А. Г.², к.т.н., доц.,ЯРЫЖКО А. В.³, к.т.н., доц.

¹ Кафедра строительных и дорожных машин, Харьковский национальный автомобильно – дорожный университет», ул. вул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: igk160450@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2128-3500

² Кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, Харьковский национальный автомобильно – дорожный университет, ул. вул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: gurko@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-9905-8584

³ Кафедра строительных и дорожных машин, Харьковский национальный автомобильно – дорожный университет, ул. вул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: yaryzko@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. Создание современных автоматизированных экскаваторов требует использования новейших подходов к их моделированию и проектированию. Использование различных программных продуктов для компьютерного моделирования позволяет значительно упростить процесс исследования динамических процессов, протекающих в механической системе. Применение программного

продукта MATLAB с установленным расширением Simscape и имеющего возможность относительно простое взаимодействия с физическим миром, позволяет создавать модели системы так же, как собирается реальная физическая система. Для проверки адекватности полученных решений необходимо проведение соответствующих экспериментальных исследований. **Цель.** В рамках данной публикации будут представлены результаты исследований экскаватора с рабочим оборудованием обратная лопата, выполненных на стенде физического моделирования и на компьютерной модели. **Выводы.** При разработке имитационно-физической модели рассмотрены основные принципы построения математической модели рабочего оборудования экскаватора в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотек SimMechanics. Рассмотрены решение первой задачи динамики, полученные режимы переходных процессов изменения значения обобщённых координат характерных точек, скорости их изменения, силовые характеристики исполнительных механизмов. Полученные результаты использованы при разработке системы автоматического управления рабочим процессом экскаватора. В результате проведения экспериментальных исследований на стенде экскаватора ЭО2621 установлено, что предложенная система автоматического управления обеспечивает слежение ковша заданной траекторией в условиях неопределённости с высокой точностью, которая хорошо согласуется с результатами моделирования и соответствует заявленной точности существующих мировых разработок.

Ключевые слова: экскаватор; имитационно-физическая модель; MATLAB; система управления; стендовые экспериментальные исследования

FEATURES OF COMPUTER AND PHYSICAL MODELLING OF EXCAVATORS

KYRYCHENKO I. G.¹, *Dr. Sc. (Eng.), Professor,*
GURKO A. G.², *PhD (Eng.), Associate Professor,*
YARYZHKO A. V.³, *PhD (Eng.), Associate Professor*

¹ Department of building and road machines, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudry str., 25, Kharkiv, Ukraine, Tel. +38 (057) 7003866, e-mail: igk160450@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2128-3500

² Department of automation and computer-integrated technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudry str., 25, Kharkiv, Ukraine, Tel. +38 (057) 7003866, e-mail: gurko@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-9905-8584

³ Department of building and road machines, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudry str., 25, Kharkiv, Ukraine, Tel. +38 (057) 7003866, e-mail: yaryzko@gmail.com

Abstract. Problem statement. The up-to-date automated excavator creation requires the use of novel methods of their modelling and developing. Using of various software products for computer simulation can greatly simplify the investigation of the dynamic processes occurring in the system. The use of the MATLAB, which includes the Simscape Toolbox and can relatively easy communicate with the physical world, allows creating systems models the way like the real physical systems are developed and which are close enough to these physical systems. To verify the adequacy of the obtained solutions, the appropriate experimental research is required. **The aim of the paper** is to present the results of the backhoe research that have been carried out with the physical simulator and the computer model are presented. **Conclusion.** While developing the simulation-physical model, the basic principles of simulation of backhoe working equipment in the MATLAB / Simulink environment with the use of the SimMechanics libraries have been considered. The solution of the first problem of dynamics is found, the modes of transient processes when the generalized coordinates values of the characteristic points changing as well as their velocities are obtained, the actuators power characteristics are received. The results have been used for a backhoe workflow control system development. The experiments results with the backhoe EO2621A simulator proved the feasibility and efficiency of the proposed control system which provides the high accuracy on the bucket tracking control under uncertainties. The accuracy agreed to the simulation results and corresponds to the declared accuracy of existing control systems.

