

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

ВЕРБЕНКО ІРИНА ОЛЕГІВНА

УДК 004.896; 621.875.5

**НЕЧІТКЕ УПРАВЛІННЯ КРАНОВИМИ УСТАНОВКАМИ НА ОСНОВІ
НЕЙРОПОДІБНИХ СТРУКТУР ГЕОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ**

05.13.23 – Системи та засоби штучного інтелекту

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка”

Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Роман Олексійович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
професор кафедри інформаційних технологій
видавничої справи.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Березький Олег Миколайович,
Тернопільський національний економічний університет,
завідувач кафедри комп’ютерної інженерії;

доктор технічних наук, доцент
Гече Федір Елемирович,
ДВНЗ “Ужгородський національний університет”,
завідувач кафедри кібернетики і прикладної математики.

Захист відбудеться “27” листопада 2015 р. о 16⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.14 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Степана Бандери 28а, ауд. 807, V корпус).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська 1).

Автореферат розіслано “26” жовтня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

Батюк А.Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Системи оброблення вантажів є важливою частиною виробничого циклу, в якому вони підтримують технологічні та експлуатаційні операції за допомогою переміщення вантажів всередині виробничих підрозділів та цехів. До подібних виробничих систем належать крани, зокрема, мостові, порталні та інші типи кранів, які використовуються в багатьох галузях промисловості, особливо у металургійній, суднобудівній, авіаційній, машинобудівній, військовій галузях, тощо.

Позиціонування вантажу за допомогою підйомного крану є однією з багатьох проблем, що часто розглядаються в автоматизації, та яку потрібно вирішити, коли автоматизація операцій крану необхідна в системі виробництва. Крім того, проблема зменшення часу перевезення вантажу є також важливою для забезпечення якісної експлуатації крану.

Дослідниками були запропоновані різні способи автоматизованого управління коливаннями вантажу для порталних кранів. Перші роботи з моделювання та управління крановими установками були опубліковані в 1961 році. Алсоп (Alsop C.) та співавтори були першими, хто запропонував стратегію управління вантажем крану, яка полягала в прискоренні контейнера крану з сталим кроком прискорення та припиненні прискорення в момент, коли вантаж досягав нульового кута відхилення. Контейнер рухався з сталою швидкістю протягом усього шляху. Така ж процедура виконувалася і при уповільненні руху вантажу. Карбон (Carbon V.) в 1976 році застосував однокрокову та двокрокову версію цієї стратегії з метою усунення залишкового хитання контейнера. У 1983 Алзінгер (Alzinger E.) та Брозовіц (Brozovic V.) продемонстрували переваги двокрокового прискорення над однокроковим у часі транспортування. Проте, результати також показали значні розхитування контейнера, які то зростали, то зменшувалися.

Дослідження, які ґрунтуються на теорії оптимального управління системами відкритого контуру, а саме, підйомними кранами мостового типу, проводилися Менсоном (Manson G.) (1982), а також, Аурнігом (Auernig J.) і Трогером (Troger H.) (1987). Однак, вони, як й інші автори, використовували підхід відкритого контуру, який є чутливим до зміни параметрів системи. Наприклад, Сінгхос (Singhose W.) (1997) і Парк (Park B.) (2000) запропонували управління на основі техніки формування входів. Проте, ця техніка виявилась неефективною, адже не припинила коливання вантажу остаточно.

В деяких інших роботах були запропоновані способи управління на основі зворотнього зв'язку, який є менш чутливим до змін параметрів системи. Такі способи управління варіюються від використання звичайних ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальних) підходів до інтелектуальних підходів. Омар (Omar H.) (2003) запропонував ПД (пропорційно-диференціальне) управління, що базується на контролюванні двох параметрів: позиції вантажу та кута його відхилення. В свою чергу, Неллі (Nalley M.) та Трабья (Trabia M.) (2000) запропонували управління позицією і кутом відхилення на основі нечіткої логіки. Лі (Lee H.) і Чоу (Cho S.) (2001) запропонували управління зі зворотним зв'язком з використанням нечіткої логіки. Системі управління на базі нечіткої логіки з використанням концепції управління змін-

ними режимами було розроблено для мостових кранів, авторами якої є Лю (Liu D) та інші дослідники (2005). Крім того, нечітка інтелектуальна система для порталних кранів також була запропонована Вагуйді (Wahyudi) та Жалані (Jalani J.) (2005). Запропонована нечітка система складається з контролера положення вантажу і контролера кута його відхилення. Продуктивність запропонованої нечіткої системи порталного крану була експериментально оцінена на лабораторному порталному крані. Було показано, що система має хороше позиціонування та хорошу здатність до демпфування кута відхилення в порівнянні з краном, контрольованим ПІД контролером.

Підходи на основі нечіткої логіки також розглядалися у роботах Ясуноби (Yasunobu S.) та Хасегави (Hasegawa T.), 1986-87 pp.; Ямади (Yamada S.) та ін., 1989 p.; Кіма (Kim M.) та Канга (Kang G.), 1993 p.; Іто (Itoh O.) та ін., 1993 p., 1995 p.; Неллі (Nalley M.) та Трабья (Trabia M.), 1994 p.; Юна (Yoon J.) та ін., 1995 p.; Лянга (Liang Y.) та Коха (Koh K.), 1997 p.; Мендеза (Mendez J.) та ін., 1999 p. Ці підходи виявилися найбільш перспективними з точки зору використання досвіду та знань оператора у системі управління. Однак, у вказаних роботах використовувалися традиційні, часто повільні і неточні продукційні алгоритми, що не забезпечили створення ефективних систем управління. Недоліками представлених нечітких автоматизованих систем управління крановими установками є тривалий час перевезення вантажу, через поступове зменшення кута відхилення, складне технічне обслуговування та висока вартість таких систем.

Таким чином, можна стверджувати, що вирішення наукової задачі створення ефективних методів та засобів нейронечіткого управління для зменшення коливань вантажу під час його транспортування, які володіють покращеними співвідношеннями надійності, точності та швидкості, і можуть бути використані для побудови автоматизованих систем управління порталними кранами, є актуальною і важливою для народного господарства України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до науково-дослідних робіт кафедри інформаційних технологій видавничої справи Національного університету “Львівська політехніка”, та використовувалася у технічних розробках, пов'язаних з інтелектуальною обробкою даних та паралельними обчисленнями, зокрема в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт “Розвиток теорії синтезу нейронних мереж на НВІС-структурах для обробки сигналів в робототехнічних системах”, державний реєстраційний №0112U001204, та “Відслідковування рухомих об'єктів у відеопотоках реального часу”, державний реєстраційний №0115U000432.

Метою дисертаційного дослідження є розроблення методів нейронечіткого управління коливаннями вантажу порталного крану та програмно-алгоритмічних засобів системи автоматизованого управління крановими установками для зменшення коливань вантажу під час його транспортування та пришвидшення функціонування системи в умовах закритих приміщень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести порівняльний аналіз сучасного стану предметної області управління порталними кранами для подальшого розроблення методів та про-

- грамно-алгоритмічних засобів системи управління крановими установками.
2. Розробити метод та елементи архітектури системи імітаційного моделювання управління крановою установкою порталного типу на основі математичної моделі крану для імітації роботи її функцій.
 3. Розробити модель функціонування системи управління порталним краном з використанням нечіткого алгоритму на основі нейроподібної структури геометричних перетворень.
 4. Вдосконалити нейронечіткий контролер для управління коливаннями вантажу кранової установки та на основі досвіду оператора крану сформулювати базу продукційних правил.
 5. Вдосконалити метод корекції вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів для пришвидшення функціонування системи.
 6. Розробити програмно-алгоритмічні засоби системи автоматизованого управління крановими установками з використанням нейронечіткого контролера.

Об'єктом дослідження є процес управління крановими установками.

Предмет дослідження – моделі, методи та засоби нейронечіткого управління динамікою кранових установок.

Методи дослідження. Результати дисертаційних досліджень отримані з використанням теорії диференціальних рівнянь для створення імітаційної моделі порталного крану, теорії нейроподібних структур для моделювання процесу управління представленим продукційними правилами логічних висновків, теорії алгоритмів і програмування для розробки архітектури та програмних засобів, методів теорії нечітких множин для застосування нечіткої моделі управління та теорії оптимального управління для розробки методу корекції початкових умов.

Наукова новизна. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі *нові результати*:

Вперше розроблено:

- метод нейронечіткого управління коливаннями вантажу кранової установки з використанням переналаштування продукційних правил та корекцією початкових умов на кожному кроці функціонування системи, що забезпечує пришвидшення роботи установки.

Вдосконалено:

- метод корекції коливань вантажу крану, який, за рахунок введення додаткових нечітких правил, забезпечує підвищення точності компенсації коливань у випадках зміни ситуацій функціонування;
- імітаційну модель управління крановою установкою шляхом об'єднання математичної моделі порталного крану і нечіткої моделі управління, що забезпечує моделювання роботи системи в цілому.