Keywords: backhoe; imitation-physical model; MATLAB; control system; simulator; experimental investigation

Постановка проблеми. Протягом останніх декількох років спостерігається бурхливий розвиток в екскаваторобудуванні. З'являються нові конструкції машин, змінюються функціональні і кінематичні схеми виконання робочого обладнання, збільшується чисельність робочих органів, що агрегуються з екскаваторним обладнанням. Розвиток систем гідроприводів дозволив впроваджувати телескопічні рукояті та стріли, створювати екскаватори з

принципово новим робочим обладнанням і ходовим устаткуванням [1, 2]. Фірмою Menzi Misch випускаються екскаватори, що мають телескопічні рукояті та ходове обладнання, що забезпечують незалежне одне від одного положення ведучих коліс або спеціальних опор. На багатьох сучасних екскаваторах встановлюються пристрої, що дозволяють швидко змінювати робочі органи. Активно впроваджуються системи автоматизації

робочих процесів і контролю параметрів машини в процесі виконання різноманітних технологічних операцій. При розробці нових машин використовуються методи моделювання поведінки всього об'єкту, або його складових частин. Найбільш ефективно подібні дослідження можна проводити на фізичних, або комп'ютерних моделях. Кожна з них має свої переваги та недоліки, тому перспективним є поєднання цих моделей.

Аналіз літератури. Створення сучасних автоматизованих екскаваторів потребує використання новітніх підходів щодо їх моделювання та проектування. В даний час у промисловій практиці апаратні та програмні компоненти різних вузлів і механізмів машин розробляються окремо, без урахування впливу їх взаємодії між собою та з фізичним світом. І вже після розробки машини, перевірки її на моделях, проектуються системи керування. Цей процес є трудомістким та вимагає великих витрат, а з ускладненням машин є практично неможливим.

Одним з найбільш перспективних серед альтернативних підходів щодо проектування машин є модельно-орієнтоване проектування [3, 4]. Його суть полягає у тому, що замість фізичних прототипів машини, в спеціалізованому програмному пакеті створюють імітаційну модель на якій досліджується поведінка підсистем у різних умовах, апробація та вдосконалення розроблених алгоритмів керування цими підсистемами. В разі досягнення алгоритму поставленої задачі виконується автоматична генерація програмного кода для цільової мікропроцесорної платформи.

Дослідження проводяться шляхом реалізації взаємодії моделі та фізичного світу, що здійснюється за допомогою різних датчиків та виконавчих пристроїв. Це дозволяє перейти від імітаційних моделей до гібридних, у яких поєднуються моделі такого складного об'єкта, як екскаватор та реальні фізичні пристрої.

Частіше за все таке проектування проводять в середовищах LabVIEW компанії National Instruments та MATLAB/Simulink компанії Mathworks [5,6,7]. Ці програмні продукти володіють широкими можливостями моделювання та зв'язку з фізичними світом, наприклад, через COM-порт або USB.

Описаний підхід завойовує популярність й при проектуванні сучасних екскаваторів [8-11].

Мета статті. У межах цієї публікації будуть представлені результати досліджень екскаватора з робочим обладнанням зворотна лопата, що виконані на стенді фізичного моделювання та на комп'ютерній моделі.

Склад експериментального стенда. В рамках досліджень [11] щодо розробки роботизованого екскаватора створено його діючу модель на базі стенда одноківшового екскаватора EO2621A (рис. 1). Попереднє керування екскаваторним маніпулятором (поз. 1 – 3 на рис. 1) здійснювалося в ручну за допомогою релейно-контакторної апаратури, що

розташована в пульті 10, включення якої проводилося за допомогою важелів керування 11. В якості приводів 4, 5, 6 маніпулятора використано електродвигуни УЛ-061-УХЛ4 120Вт і УЛ-042-28УХЛ4 60Вт, які можуть працювати на постійному і змінному струмі.

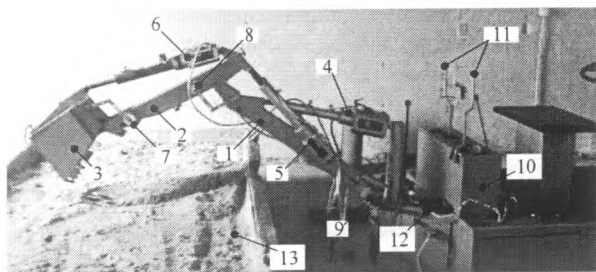


Рис. 1. Стенд одноківшового екскаватора EO2621A / The simulator of an backhoe EO2621A:

1 – стріла; 2 – рукоять; 3 – ківш; 4, 5, 6 – приводи стріли, рукояті і ковш; 7, 8, 9 – потенціометричні датчики кутів повороту стріли, рукояті і ковш; 10 – штатний пульт релейно-контакторного керування екскаваторним маніпулятором; 11 – важелі керування маніпулятором; 12 – силовий блок керування екскаваторним маніпулятором; 13 – контейнер з ґрунтом

Морально і фізично застаріла керуюча апаратура стенду була замінена новою, що являє собою сукупність вимірювального і керуючого обладнання 7,8,9,12, а також програмного забезпечення, в якому реалізовані основні результати попередніх досліджень [11]. Принцип роботи системи полягає в керуванні маніпулятором в ручному і автоматичному режимах з контролем і коригуванням виконання робіт за допомогою аналізу даних, отриманих від мережі датчиків.

Система включає в себе (рис. 2):

- а) блок керування на основі мікропроцесорного пристрою (МПП) та ПЕОМ верхнього рівня;
- б) симісторно-релейний силовий блок з фазовим керуванням;
- в) органи керування (виконавчі приводи);
- г) мережу датчиків;
- д) для переходу на ручне керування маніпулятором передбачено підключення джойстиків.

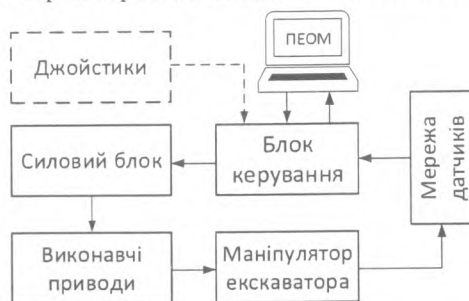
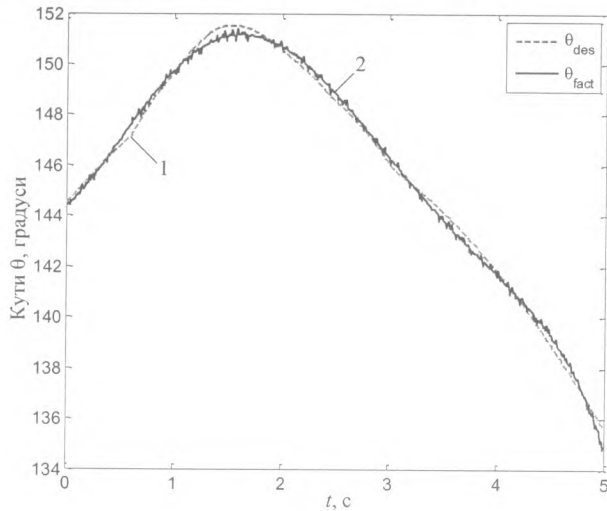


Рис. 2. Структура системи керування стендом екскаватора EO2621A / Block diagram of the backhoe EO2621A simulator control system

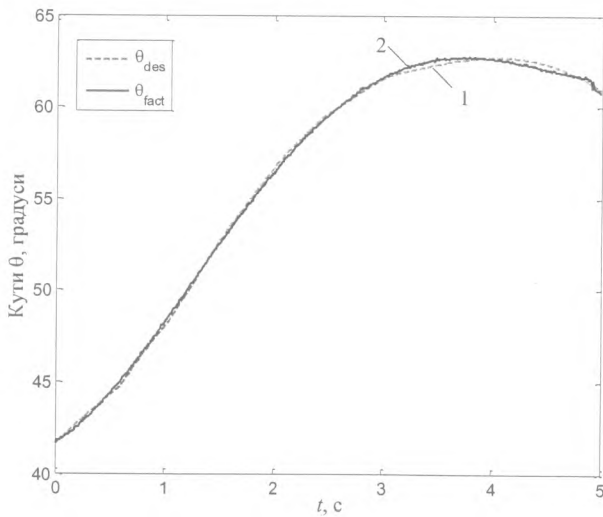
У поточному варіанті стенду мережа датчиків складається з потенціометричних датчиків кутів повороту стріли, рукояті та ковша. У подальшому, мережу датчиків планується розширити датчиками динамічних навантажень на маніпуляторі.

Керування маніпулятором екскаватора здійснювалося в умовах невизначеності щодо масово-інерційних параметрів маніпулятора, значення яких визначено приблизно виходячи з геометричних розмірів маніпулятора та товщини сталі. Результати роботи системи автоматичного керування екскаватора наведені на рис. 3, та показують її високу ефективність. Зокрема, середньоквадратичні значення

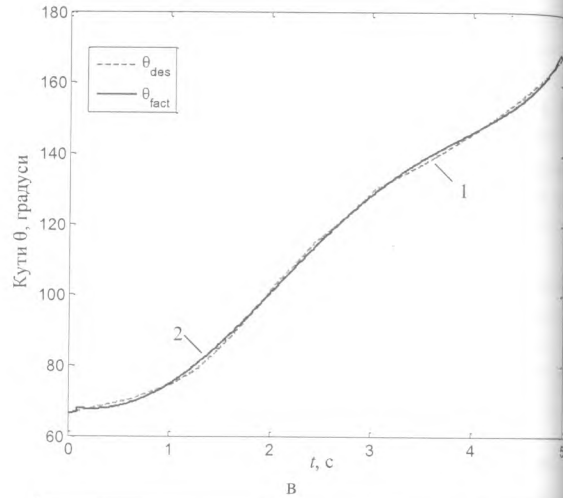
помилки відпрацювання кутів повороту ланки маніпулятора екскаватора для кожного моменту дискретизації за часом (рис. 3 д), що одержані результати проведення серії з 20 опитів, не перевищують 0,5 градусів. Це призводить до того, що максимальне значення помилки відпрацювання траєкторії руху ківша не перевищує 1,5 см. Одержані результати добре корелюються з результатами моделювання (до 1,2 см) та відповідає показникам які забезпечуються системами провідних виробників систем керування екскаваторами (1±2 см).