Отримав подальший розвиток:

- метод налаштування нечітких правил і вузлів фазифікації для управління крановими установками на основі використання генетичного алгоритму, що пришвидшує процес переналаштування системи при зміні умов функціонування.

Практична цінність одержаних результатів. Вирішення сформульованих завдань є основою побудови методів нейронечіткого управління коливаннями вантажу порталного крану та програмно-алгоритмічних засобів системи автоматизованого управління крановими установками для зменшення коливань вантажу під час його транспортування та пришвидшення функціонування системи в умовах закритих приміщень. Запропоновані програмно-алгоритмічні засоби системи орієнтовані на крани порталного типу, проте, при незначних доопрацюваннях їх можна застосувати також для стрілових типів кранів.

Отримана в процесі дисертаційних досліджень модель функціонування системи управління порталним краном з використанням нечіткого алгоритму на основі нейроподібної структури геометричних перетворень забезпечує зменшення коливань вантажу порталного крану під час його перевезення, що позитивно впливає на швидкість його транспортування та продуктивність роботи кранової установки в цілому. Удосконалена імітаційна модель управління крановою установкою забезпечує моделювання роботи системи та може бути використана для розроблення контролера управління, що вбудовується в систему управління крановою установкою.

Особливістю розроблених програмно-алгоритмічних засобів автоматизованої системи управління є їх приналежність до категорії, яка використовує нечіткі методи управління, що використовують нейронечіткий контролер для реалізації знань та досвіду оператора крану у вигляді продукційних правил для управління системою. Експериментальні дослідження підтвердили високу точність у виборі відповідного значення потужності, яке надається крану, що покращує процес управління та забезпечує зменшення коливань вантажу в середньому на 30%.

В процесі дисертаційних досліджень розроблено та удосконалено метод корекції вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів на основі використання генетичного алгоритму, який забезпечує швидке демпфування кута відхилення і зменшення кількості ітерацій роботи кранової установки, що в середньому становить 25%, що впливає на час перевезення одного контейнера і на продуктивність виконання циклу перевезень загалом. Окрім цього, метод налаштування нечітких правил і вузлів фазифікації на основі використання генетичного алгоритму пришвидшує процес переналаштування системи управління краном при зміні умов функціонування.

Розроблені на основі отриманих методів алгоритми були реалізовані на мові програмування C# з використанням технології Portable Class Library. Це дає можливість використання даного коду на різних операційних системах: Windows XP/7/8.

Розроблені програмно-алгоритмічні засоби мають модульну структуру, що дозволяє використати програмні реалізації алгоритмів управління, як складові частини комп'ютерних систем управління коливаннями вантажу порталних кранів.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В публікаціях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: метод нейронечіткого управління коливаннями вантажу кранової установки [2, 5, 9], структура системи імітаційного моделювання управління крановою установкою [1, 4, 10], формування бази продукційних правил для управління крановими установками [3, 11], метод корекції коливань вантажу крану та метод на-

лаштування нечітких правил і вузлів фазифікації [6], модель функціонування системи управління з використанням нечіткого алгоритму [7, 8].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації обговорювались на 5 науково-технічних міжнародних конференціях, зокрема:

1. The VIIth International Scientific and Technical Conference “Computer Science and Information Technologies” (CSIT-2012), (Lviv, November 20-24, 2012) / Lviv Polytechnic National University. – Lviv: Lviv Polytechnic, 2012.
2. The multiconference of International Congress on Control and Information Processing (ICCIP’2013), (Cracow, December 7-8, 2013) / Cracow University of Technology. – Cracow, 2013.
3. Міжнародна наукова конференція “Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту”, (Херсон, 20-24 травня 2013) / ХНТУ.– Херсон, 2013.
4. The IXth International Scientific and Technical Conference “Computer Science and Information Technologies” (CSIT-2014), (Lviv, November 18-22, 2014) / Lviv Polytechnic National University. – Lviv: Lviv Polytechnic, 2014.
5. Міжнародна наукова конференція “Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту”, (Залізний порт, 25-28 травня 2015) / ХНТУ.– Залізний порт, 2015.

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 11 друкованих праць, серед них 2 наукометричні (з імпаکت фактором), 4 статті у наукових фахових виданнях України та 5 публікацій у збірниках праць наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел із 150 найменувань та двох додатків. Обсяг дисертації 142 сторінки, основна частина викладена на 112 сторінках. Робота ілюструється 59 рисунками і 2 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Подано відомості про апробацію результатів роботи та публікації, зазначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено літературний аналіз методів та засобів управління крановими установками. Виділено три основні способи управління портальними кранами: ручне управління, коли оператор крану відповідає за весь процес управління, управління на основі традиційних методів, як, наприклад, на основі ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальних) контролерів та нечітких методів управління.

Серед досліджуваних систем управління крановими установками найкращими показниками володіють системи на основі нечіткої логіки. Такі системи доцільно застосовувати для складних процесів, коли немає простої математичної моделі, а

також, якщо експертні знання про об'єкт або процес можна сформулювати тільки в лінгвістичній формі. Нечіткі системи описують вхідні та вихідні дані у вигляді простих фраз, таких, як їх використовує і розуміє людина-оператор.

Аналіз найбільш застосовуваних алгоритмів нечіткого виведення виявив такі їх недоліки, як неоднозначність процедури дефазифікації та істотні обчислювальні витрати. Також, використання, наприклад, алгоритму Сугено є недоцільним, якщо параметри моделі змінюються залежно від конфігурації, характеру чи величини навантаження, тому, що потрібно створювати окремі моделі для кожної з ділянок області розбиття для формування відповідних керуючих впливів, що може істотно впливати на швидкодію системи.

Однак, до недоліків розглянутих нечітких автоматизованих систем управління крановими установками відносять тривалий час перевезення вантажу, через поступове зменшення кута відхилення, складне технічне обслуговування та високу вартість таких систем.

Проведений аналіз предметної області засвідчив актуальність наукової задачі розроблення ефективних методів нейронечіткого управління та програмних засобів для автоматизованих систем управління крановими установками, які забезпечуватимуть безпечно та швидко транспортування вантажу без значних його коливань під час перевезення. У відповідності до цього, визначено основні завдання наукового дослідження, викладеного у дисертаційній роботі.

У **другому розділі** викладено розроблення системи імітаційного моделювання управління крановою установкою порталного типу на основі математичної моделі крану.

Математична модель крану була створена дослідником Філдом (J.A. Field) у 1961 році. У 1991 році, дослідниками Бутлером (H. Butler), Хондердом (G. Honderd) та Амеронгеном (J. van Amerongen), було розроблено математичну модель порталного крану на основі характеристик маятника, за допомогою якої було розроблено динамічне рівняння, як основу моделі порталного крану. Метод Лагранжа використовується для отримання динамічної моделі системи. При такому підході, єдиним вхідним значенням в систему будемо вважати F_c .

Для використання підходу Лагранжа потрібно розрахувати загальну потенціальну і кінетичну енергії системи.

Відповідно до визначення відліку, показаному на рис. 1, абсолютні декартові координати центру тяжіння маятника характеризуються такими значеннями:

$$x_p(t) = x_c(t) + l_p \sin(\alpha(t)) \text{ та } y_p(t) = -l_p \cos(\alpha(t)). \quad (1)$$

Обчислимо загальну потенціальну енергію V_T системи. Потенціальна енергія в системі - це кількість енергії, яку ця система, або її елементи, витратили, або витрачають у зв'язку з якоюсь роботою по відношенню до неї. Це, як правило, обумовлено його вертикальним переміщенням від нормальності (гравітаційна потенціальна енергія) або за допомогою такого собі пружинного переміщення (еластична потенціальна енергія).

У цій системі немає пружинно-потенціальної енергії. Потенціальна енергія системи виникає тільки через силу тяжіння. Контейнер лінійно рухається в горизонта-

льному напрямку, і, таким чином, не має вертикального зсуву. Звідси, повна потенціальна енергія повністю виражається гравітаційно-потенціальною енергією маятника, і обчислюється за формулою нижче:

$$V_T = -M_p g l_p \cos(\alpha(t)). \quad (2)$$

Як видно з рівняння (2), повна потенціальна енергія може бути виражена тільки в межах узагальненої координати (координат).