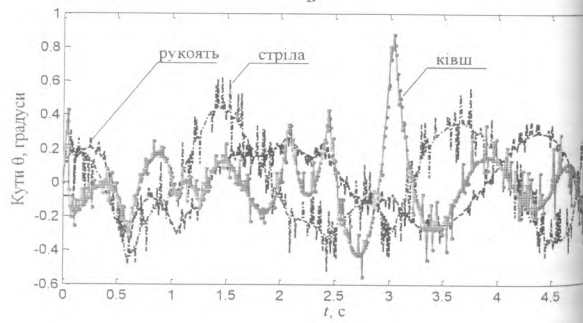
а



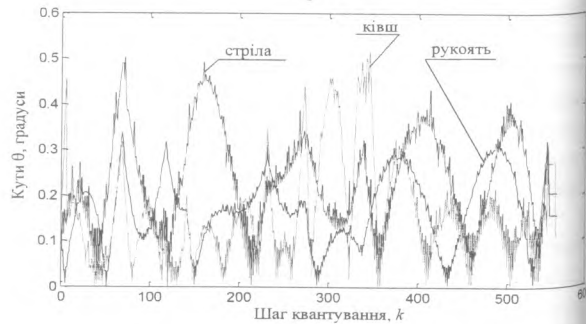
б



в



г



д

Рис. 3. Результати дослідження роботи стенду / The simulator workflow investigation results: а, б, в – бажані (1) та дійсні (2) закони зміни приєднаних координат стріли, рукояті та ковша, відповідно, при одному з опитів; г – абсолютні похибки відпрацювання приєднаних координат при одному з опитів; д – середньоквадратичне відхилення дійсних вимірених значень узагальнених координат від бажаних

Запропонований стенд є проміжним варіантом. У подальшому планується його модернізація за рахунок

розвитку мережі датчиків та удосконалення алгоритмів керування.

Імітаційно-фізична модель механічної системи.

Для розробки імітаційної моделі скористаємося додатком Simscape програмного продукту MATLAB/Simulink, який використовує підхід каузального моделювання. Бібліотека розширюється спеціалізованими пакетами SimMechanics (механічні системи), SimHydraulics (гідравлічні системи) та інші [6, 7]. Розглянемо методику побудови блок-схеми математичної моделі механічної підсистеми робочого обладнання екскаватора в позначеннях SimMechanics.

Simscape підтримує функцію імпорту CAD-збірки в SimMechanics за допомогою SimMechanics Link. Маса і інерція кожної частини в збірці імпортується як маса і інерція твердого тіла. Геометрія з CAD-збірки зберігається в файлах геометрії і може бути пов'язана з відповідним тілом в SimMechanics. Для моделей SolidWorks, Pro/ENGINEER і Autodesk Inventor необхідно встановлювати програмне розширення, яке дозволяє зберігати CAD-збірку в файлі з розширенням XML, яку можна імпортувати в SimMechanics (рис. 4).

Моделювання фізичних систем починаю з трьох обов'язкових блоків: Solver Configuration - задає параметри чисельного рішення диференціальних рівнянь; Mechanism Configuration - відповідає за межі лінеаризації при обчисленні частинних похідних та задає вектор гравітації діючий в моделі; World Frame - блок задає інерційну систему координат (СК), зв'язками з яким задаються положення інших СК [12] (рис. 5).

СК і матриці переходу між ними задаються за допомогою блоків Rigid Transform. Блок являє собою додаткову СК, розташування (Translation) і

орієнтацію (Rotation) осей якої можна задати у властивостях блоку.