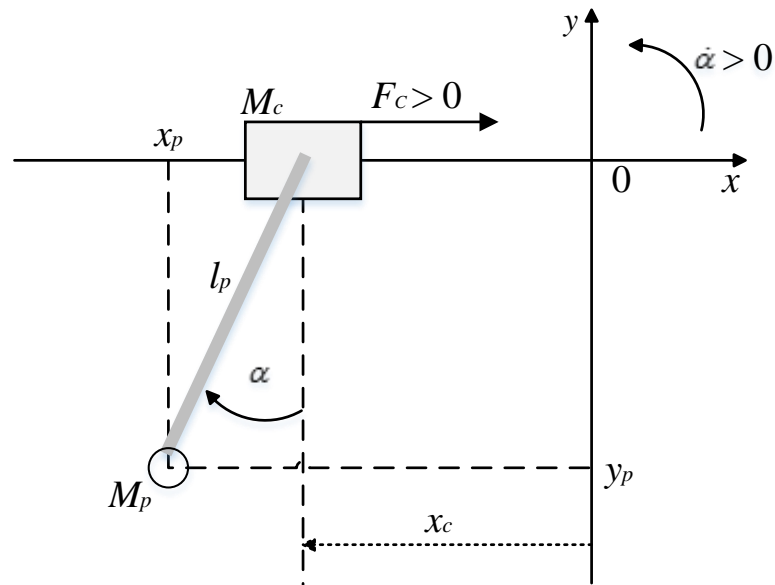


Рисунок 1 – Схема портального крану на основі моделі маятника

Подальшим кроком є обчислення загальної кінетичної енергії T_T системи. Кінетична енергія вимірює кількість енергії в системі через її рух. У цій системі, повна кінетична енергія дорівнює сумі поступальної і обертальної кінетичної енергії, що виникають як від контейнера (по відношенню до напрямку переміщення контейнера, є ортогональними до обертання його ротора), так і від його встановленого портального маятника (по відношенню до розміщення портального маятника, є ортогональними до його обертання).

По-перше, напрямок руху кінетичної енергії моторизованого контейнера, T_{ct} , визначається таким чином:

$$T_{ct} = \frac{1}{2} M \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right)^2. \quad (3)$$

По-друге, кінетичну енергію обертання, за допомогою двигуна постійного струму контейнера, T_{cr} , можна охарактеризувати, як:

$$T_{cr} = \frac{1}{2} \frac{J_m k_g^2 \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right)^2}{r_{mp}^2}. \quad (4)$$

Таким чином, в результаті рівнянь (3) і (4), повна кінетична енергія контейнера, T_c , може бути представлена таким чином:

$$T_c = \frac{1}{2} M_c \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right)^2, \quad \text{де} \quad M_c = M + \frac{J_m K_g^2}{r_{mp}^2}. \quad (5)$$

Маса такого маятника концентрується у його центрі гравітації. Таким чином, напрямок кінетичної енергії маятника, T_{pt} , може бути виражений як функція лінійної швидкості гравітації його центру, що визначається таким рівнянням:

$$T_{pt} = \frac{1}{2} M_p \sqrt{\left(\frac{d}{dt} x_p(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} y_p(t) \right)^2}, \quad (6)$$

де лінійна швидкість x -координати в центрі тяжіння маятника визначається, як:

$$\frac{d}{dt} x_p(t) = \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right) + l_p \cos(\alpha(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right), \quad (7)$$

і лінійна швидкість y -координати в центрі тяжіння маятника визначається, як:

$$\frac{d}{dt} y_p(t) = l_p \sin(\alpha(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right). \quad (8)$$

Крім того, кінетичну енергію обертання маятника, T_{pr} , можна охарактеризувати, як:

$$T_{pr} = \frac{1}{2} I_p \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right)^2. \quad (9)$$

Таким чином, повна кінетична енергія системи є сумою чотирьох індивідуальних кінетичних енергій, які описані в (5), (6), (7), (8) та (9). Після проведення всіх необхідних операцій, повна кінетична енергія системи, T_T , зводиться до такого рівняння:

$$T_T = \frac{1}{2} (M_c + M_p) \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right)^2 + M_p l_p \cos(\alpha(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right) \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right) + \frac{1}{2} (I_p + M_p l_p^2) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right)^2. \quad (10)$$

Як видно з рівняння (10), повна кінетична енергія може бути виражена в межах обох узагальнених координат та їх перших похідних.

Розглянемо тепер рівняння Лагранжа для поточної системи. Два рівняння Лагранжа, в результаті раніше визначених двох узагальнених координат, x_c і α , мають такий вигляд:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \frac{d}{dt} x_c(t) \right) L - \left(\frac{\partial}{\partial x_c} L \right) = Q_{x_c}, \quad (11)$$

та

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \frac{d}{dt} \alpha(t) \right) L - \left(\frac{\partial}{\partial \alpha} L \right) = Q_{\alpha}. \quad (12)$$

У рівняннях (11) і (12), L - це Лагранжіан, що визначається таким чином:

$$L = T_T - V_T. \quad (13)$$

У рівнянні (11), Q_{x_c} - це узагальнена сила, що застосовується на узагальненій координаті x_c .

Аналогічним чином, в рівнянні (12), Q_{α} - це узагальнена сила, що застосовується на узагальненій координаті α . Узагальнені сили системи можна визначити таким чином:

$$Q_{x_c}(t) = F_c(t) - B_{eq} \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right) \quad \text{та} \quad Q_{\alpha}(t) = -B_p \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right). \quad (14)$$

Слід зазначити, що нелінійним тертям Кулона, що застосовується до лінійного контейнера, було знехтувано. Крім того, силою, що діє на лінійний контейнер через дії маятника, було також знехтувано в розробленій на даний момент моделі.

Розрахунок рівняння (11) призводить до більш явного представлення першого рівняння Лагранжа, такого, як:

$$\begin{aligned} (M_c + M_p) \left(\frac{d^2}{dt^2} x_c(t) \right) + M_p l_p \cos(\alpha(t)) \left(\frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) \right) - M_p l_p \sin(\alpha(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right)^2 = \\ = F_c - B_{eq} \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Крім того, обчислення рівняння (12) також призводить до більш явного вигляду другого рівняння Лагранжа, як показано нижче:

$$\begin{aligned} M_p l_p \cos(\alpha(t)) \left(\frac{d^2}{dt^2} x_c(t) \right) + (I_p + M_p l_p^2) \left(\frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) \right) + \\ + M_p g l_p \sin(\alpha(t)) = -B_p \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Результатом розв'язку системи двох рівнянь Лагранжа, представлених вище в рівняннях (15) та (16), для похідної за часом другого порядку двох координат Лаг-

ранжа, є такі два нелінійні рівняння:

$$\frac{d^2}{dt^2} x_c(t) = \left(-(I_p + M_p l_p^2) B_{eq} \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right) + (M_p^2 l_p^3 + I_p M_p l_p) \sin(\alpha(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right)^2 + \right. \\ \left. + M_p l_p \cos(\alpha(t)) B_p \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right) + (I_p + M_p l_p^2) F_c + M_p^2 l_p^2 g \cos(\alpha(t)) \sin(\alpha(t)) \right) / \\ / ((M_c + M_p) I_p + M_c M_p l_p^2 + M_p^2 l_p^2 \sin(\alpha(t))^2) \quad (17)$$

та

$$\frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) = \left(-(M_c + M_p) M_p g l_p \sin(\alpha(t)) - (M_c + M_p) B_p \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right) - \right. \\ \left. - M_p^2 l_p^2 \sin(\alpha(t)) \cos(\alpha(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right)^2 + M_p l_p \cos(\alpha(t)) B_{eq} \left(\frac{d}{dt} x_c(t) \right) - \right. \\ \left. - F_c M_p l_p \cos(\alpha(t)) \right) / \\ / ((M_c + M_p) I_p + M_c M_p l_p^2 + M_p^2 l_p^2 \sin(\alpha(t))^2) \quad (18)$$

Рівняння (17) та (18) являють собою рівняння руху системи.

Після лінеаризації нелінійної одинарної моделі порталного крану отримаємо наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \ddot{x}_c(t) \\ \ddot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1.5216 & -11.6513 & 0.0049 \\ 0 & -26.1093 & 26.8458 & -0.0841 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{x}_c(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.5304 \\ -3.5261 \end{bmatrix} \cdot F_c(t), \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{x}_c(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Параметри рівнянь (17) і (18), наведені в табл. 1. Лінійні рівняння руху (19) і (20), обчислюються після заміни $\cos(\alpha) = 1$ і $\sin(\alpha) = \alpha$ в (17) і (18), та використовуючи параметри з табл. 1.

Таблиця 1. Опис та значення параметрів з рівнянь (17) та (18)

Параметр	Опис
$B_{eq} = 5.4 [Nms / rad]$	Коефіцієнт еквівалентного плавного загасання шестерні двигуна

Продовження табл. 1.