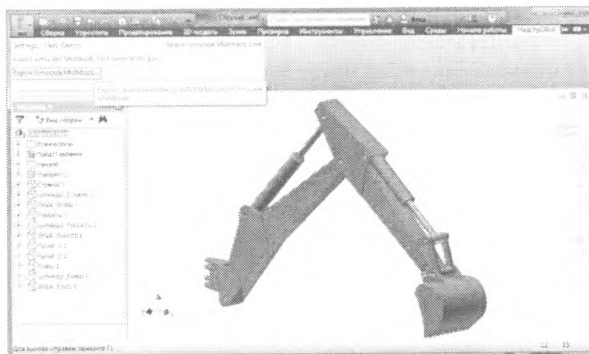


Рис. 4. Надбудова SimMechanics Link в інтерфейсі Autodesk Inventor / SimMechanics Link superstructure in the Autodesk Inventor interface

Твердотільні елементи робочого обладнання екскаватора задаються блоками Solid. Цей блок визначає масу, геометричні розміри, моменти і відцентрові моменти. Попереднє використання утиліти SimMechanics Link дозволило імпортувати дані параметри з CAD-системи Autodesk Inventor (рис. 4) і вони будуть розраховані автоматично. Властивості блоку Solid мають 4 розділи (рис. 6): Geometry - визначає тип і геометричні розміри графічних примітивів або вказує шлях до файлу імпортованих даних з розширенням .step і .stl; Inertia - визначає інерційні властивості тіла; Graphic - відповідає за відображення відповідного ланки під час візуалізації; Frames - дозволяє задавати додаткові СК зміщені щодо базової.

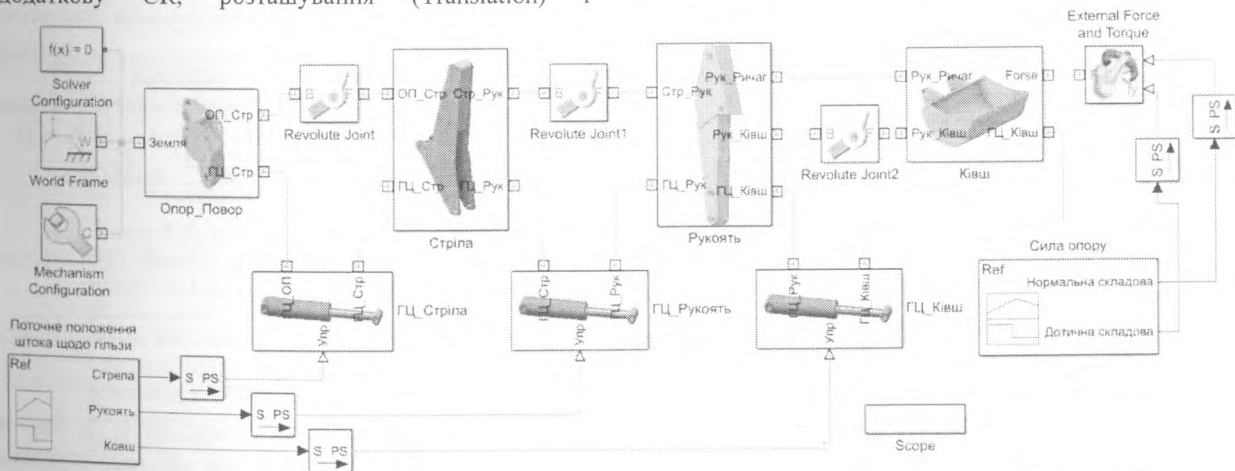


Рис. 5. Загальний вигляд моделі в позначеннях Simulink / General view of the model in Simulink notation

Ступені свободи задаються за допомогою блоків з бібліотеки Joints. Варто відзначити один недолік зчленування в бібліотеці другого покоління. Вибирати вісь, для якої буде доступна ступінь свободи, тепер не можна. Так для зчленувань з одним ступенем свободи рух буде здійснюватися навколо (Revolute) або уздовж (Prismatic) осі Z.

Для двохосової ступені свободи (Rectangular) застосовуються осі Y і X. Дана проблема вирішується

шляхом використання додаткової СК (Rigid Transform), спеціально під зчленування, в якій їй задається необхідна орієнтація або позиція в просторі. Подібним чином за допомогою блоку Revolute Joint задані ступеня свободи, між ланки робочого обладнання екскаватора, а блоком Prismatic Joint ступені свободи між гільзою і штоком гідроциліндра.

Всі блоки бібліотеки Joint мають наступні можливості стосовно кожного ступеня свободи, що входить в нього:

- задавати початкові і виводити поточні значення узагальнених координат, швидкості їх зміни і їх

прискорення (застосовується при роботі системи управління заснованих на цій моделі);

- задавати дію сили \ моменту (надаються з блоку гідроприводів на механічну підсистему);

- накладати пружно-в'язкі зв'язку (моделює пружно-в'язку реакцію опори).

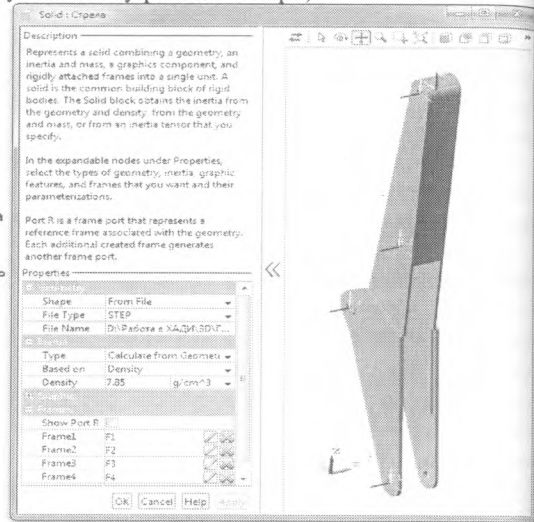
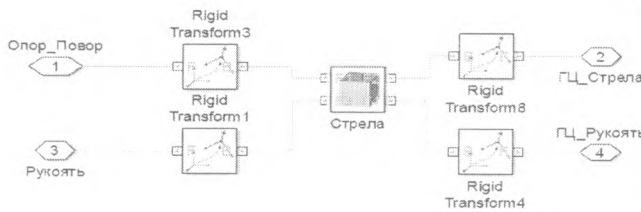


Рис. 6. Підсистема стріли і властивості блоку Solid / Boom subsystem and the block Solid properties

Для зручності механічна модель була розбита на наступні підсистеми, що представляють собою ланки робочого обладнання екскаватора: поворотна платформа, стріла (рис. 6), рукоять, ківш, і гідроциліндри. Шарніри, що задають ступеня свободи, скомпоновані поза підсистем.

Підсистема гідроциліндра підключається до відповідних входів підсистем ланок. Являє собою шток і гільзу гідроциліндра у вигляді блоків Solid і

поступальний рух між ними задається блоком Prismatic Joint, використовуючи властивості якого задається поточне положення штока щодо гільзи знімається значення сили діючої між ними, яка повинен забезпечити виконавчий механізм (рис. 7).

Таким чином, використовуючи раніше описані блоки можна скласти математичну модель механічної підсистеми в SimMechanics, яка дозволяє рішення першої задачі динаміки.

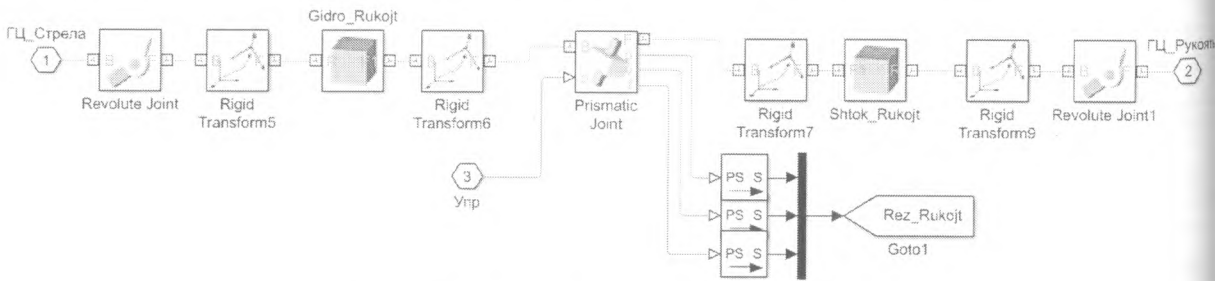


Рис. 7. Підсистема гідроциліндра / Hydrocylinder subsystem

Зовнішнє навантаження, яке прикладається на ківш екскаваторного обладнання, моделюється за допомогою блоку External Force and Torque. Поточне положення штока щодо гільзи та значення складових зовнішнє навантаження задається блоками Signal Builder. Загальний вигляд моделі в позначеннях Simulink зображений на рисунку 5.

Таким чином, механічна підсистема робочого обладнання екскаватора складається з 9 диференціальних рівнянь. Ці рівняння відображають роботу коливальні системи, для їх чисельного рішення був обраний метод трапеції з інтерполяцією і змінним шагом, як найбільш оптимальний по

співвідношенню точність / швидкість, а так як рекомендований MATLAB [12]. В налаштуванні моделі Simulink, він представлений вирішувачем ode23t.

За допомогою складеної моделі можна отримувати будь-які перехідні процеси, в тому числі зміни значення узагальнених координат характерних точок робочого обладнання, швидкості їх зміни зусилля в гідроциліндрах (рис. 8). Наочне уявлення руху маніпулятора можна отримати за допомогою вбудованої функції візуалізації SimScope, що дозволяє швидше помічати помилки при аналізі.