$B_p = 0.0024 [Nms / rad]$	Коефіцієнт плавного загасання осі маятника
$\eta_g = 1$	Ефективність коробки передач
$\eta_m = 1$	ККД двигуна
$g = 9.81 [m / s^2]$	Гравітаційна постійна Землі
$I_p = 0.0078838 [kg \cdot m^2]$	Момент інерції маятника
$J_m = 3.9001e - 007 [kg \cdot m^2]$	Момент інерції ротора
$K_g = 3.71$	Співвідношення передач коробки передач
$K_m = 0.0076776$	Постійна повернута електрорушійна сила (ЕРС)
$K_t = 0.007683$	Постійний крутний момент двигуна
$l_p = 0.3302 [m]$	Довжина маятника від точки до центра ваги
$M_c = 1.0731 [kg]$	Зосереджена маса системи контейнера, в тому числі інерція ротора
$M_p = 0.23 [kg]$	Маса маятника
$R_m = 2.6 [\Omega]$	Опір якоря двигуна
$r_{mp} = 0.00635 [m]$	Радіус шестерні двигуна

Система диференціальних рівнянь була розв'язана двома методами, Ейлера та Рунге-Кутта. Результати експериментів показали, що імітаційна модель за використання методу Ейлера дає кращі результати в порівнянні з методом Рунге-Кутта.

Для забезпечення моделювання роботи системи управління в цілому математичну модель портального крану об'єднано з нечіткою моделлю управління. Аналіз найбільш поширених та застосовуваних продукційних систем виявив, що основним недоліком цих систем є неоднозначність процедури дефазифікації отриманого нечіткого результату. Широко використовуваною є дефазифікація за методом центру тяжіння, методом бісектриси площі, методом медіани, методом центру максимумів, методом першого максимуму, методом лівого модального значення, методом правого модального значення та іншими. Кожен з традиційних алгоритмів нечіткого виведення використовує різні методи дефазифікації для переведення нечіткого значення у чітке, наприклад, у алгоритмах Мамдані та Ларсена зазвичай використовуються методи центру тяжіння та бісектриси площі, а у алгоритмах Цукамото та Сугено, всі вище перелічені методи дефазифікації. Кожен з методів дефазифікації формує інший результат, що й, як наслідок, передбачає тривалий процес налагодження при створенні подібних систем.

Таким чином, для моделювання системи портального крану використано та адаптовано продукційну систему під назвою T-Controller, яка забезпечує інший підхід до дефазифікації, що передбачає однозначність даної процедури та нульову методичну похибку її виконання.

Базова особливість дефазифікації полягає в тому, що вона відноситься до задач

виродженого типу. В системі T-Controller функцію дефазифікації виконує лінійна нейронна мережа на основі моделі геометричних перетворень, яка за визначенням орієнтована на розв'язок вироджених або майже вироджених задач. Як результат, було обрано систему нечіткого виведення T-Controller за наступні її переваги над іншими системами:

- об'єднання в єдиний крок логічного виведення (and) і композиції (or);
- кількість правил обумовлена особливостями тільки вихідних змінних;
- процедура побудови правил є інтуїтивно зрозумілою для фахівців з аналізу можливих ситуацій для вихідної змінної;
- висока точність T-Controller – має нульову методичну похибку дефазифікації (чим точніші “входи”, тим точніші “виходи”);
- процедура налаштування прискорена;
- висока швидкість та простота реалізації як в програмному, так і в апаратному варіантах.

Удосконалено нечітку систему управління коливаннями вантажу на основі демонстраційної програми “slcp”, розроблену в програмі MatLab, яка застосовується для моделювання маятника та використовує нечіткий алгоритм Sugeno.

Порівняльні результати роботи нечітких систем управління на основі Sugeno та T-Controller контролерів наведено на рис. 2, де зображено значення кута відхилення вантажу крану на кожній ітерації роботи програми. З наведених результатів видно, що максимальне значення кута в середньому досягає +/- 1,45 рад при роботі системи із використанням продукційної системи Sugeno, та +/- 0,45 рад при роботі системи із використанням продукційної системи T-Controller.

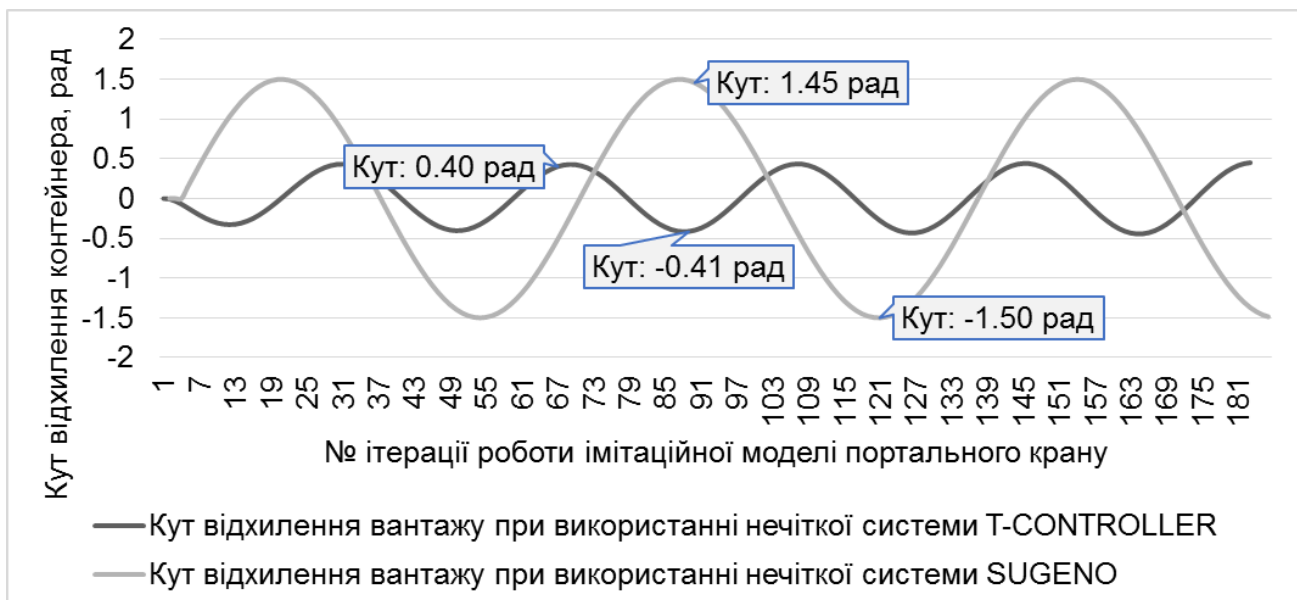


Рисунок 2 – Результати роботи імітаційної моделі портального крану на основі контролера Сугено

На підставі проведених експериментів доведено, що розроблена система автоматизованого управління коливаннями вантажу портального крану на базі нейроне-

чіткого контролера T-Controller забезпечує ефективнішу роботу за допомогою надання відповідного значення потужності на основі значень кута та позиції контейнера, що забезпечує приблизно на 30% кращі результати у порівнянні з нечіткою системою Sugeno.

Третій розділ присвячений розробленню структури та моделі управління коливаннями вантажу на базі нейронечіткого контролера та основних продукційних правил роботи автоматизованої системи. Основною метою управління порталними кранами є якнайшвидше перевезення вантажу, під час чого не буде заподіяно ніякої шкоди середовищу та людям. Управління коливаннями вантажу порталного крану полягає у використанні контролерів кута та позиції вантажу для визначення кута відхилення відносно вертикальної вісі та позиції вантажу відносно стартової точки перевезення. Значення кута та позиції є входними параметрами для моделі нечіткого контролера, який використовується для визначення потужності для крану, що є вихідним параметром для моделі нечіткого контролера і входним параметром для імітаційної моделі порталного крану. Нечітка модель управління використовує нечіткі правила, які розроблені на основі досвіду та знань оператора крану, для визначення такої потужності, що надається крану у відповідний момент, яка б забезпечила якісне та швидке перевезення вантажу з мінімальними коливаннями під час руху.

Процес автоматизації управління крановою установкою можна розділити на дві частини: операційну та управляючу. Операційна частина є складовою частиною порталного крану. До управляючої частини можна віднести комп'ютер. Виробничий комп'ютер повинен бути обладнаний аналогово-цифровим перетворювачем для передачі значень кута та позиції вантажу, отриманих з контролерів на комп'ютер (програмне забезпечення системи автоматизованого управління), та цифрово-аналоговим перетворювачем для передачі визначеного системою значення потужності на порталний кран (див. рис. 3).

В той час, оператор крану може знаходитись у кабіні управління, або на робочому майданчику, в залежності від виду та параметрів крану, який використовується. Перед початком роботи кранової установки операторові крану потрібно налаштувати систему. Після налаштування система може працювати автоматично від моменту її запуску до моменту зупинення, що може бути виконано або з пульта керування, або з кабіни управління.

Нейронечіткий контролер використовує нечіткі правила управління, які сформовані на основі дій оператора крану під час управління ним. Процес управління краном оператором виглядає наступним чином: оператор підіймає контейнер за допомогою крану, надає крану середню потужність двигуна, щоб побачити, наскільки розхитається контейнер. В залежності від реакції, він регулює потужність двигуна, щоб втримати контейнер трохи позаду "голови" крану. У цьому положенні максимальна швидкість може бути досягнута з мінімальним впливом. Ближче до кінцевої позиції оператор знижує потужність двигуна. Таким чином, контейнер стає трохи вперед "голови" крана і майже досягає потрібного місця. Потім потужність двигуна збільшуємо так, щоб "голова" крану знаходилася над об'єктом і при цьому розхитування було наближене до нуля. У цьому випадку немає диференціальних рівнянь, необхідних для реалізації такого процесу, а різного роду порушення та нелінійність

компенсується спостереженням оператора за позицією контейнера та регулюванням ним швидкості переміщення вантажу.

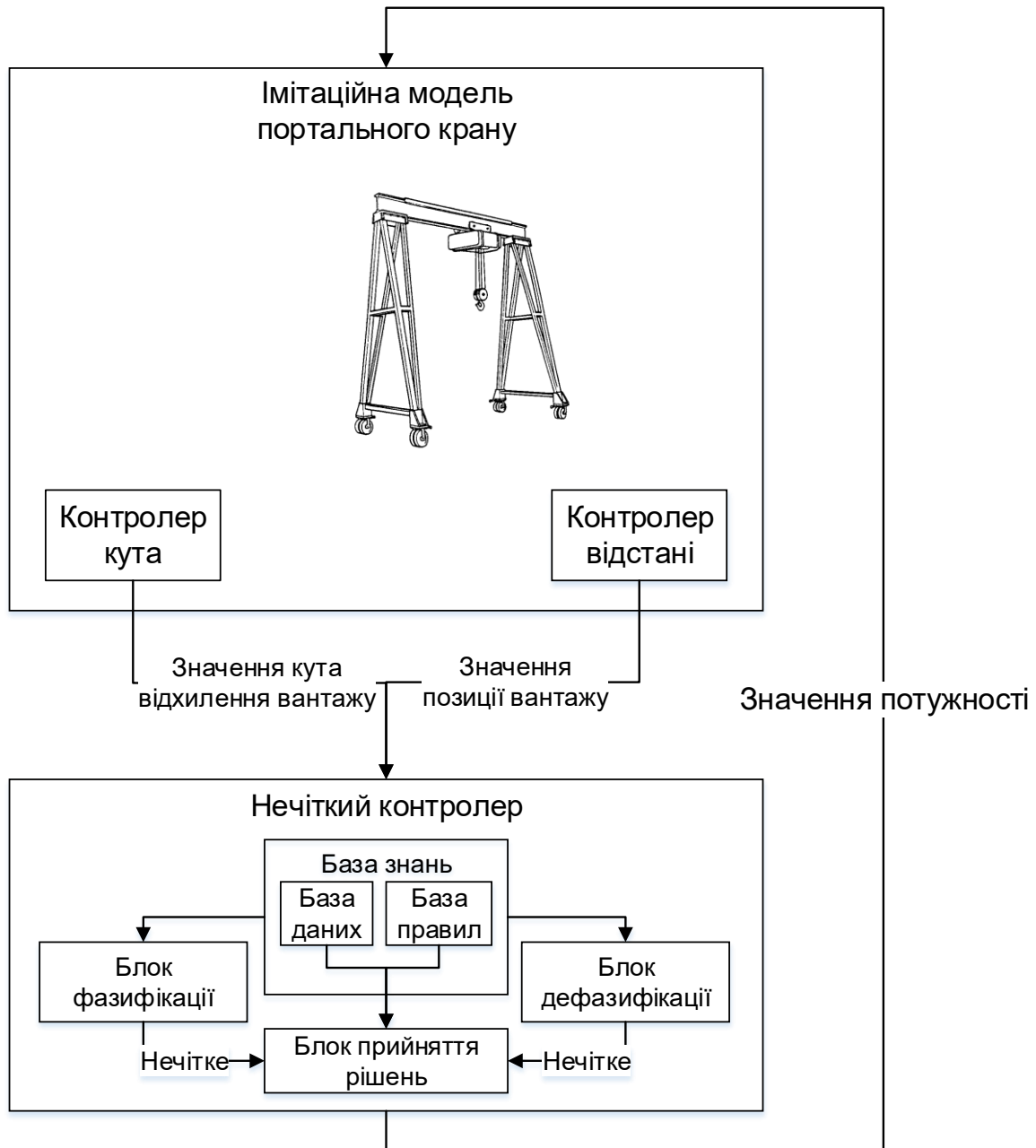


Рисунок 3 – Схема автоматизованого управління системою крану

З метою автоматизації управління портальним краном без залучення оператора крану у процес перевезення вантажу сформовано базу продукційних правил, які використовуються у нечіткій моделі управління. Нечіткі продукційні правила побудовані на основі використання таких вхідних параметрів як “відстань” контейнера від стартової точки перевезення та “кута” його відхилення, які подаються на систему з відповідних контролерів, що є інстальованими на кранову установку. Використовуючи ці два входи для опису поточного стану контейнера крану, сформовано шість основних нечітких правил для визначення правильного значення потужності:

1. Якщо Відстань = далеко / Кут = нуль,
То Швидкість = позитивна середня.
2. Якщо Відстань = далеко / Кут = негативний малий,
То Швидкість = позитивна велика.
3. Якщо Відстань = далеко / Кут = негативний великий,
То Швидкість = позитивна середня.
4. Якщо Відстань = середня / Кут = негативний малий,
То Швидкість = негативна середня.
5. Якщо Відстань = близько / Кут = позитивний малий,
То Швидкість = негативна середня.
6. Якщо Відстань = нуль / Кут = нуль,
То Швидкість = нуль.

У нечітких правилах для управління контейнером крану, описаних вище, кожна ситуація визначається двома умовами. Перша умова описує значення відстані, друга - значення кута. Умови об'єднані оператором "І", що говорить про те, що обидві умови повинні обов'язково виконуватись для відповідної ситуації. Кількість правил є необмеженою, тому при потребі можна додати більше правил, які будуть детальніше описувати роботу системи та дії, що вона повинна виконувати у конкретних ситуаціях.

Корекція вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів на основі генетичного алгоритму. Для пришвидшення роботи кранової установки удосконалено метод корекції коливань вантажу крану, який за рахунок введення додаткових нечітких правил забезпечує підвищення точності компенсації коливань у випадках зміни ситуацій функціонування. Метод корекції використовує генетичний алгоритм для корекції входів і виходу системи. Оскільки генетичний алгоритм є недетермінованим і результат його роботи залежить від генетичних операторів, необхідно строго визначити значення для відповідних параметрів, щоб досягнути найкращого результату. В розробленій системі управління використано такі параметри: розмір вибірки – 30-40; тип хромосоми – бінарний; довжина хромосоми – 32; метод відбору – елітний; схрещування – 0,75; мутація – 0,1; номер епохи – 3.

Результати даного дослідження були перевірені експериментально. Змодельовано роботу розробленої системи з використанням різних значень мінімальної та максимальної потужності та застосуванням різної кількості згенерованих нечітких правил із та без використання генетичного алгоритму для корекції вхідних та вихідної змінних з метою пришвидшення роботи кранової установки. Процес моделювання роботи кранової установки з використанням корекції вузлів фазифікації на основі генетичного алгоритму (рис. 4) складається з таких кроків:

1. Автоматично генеруються правила нечіткої логіки із застосуванням генетичного алгоритму.
2. Контролер ініціалізується з автоматично згенерованими правилами.
3. Процес моделювання запускається.
4. На контролер подаються початкові дані: кут і відстань.

5. Контролер на основі правил і вхідних параметрів генерує відповідне значення потужності для кранової установки.
6. Значення потужності передається до моделі крану.
7. Модель крану обчислює відстань і кут відхилення вантажу, які будуть вхідними параметрами для контролера на наступній ітерації.
8. Три попередні кроки повторюються доти, поки вантаж не досягне точки призначення.

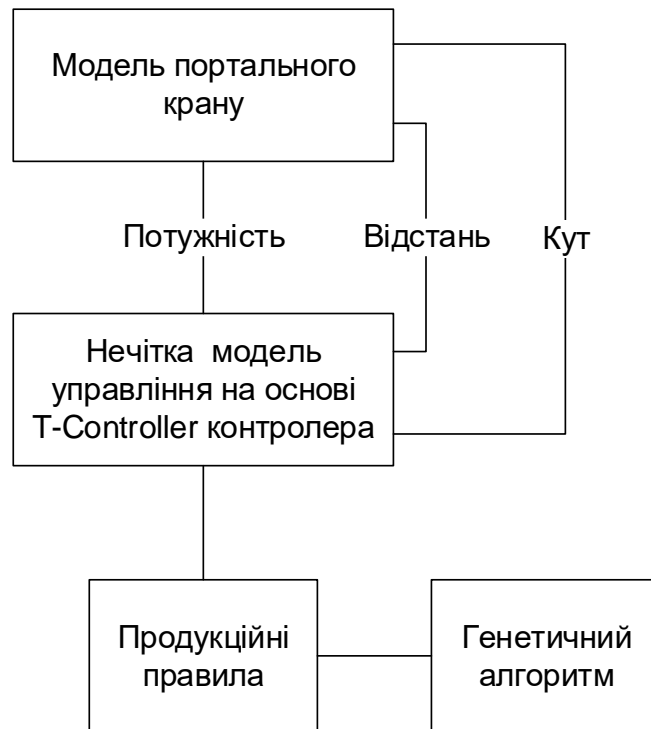


Рисунок 4 – Діаграма залежності модулів автоматизованої системи управління коливаннями вантажу із використанням корекції вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів

Порівняльний аналіз моделювання системи управління крановими установками з та без використання корекції вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів на основі генетичного алгоритму зображено на рис. 5 та рис. 6. На рис. 5 показано як коливався кут відхилення вантажу під час роботи імітаційної моделі порталного крану. Як видно з результатів кут знаходиться в межах від $-0,3$ до $+0,4$ рад при моделюванні роботи крану із та без застосування корекції вхідних та вихідного параметрів. Проте, з графіку видно, що коливання контейнеру стають практично нульовими вдвічі швидше, при моделюванні роботи системи із застосуванням корекції, що забезпечує швидше транспортування та якісніше перевезення.