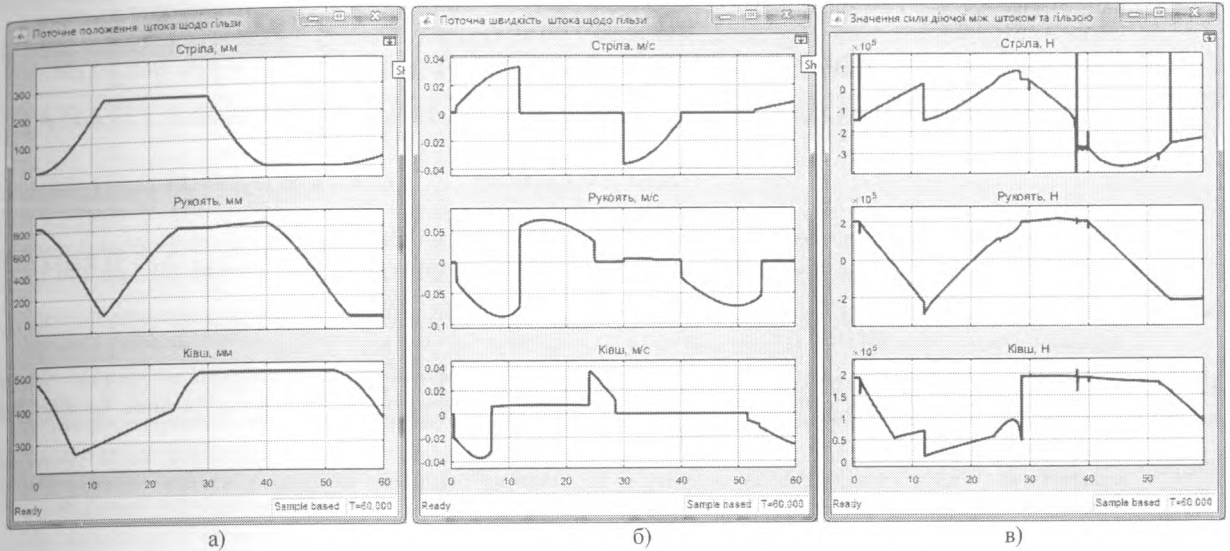


Рис. 8. Результати моделювання/ Simulation results :

а – поточне положення штока щодо гільзи гідроциліндра; б – поточна швидкість штока щодо гільзи;
в – значення сили діючої між штком та гільзою

Висновки. В результаті проведення експериментальних досліджень маніпулятора на стенді одноківшевого екскаватора EO2621A встановлено, що запропонована система автоматичного керування маніпулятором екскаватора забезпечує стеження ківша за заданою траєкторією в умовах невизначеності з точністю до 1,5 см, що добре узгоджується з результатами моделювання (до 1,2 см) і відповідає заявленій точності існуючих світових розробок (1–2 см), проте, на відміну від існуючих, виконує робочий процес в автоматичному режимі.

При розробці імітаційно-фізичної моделі розглянуті основні принципи побудови математичної

моделі робочого обладнання екскаватора в середовище MATLAB/Simulink з використанням бібліотек SimMechanics. MATLAB дозволяє отримувати числові рішення диференціальних рівнянь що описують процеси, які протікають при русі елементів механічної системи, розглядаючи не тільки саме рух, а і причини його виникнення. Отримана модель дозволяє вирішувати завдання аналізу і синтезу систем керування роботою екскаватора, отримати режими перехідних процесів зміни значення узагальнених координат характерних точок, швидкості їх зміни, силові характеристики виконавчих механізмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хмара Л.А. Інноваційне телескопічне робоче обладнання одноківшевих гідравлічних екскаваторів / Л.А. Хмара, О.О. Дахно. – Дніпро.: Літограф, 2017. – 170 с.
2. Hutter M., Leemann, P., Stevsic, S., et al. Towards optimal force distribution for walking excavators //Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on. – IEEE, 2015. – P. 295-301. DOI: 10.1109/ICAR.2015.7251471
3. Jensen J.C. A model-based design methodology for cyber-physical systems / J.C. Jensen, D.H. Chang, E.A. Lee // Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC): 7th International conference, Istanbul, 4-8 July 2011: proceedings. – IEEE, 2011. – P. 1666-1671. DOI: 10.1109/IWCMC.2011.5982785.
4. Кириченко І.Г. Наукові основи створення високоефективних землерійно-транспортних машин / Кириченко І.Г., Назаров Л.В., Нічке В.В., Демішкан В.Ф. та ін. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 588 с.
5. Гурко А.Г. Повышение точности оценки состояния динамических объектов комплексом MATLAB-Arduino при проектировании кибер-физических систем А.Г. Гурко, А.П. Плахтеев, П.А. Плахеев // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016 – №1. – С. 84-91. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-10
6. Дьяконов В.П., Simulink: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2013. – 784с.
7. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учебное пособие для высших учебных заведений / В.М. Мусалимов, Г.Б. Заморуев, И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова, К.А. Нуждин. - СПб.: НИУ ИТМО, 2013. - 114 с
8. Яричко О.В. Моделювання складних технічних систем з використанням пакету Simscape / О.В. Яричко, Н.П. Пекіна. НТЖ Технологія приборостроення. – 2017, №2, с. 57-60.
9. Curduman L., Nastac S., Debeleac C. On active control of transitory regimes within the driving system of a single bucket excavating equipment for the bank-sloping and differential excavation processes // Proceedings of the 23rd Int. Congress on Sound&Vibration ICSV23. – 2016. – 9 p.