На рис. 5 показано як змінювалася потужність під час роботи імітаційної моделі порталного крану. При моделюванні без застосування корекції більшість ітерацій крану надавалась мінімальна, практично нульова потужність для того, щоб зберегти коливання контейнера мінімальними під час транспортування. Перевезення вантажу виконувалось протягом 10 тис. ітерацій. При моделюванні із застосуванням корекції крану надається максимальна потужність на початку його роботи, що суттєво впли-

ває на кут відхилення вантажу, після чого подається мінімальна потужність, щоб зменшити коливання і стабілізувати положення контейнера, і далі потужність змінюється до середнього значення, що забезпечує швидше перевезення за меншу кількість ітерацій.

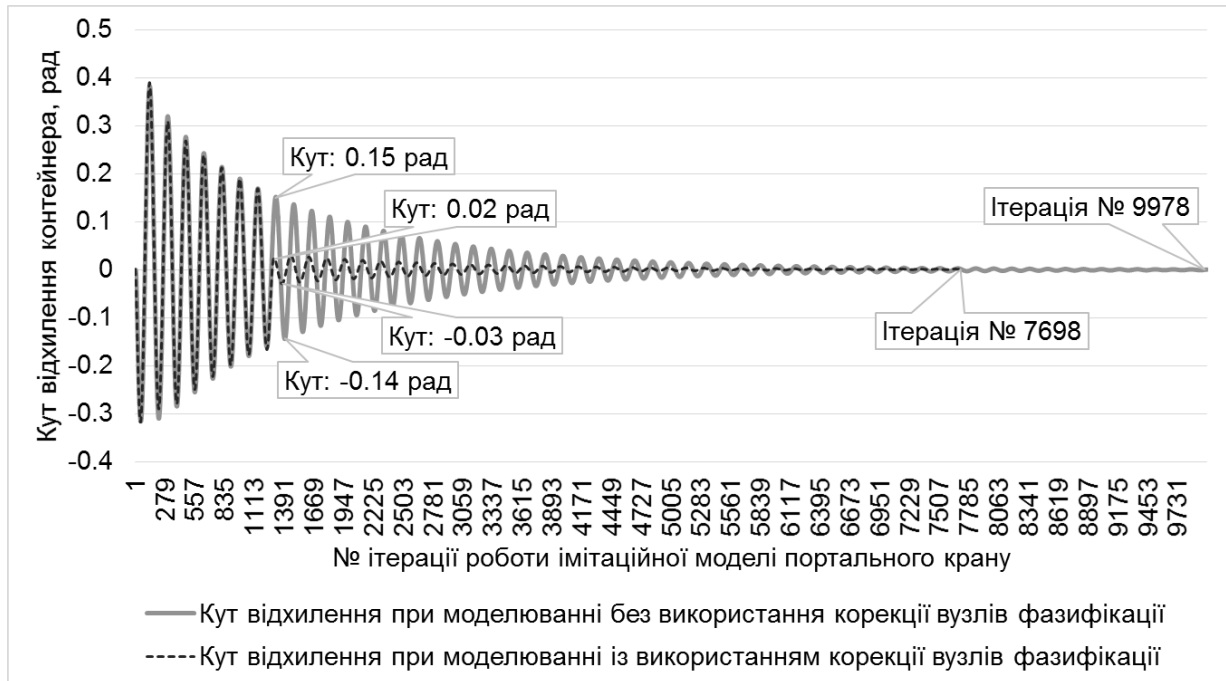


Рисунок 5 – Порівняння зміни кута відхилення при моделюванні роботи системи із застосуванням методу корекції та без нього

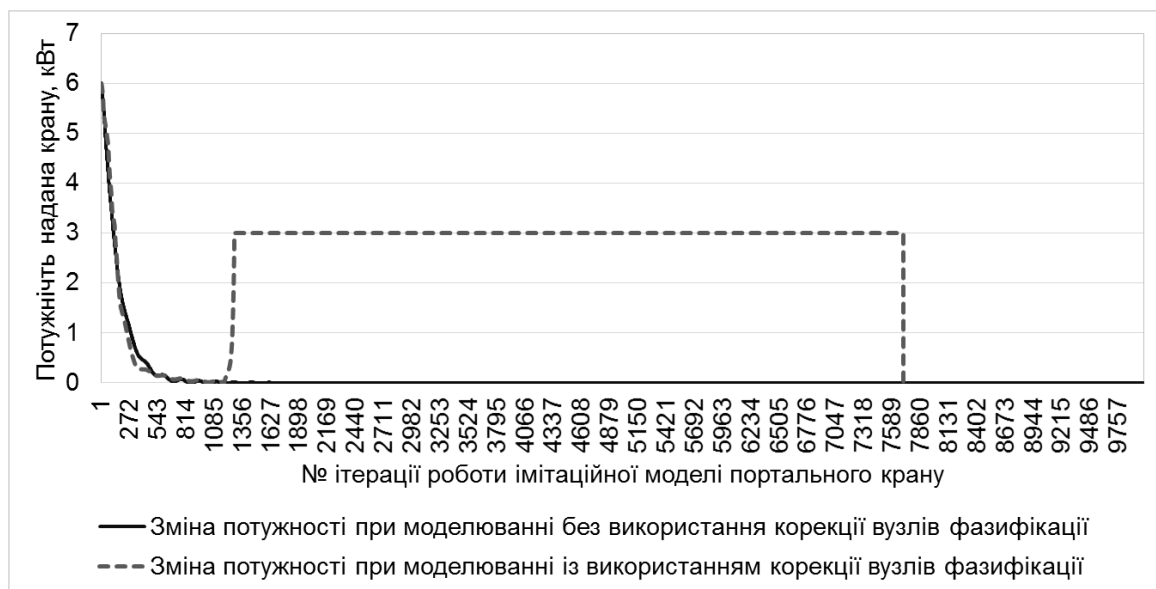


Рисунок 6 – Порівняння зміни потужності при моделюванні роботи системи із застосуванням методу корекції та без нього

На підставі проведених експериментів доведено, що удосконалений метод корекції вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів на основі використання генетичного алгоритму забезпечує швидке демпфування кута відхилення і зменшення кількості ітерацій роботи кранової установки, що в середньому становить 25%,

які впливають на час перевезення одного контейнера і продуктивність виконання циклу перевезень загалом. Окрім цього, метод налаштування нечітких правил і вузлів фазифікації на основі використання генетичного алгоритму пришвидшує процес переналаштування системи управління краном при зміні умов функціонування.

У **четвертому розділі** викладено програмну реалізацію методів та системи імітаційного моделювання крановою установкою портального типу, розробленої на основі математичної моделі крану.

Розроблені програмно-алгоритмічні засоби автоматизують процес управління портальним краном, а також, забезпечують можливість генерації та корекції правил нечіткої логіки, які використовуються для управління крановою установкою. Модель враховує такі характеристики крану, як потужність і чутливість до змін робочих параметрів. Автоматизована корекція вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів реалізована на основі генетичного алгоритму. Для ефективного використання корекції вузлів фазифікації необхідно правильно налаштувати такий набір параметрів генетичного алгоритму: тип хромосоми і її довжину, тип методу для визначення найкращої хромосоми, фітнес функцію для обчислення корисного значення хромосоми, розмір популяції, рівень мутації та схрещування, кількість епох для досягнення достатнього (кращого) результату.

Результат моделювання роботи кранової установки не тільки виводиться на екран, а й автоматично зберігається у файл. Разом з результатом моделювання зберігаються і правила для можливості їх подальшого аналізу та вивчення. Також, користувач має можливість, у випадку потреби, самостійно корегувати правила після їх автоматичної генерації.

Розроблене програмне рішення реалізоване на мові програмування C# з застосуванням архітектурного дизайн-паттерну MVVM (Model-View-ViewModel). Використання цього паттерну забезпечує високий рівень модульності програмного рішення, що дає можливість легкої заміни тих чи інших компонентів, як інтерфейсної так і функціональної частин.