10. Curduman L., Debeleac C., Nastac S. On path oscillations analysis of mechanical multi-body and hydrostatical driving units coupled system // *Procedia Engineering*. – 2017. – V. 181. – P. 518-525. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.428
11. Gurko A., Sergiyenko O., Nieto Hipólito J.I., Kirichenko I., et al. Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2016. – V. 383. – P. 177-196. DOI: 10.1007/978-3-319-31898-1_10
12. *SimMechanics Documentation*. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sm/>

REFERENCES

1. Khmara L.A., Dakhno O.O. *Innovatsiine teleskopichne roboche obladdannia odnokivshevnykh hidravlichnykh ekskavatoriv* [Innovative telescopic working equipment for single-bucket hydraulic excavators]. Dnipro, Litohraf, 2017, pp. 170. (in Ukrainian).
2. Hutter M., Leemann, P., Stevsic, S., Michel, A., Jud, D. et al. *Towards optimal force distribution for walking excavators*. Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on. 2015, pp. 295-301.
3. Jensen J.C., Chang D.H., Lee E.A. *A model-based design methodology for cyber-physical systems*. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC): 7th International conference, Istanbul, 4-8 July 2011*, pp. 1666-1671. DOI: 10.1109/IWCMC.2011.5982785.
4. Kyrychenko I.H., Nazarov L.V., Nichke V.V., et al. *Naukovi osnovy stvorennia vysokoefektyvnykh zemlerivnykh transportnykh mashyn* [Scientific basis of efficient earth-moving machinery creation] – Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University. 2003, 588 s. (in Ukrainian).
5. Gurko A. G., Plakhteev A. P., Plakhteev P. A. *Povyshenie tochnosti otsenki sostoyaniya dinamichnykh ob'ektiv kompleksom MATLAB-Arduino pri proektirovanii kiber-fizicheskikh sistem* [Accuracy increase of dynamic objects state estimation by a complex MATLAB-Arduino when cyberphysical systems designing]. *Radioelektronika, informatika i upravlenie* [Radio Electronics, Computer Science, Control]. 2016, no. 1, pp. 84-91. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-1 (in Russian).
6. Diakonov V.P., *Simulink: Samouchytel* [Simulink: manual for self-tuition]. – M.:DMK-Press. 2013, 784p. (in Russian).
7. Musalymov V.M., Zamoruev H.B., Kalapyshyna Y.Y., et al. *Modelirovaniye mekhatronnykh sistem v srede MATLAB (Simulink / SimMechanics)* [Simulation of mechatronic systems in MATLAB (Simulink / SimMechanics)]. Saint Petersburg: NYU YTMO. 2013, 114 p. (in Russian).
8. Yaryzhko O.V., Pekina N.P. *Modeliuvannya skladnykh tekhnichnykh sistem z vykorystanniam paketu Simscape* [Simulation of complex technical systems using the Simscape package]. *Tekhnolohiya pryborostroenyia* [Technology of instrument engineering]. 2017, no. 2, pp. 57-60. (in Ukrainian).
9. Curduman L., Nastac S., Debeleac C. *On active control of transitory regimes within the driving system of a single bucket excavating equipment for the bank-sloping and differential excavation processes*. *Proceedings of the 23rd Int. Congress on Sound&Vibration ICSV23*. 2016, 9 p.
10. Curduman L., Debeleac C., Nastac S. *On path oscillations analysis of mechanical multi-body and hydrostatical driving units coupled system*. *Procedia Engineering*. 2017, no. 181, pp. 518-525. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.428
11. Gurko A., Sergiyenko O., Nieto Hipólito J.I., Kirichenko I., et al. *Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control*. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2016, no. 383, pp. 177-196. DOI: 10.1007/978-3-319-31898-1_10.
12. *SimMechanics Documentation*. Available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sm/>