Усі програмні модулі, окрім користувацького інтерфейсу, реалізовані на технології Portable Class Library. Це забезпечило створення однієї реалізації усіх необхідних методів і функцій елементів системи автоматизованого управління крановими установками для різних платформ (операційних систем).

Програмне рішення складається з двох частин: користувацького інтерфейсу та ядра, в якому розміщено програмну реалізацію усіх розроблених методів та алгоритмів. Розгорнута схема ядра наведена на рис. 7. Компоненти ядра поділяються на групи. Частина з них відповідає за безпосереднє обчислення, а інші автоматизують і спрощують використання перших. Програмний код розділений на логічні частини і винесений в окремі класи, дотримуючись загальних принципів ООП (об'єктно-орієнтованого програмування).

Загальну схему програмного рішення можна логічно розділити на менші частини: обчислення системи диференціальних рівнянь, автоматична генерація нечітких правил на основі вибраних/заданих параметрів, корекція правил на основі генетичного алгоритму, використання T-Controller-а, моделювання роботи крану на основі отриманих результатів.

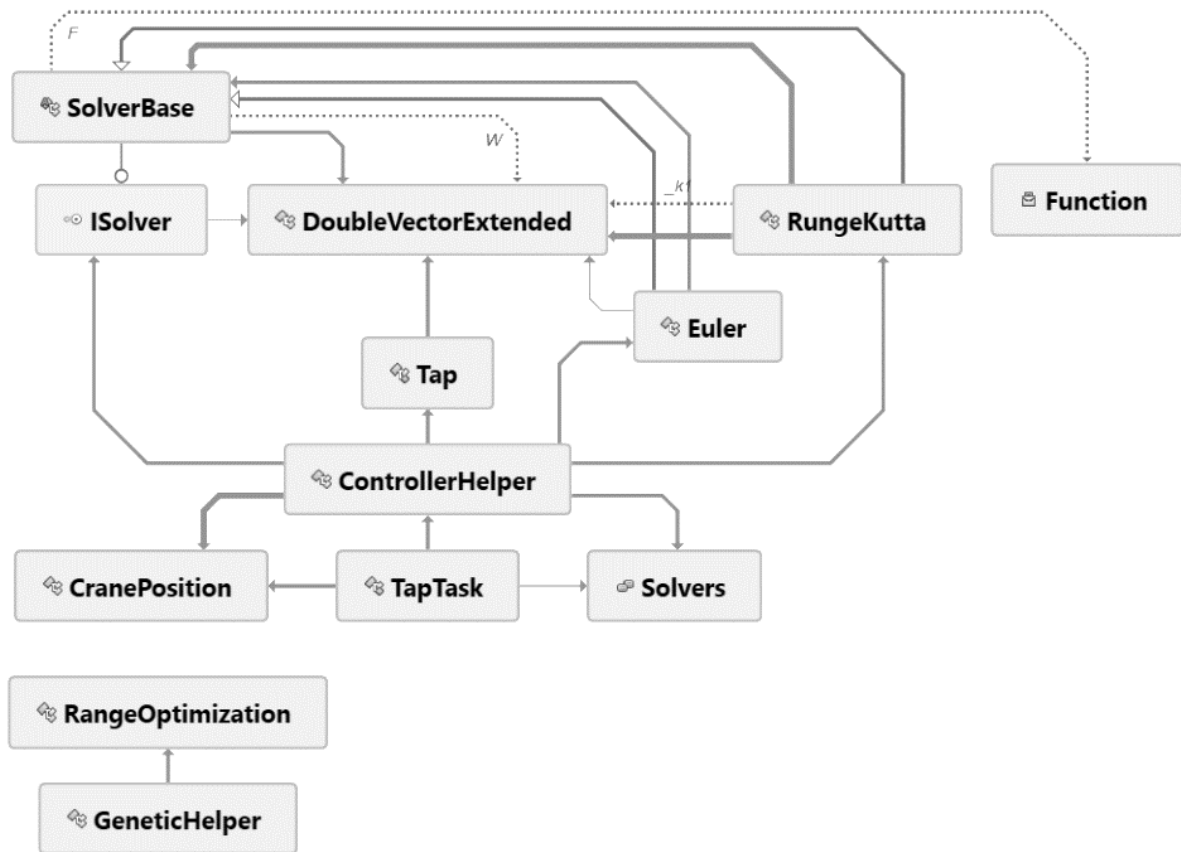


Рисунок 7 – Розгорнута схема ядра програмного рішення

ISolver – інтерфейс який описує публічні функції, їх сигнатуру (вхідні параметри) і тип результату, що повинен імплементувати клас для обчислення системи диференціальних рівнянь. SolverBase – загальний код, який є спільним для всіх (Euler та RungeKutta) методів розв’язування диференціальних рівнянь. Цей клас є абстрактним та імплементує інтерфейс ISolver частково. Класи Euler і RungeKutta відповідають за реалізацію однойменних методів обчислення системи диференціальних рівнянь. Ці класи наслідуються від SolverBase в найкращих принципах ООП: інкапсуляції, наслідування і поліморфізму водночас. ControllerHelper забезпечує інтеграцію і взаємодію розробленої системи з контролером нечіткої логіки. Модулі GeneticHelper та RangeOptimization реалізують метод корекції продукційних правил за допомогою генетичного алгоритму. Генетичний алгоритм можна налаштувати за допомогою таких параметрів:

- Розмір популяції (вибірки).
- Тип хромосоми:
 - бінарна хромосома;
 - текстова хромосома;
 - хромосома перестановок.
- Розмір хромосоми (її довжина).
- Метод відбору (селекційний):
 - елітний;
 - ранговий;

- колеса рулетки.
- Показник рівня схрещування.
- Показник рівня мутації.
- Кількість епох для досягнення бажаного результату.

Результати роботи програми (продукційні правила та табличні дані з результатами моделювання роботи кранової установки: номер ітерації, кут відхилення вантажу від точки рівноваги, відстань на яку переміщений вантаж, застосована потужність крану в даний момент часу) можуть бути збережені у вигляді текстового файлу для подальшого їх аналізу та дослідження.

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні було розв'язано актуальну наукову задачу, яка полягає у розробленні нових методів нейронечіткого управління коливаннями вантажу порталного крану та програмно-алгоритмічних засобів системи автоматизованого управління крановими установками для зменшення коливань вантажу під час його транспортування та пришвидшення функціонування системи в умовах закритих приміщень.

Отримано такі науково-практичні результати:

1. Аналіз сучасного стану предметної області управління крановими установками виявив, що більшість порталних кранів є неавтоматизованими або напівавтоматизованими, де за процес перевезення вантажу відповідає оператор крану, тому є потреба в розробленні нових ефективних методів нейронечіткого управління та програмних засобів для автоматизованих систем управління порталними кранами, які забезпечать безпечне і швидке транспортування вантажу без значних його коливань під час перевезення та повну автоматизацію основних функцій кранових установок.

2. Розроблено метод та елементи архітектури системи імітаційного моделювання управління крановою установкою порталного типу на базі математичної моделі крану. Вхідним параметром для імітаційної моделі порталного крану є потужність, а вихідними параметрами – кут відхилення відносно вертикальної вісі та позиція вантажу відносно стартової точки перевезення. Результати практичних експериментів підтвердили високу точність у виборі відповідного значення потужності, яке надається крану, що покращує процес управління та забезпечує зменшення коливань вантажу під час перевезення в середньому на 30%, в порівнянні з існуючими системами.

3. Розроблено модель функціонування системи управління порталним краном з використанням нечіткого алгоритму на основі нейроподібної структури геометричних перетворень. Основою розробленої моделі функціонування системи управління на основі нечіткої логіки є перетворення неформальних правил експертного контролю в чітку стратегію управління.

4. Удосконалено нейронечіткий контролер для управління коливаннями вантажу кранової установки та сформовано базу продукційних правил на основі досвіду та знань оператора крану.

5. Удосконалено метод корекції вузлів фазифікації вхідних та вихідного пара-

метрів на основі використання генетичного алгоритму, який забезпечує швидке демпфування кута відхилення і зменшення кількості ітерацій роботи кранової установки, що в середньому становить 25%, які впливають на час перевезення одного контейнера і продуктивність виконання циклу перевезень загалом. Окрім цього, метод налаштування нечітких правил і вузлів фазифікації на основі використання генетичного алгоритму пришвидшує процес переналаштування системи управління краном при зміні умов функціонування.

6. Розроблені, на основі отриманих теоретичних та практичних результатів дисертаційного дослідження, програмно-алгоритмічні засоби, які реалізують отримані методи нейронечіткого управління коливаннями вантажу порталного крану і корекції вузлів фазифікації вхідних та вихідного параметрів та імітаційну модель управління крановою установкою.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Verbenko I. Fuzzy methods and tools for crane management system based on T-Controller / I. Verbenko, R. Tkachenko // *Journal of Global Research in Computer Science*. – March, 2013. – Vol. 4, No. 3. – P. 1 - 4.
2. Verbenko I. Gantry and bridge cranes neuro-fuzzy control by using neural-like structures of geometric transformations / I. Verbenko, R. Tkachenko // *Technical Transactions, series Automatic Control* – 2013. – Vol. 3-AC/2013. – P. 53 - 68.
3. Ткаченко Р.О. Лінгвістична стратегія управління крановими установками / Р.О. Ткаченко, І.О. Вербенко // *Науковий вісник національного лісотехнічного університету України*. – Львів, 2015. – Вип. 25.4. – С. 309 - 313.
4. Вербенко І.О. Система управління коливанням вантажу крана на базі нейронечіткого контролера / І.О. Вербенко // *Науковий вісник національного лісотехнічного університету України*. – Львів, 2015. – Вип. 25.5. – С. 183 - 186.
5. Ткаченко Р.О. Методи та засоби управління крановими установками / Р.О. Ткаченко, І.О. Вербенко, І.О. Малець // *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. – Львів, 2015. – №11. – С. 63 - 71.
6. Ткаченко Р.О. Процес управління коливанням вантажу крана з коректуванням вузлів фазифікації / Р.О. Ткаченко, І.О. Вербенко, М.Т. Бринецький // *Науковий вісник національного лісотехнічного університету України*. – Львів, 2015. – Вип. 25.6. – С. 183 - 187.
7. Verbenko I. Gantry and bridge cranes neuro-fuzzy control by using neural-like structures of geometric transformations / I. Verbenko, R. Tkachenko // *International Congress on Control and Information Processing (ICCIP'13) : Materials of the multiconference, Cracow, 7-8 December 2013*. – Cracow, 2013.
8. Tkachenko R. A fuzzy control scheme of the gantry crane cart's position / R. Tkachenko, O. Tkachenko, I. Verbenko, O. Mishchuk // *Computer Science and Information Technologies (CSIT-2012) : Proceedings of the VIIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, 20-24 November 2012*. – Lviv: Lviv Polytechnic, 2012. – P. 174 - 176.

9. Tkachenko R. Management process and control strategy for crane management system / R. Tkachenko, I. Verbenko // Computer Science and Information Technologies (CSIT-2014) : Proceedings of the IXth International Scientific and Technical Conference, Lviv, 18-22 November 2014. – Lviv: Lviv Polytechnic, 2014. – P. 128 - 129.
10. Ткаченко Р.О. Нейронечітке управління коливанням кошику крану / Р.О. Ткаченко, І.О. Вербенко, О.С. Міщук // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI-2013) : матеріали міжнародної наукової конференції, Херсон, 20-24 травня 2013. – Херсон, 2013. – С. 302 - 304.
11. Вербенко І.О. Лінгвістичні правила для автоматизованої системи управління порталними кранами / І.О. Вербенко, Р.О. Ткаченко // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI-2015) : матеріали міжнародної наукової конференції, Залізний Порт, 25-28 травня 2015. – Залізний Порт, 2015. – С. 261 - 262.

АНОТАЦІЯ

Вербенко І.О. Нечітке управління крановими установками на основі нейроподібних структур геометричних перетворень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – *системи та засоби штучного інтелекту*, Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2015.

Дисертація присвячена розробленню методу та елементів автоматизованої системи управління крановими установками порталного типу. Основна увага спрямовується на системи, які базуються на нечіткій методології управління, тобто такі, які використовують досвід оператора крану для реалізації процесу управління. Недоліками існуючих автоматизованих систем управління кранами є їх низька швидкість транспортування вантажу, та його коливання під час перевезення.

Розроблено методи нейронечіткого управління та елементи автоматизованої системи управління крановими установками на їх основі, що використовує нейронечіткий контролер T-Controller для управління коливаннями вантажу під час його перевезення від точки до точки. Нечіткий контролер використовує продукційні правила управління, які побудовані на основі знань та досвіду оператора крану. Перевагами даного нейронечіткого контролера є його висока точність та швидкодія, а також прискорена процедура налаштування та простота в реалізації.

Розроблена модель управління коливаннями вантажу базується на основі контролювання кута відхилення вантажу та його відстані відносно стартової точки транспортування, що забезпечує плавне та швидке перевезення вантажу без значних його коливань під час руху.

Розроблено метод корекції вузлів фазифікації вхідних параметрів, який базується на застосуванні генетичного алгоритму, завдяки якому забезпечується точність вибору відповідного значення потужності, що надається крану, при певних заданих значеннях кута та відстані вантажу, що впливає на швидкість процесу транспортування.

Ключові слова: кранова установка, порталний кран, вантаж, нечітка логіка, нейронечіткий контролер.

ABSTRACT

I. Verbenko. Fuzzy control of crane installations based on neural structures of geometric transformations. – Manuscript.

Thesis for a Candidate degree in Technical Science by speciality 05.13.23 – *systems and tools of artificial intelligence*. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to the development and improvement of neurofuzzy methods for employing them in the automated gantry crane system. Systems of load handling is an important part of the production cycle where they support technological and operational operations with the help of transporting goods within production units and production plants. These industrial systems such as bridge, gantry and other types of cranes are used in many industries.

The main focus of this paper concentrates on the problem of load positioning during crane work. This problem is very interesting in terms of process automation and widely studied in the work of various researchers because of the need to solve the problem of swinging regulation in the crane management systems. This problem is also important in an increasingly high requirements that relate to the expected timing and accuracy of the loop during crane operations handling in automated production processes.

During researching there was created model of gantry crane management system on the basis of fuzzy algorithms using neural-like structures of geometric transformations which reduces load swinging during its transportation by gantry crane. Swing reducing positively affects the speed and performance of transportation.

The feature of developed program-algorithmic tools of automated management system is they belong to a category that uses fuzzy control methods that implements knowledge and experience of a crane operator in form of fuzzy production rules for managing the system. Experimental studies have confirmed the high accuracy in choosing the appropriate value of power provided to the crane which improves control process and ensures reducing the load swinging.

In addition, there are developed and improved a method of fuzzification knots correction of input and output parameters on the basis of genetic algorithm. This method provides fast deflection damping and reduces the number of iterations of crane working process affecting the transportation of one container and the performance of the transportation cycle in general. Besides that, method of fuzzy rules and fuzzification knots setting based on genetic algorithm speeds up the process of reconfiguring the crane control system during changing conditions functioning.

Based on the theoretical and practical results of the research work there was developed the software solution that implements developed methods of neurofuzzy control of load swinging and correction of fuzzification knots. Developed software could be used on Windows platforms. The developed algorithmic tools have a modular structure that allows the implementation of the software control algorithms be used as components of computer systems for managing gantry crane load swinging.

Key words: crane installation, gantry crane, load, fuzzy logic, neuro-fuzzy controller.

АННОТАЦИЯ

Вербенко И.О. Нечеткое управление крановыми установками на основе нейрореподобных структур геометрических преобразований. – Рукопись.

Диссертация для получения научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.23 – *системы и средства искусственного интеллекта*, Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2015.

Диссертация посвящена разработке методов и элементов автоматизированной системы управления крановыми установками порталного типа. Основное внимание направляется на системы, основанные на нечеткой методологии управления, то есть такие, которые используют опыт оператора крана для реализации процесса управления. Недостатком существующих автоматизированных систем управления кранами является их низкая скорость транспортировки груза, и его колебания во время перевозки.

Разработаны методы нейронечеткого управления и элементы автоматизированной системы управления крановыми установками на их основе, использует нейронечеткий контроллер T-Controller для управления колебаниями груза при его перевозке от точки к точке. Нечеткий контроллер использует продукционные правила управления, построенные на основе знаний и опыта оператора крана. Преимуществами данного нейронечеткого контроллера является его высокая точность и быстродействие, а также ускоренная процедура настройки и простота в реализации.

Разработанная модель управления колебаниями груза базируется на основе контроля угла отклонения груза и его расстояния относительно стартовой точки транспортировки, что обеспечивает плавную и быструю перевозку груза без значительных его колебаний во время движения.

Разработан метод коррекции узлов фаззификации входных параметров, который базируется на применении генетического алгоритма, благодаря которому обеспечивается точность выбора соответствующего значения мощности, предоставляемой крану, при определенных заданных значениях угла и расстояния груза, что влияет на скорость процесса транспортировки.

Ключевые слова: крановая установка, порталный кран, груз, нечеткая логика, нейронечеткой контроллер.

Підписано до друку 19.10.2015.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Зам. № 07/21.
Ум. друк. арк. 0,96.
Тираж 120 прим.

ТзОВ “Простір-М”
Свідоцтво ДК № 2167 від 21.04.2005 р.
79000, м. Львів, вул. Чайковського, 8
Тел.: (032) 261-09-05, e-mail: prostir@litech.net