

## АНОТАЦІЯ

*Рижков О.М.* Динамічне керування приводами автоматизованого крана-маніпулятора. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – інститут Електродинаміки, НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена створенню автоматизованої системи позиційного керування електроприводами крана-маніпулятора при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка забезпечує підвищення швидкодії та точності позиціонування вантажу крана в умовах динамічної зміни характеристик навантаження та збурень.

В енергетичній галузі, зокрема на атомних електростанціях, в технологічних лініях використовуються крани-маніпулятори для транспортування спеціальних матеріалів, яке вимагає підвищеної точності позиціонування вантажу та потребує виконання жорстких умов безпеки. Такі установки, наприклад, установки дезактивації металевих відходів, є унікальними і тому для створення системи керування рухом крана-маніпулятора неможливо застосовувати підходи, які зазвичай використовують для загальнопромислових кранів. На швидкодію та точність позиціонування робочого органу такого крану впливають невизначеність масо-інерційних характеристик вантажу, що транспортується, а також неідеальність конструкції механічної частини крана. Система керування приводами крану-маніпулятора повинна забезпечити динамічні характеристики, які гарантують відхилення реального положення вантажу від заданої траєкторії руху, що не перевищують встановлені значення у відповідності до вимог безпеки.

Проведено аналіз існуючих систем автоматичного керування електроприводами кранів, з якого випливає, що точність керування (позиціонування) в таких системах залежить: від точності відпрацювання кутового положення валу приводного двигуна, на якому встановлено давач положення, від впливу неідеальної кінематики системи, що потребує синхронізації приводів при переміщенні вантажу,

від наявності коливань вантажу і динамічної зміни характеристик приводу і середовища, в яке цей вантаж опускають, та потребує відповідної компенсації змін навантаження і збурень.

Розроблено імітаційну модель механічної системи крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів, проведено моделювання та аналіз статичних і динамічних режимів роботи приводних механізмів крану (моста, візка і вантажопідйомного пристрою) при переміщеннях вантажу (відпрацюванні технологічного процесу) у трьох координатах.

Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків за імітаційною моделлю крана-маніпулятора та за лінеаризованим математичним описом. Отримані результати свідчать про адекватність моделі та дають можливість в подальшому здійснювати моделювання приводних механізмів мостових кранів у складі систем керування положенням вантажу.

Синтезовано систему керування швидкістю поступального переміщення крану-маніпулятора за допомогою лінійного керування зі змінними параметрами, яка ефективно гасить коливання вантажу, що переміщується мостовим краном, з урахуванням зміни довжини каната.

Вдосконалено метод керування краном-маніпулятором і представлено рішення проблеми оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу при переміщенні крану, отримане шляхом синтезу системи зі зворотним зв'язком за вектором стану і спостерігачем стану Люенбергера третього порядку на підставі лінеаризованої моделі зі змінними параметрами. Адаптація середньогометричного кореня характеристичного полінома і коефіцієнтів регулятора стану до зміни довжини каната дозволяє зменшити амплітуду коливань вантажу при розгоні і гальмуванні візка, і ліквідувати їх на ділянці руху з постійною швидкістю і в цільовій точці.

З отриманих результатів зроблено висновок про доцільність використання для приводу телескопічної колони крана-маніпулятора системи регулювання положення.

Розроблено математичну модель механічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів, яка адекватно відображає такі особливості технологічного

процесу як зміну моменту статичного опору та моменту інерції приводу при зануренні кошика з вантажем у дезактивууючий розчин, миттєве зменшення швидкості кошика до нуля та відділення маси кошика від маси колони при досягненні кошиком дна ванни.

Визначено, що застосування в електроприводі вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора системи регулювання швидкості при будь-якій похибці у розрахунку тахограми призводить до ривків при досягненні кошиком дна ванни (що зумовлює розплескування дезактивууючого розчину та неприпустиме занурення колони вантажопідйомного пристрою або її деталей у дезактивууючий розчин) чи до зависання кошика над дном та порушення процесу відокремлення кошика від колони.

Розроблено Simulink-моделі систем частотного керування електроприводами моста та візка крана-маніпулятора з використанням живлення двох двигунів від загального та індивідуальних перетворювачів частоти, зроблено порівняльний аналіз та визначено оптимальні стратегії керування, які підвищують швидкодію і точність позиціонування крана.

Аналіз стратегій керування показав, що кращі результати для скалярної системи є «Master-Slave» та «Mean control», які мають високу швидкодію систем і в результаті велику точність позиціонування візка, а саме при стратегії керування «Master-Slave» похибка позиціонування склала  $2.3 \cdot 10^{-5}$  м при допустимій 0.02 м та при «Mean control»  $2 \cdot 10^{-5}$  м, що являється достатньо високою точністю позиціонування та відповідає поставленим вимогам. Різниця швидкостей при таких стратегіях є невеликою і присутня лише при розгоні та гальмуванні, з чого можна дійти висновку, що фактично пробуксовування коліс візка є маловірогідним.

Встановлено, що при використанні системи векторного керування та двох перетворювачів частоти отримаємо результати з похибками позиціонування: при відсутності компенсації -  $1.6 \cdot 10^{-5}$  м, а з компенсацією -  $8 \cdot 10^{-6}$  м, що свідчить про велику точність позиціонування.

Розроблено Simulink-моделі систем частотного керування електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, зроблено порівняльний аналіз та визначено оптимальну стратегію керування, яка підвищує швидкодію і точність позиціонування вантажу крана.

Синтезовано систему позиційного електроприводу із задаючим пристроєм, пропорційно-інтегральним регулятором швидкості та лінійним пропорційним регулятором положення, яка задовольняє вимогам технологічного процесу (а саме вимогам позиціонування) і може бути рекомендовано для вантажопідійомних пристроїв кранів-маніпуляторів.

Розроблено систему автоматичного керування на базі програмованих логічних контролерів, в якій виконано програмну реалізацію розроблених алгоритмів керування автоматизованим краном-маніпулятором.

Новизна роботи полягає в наступному. Вперше розроблено імітаційну модель механічної системи крану-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка дозволяє проводити моделювання та аналіз статичних і динамічних режимів роботи приводних механізмів крану при переміщеннях вантажу (відпрацюванні технологічного процесу) у трьох координатах.

Вдосконалено метод керування краном-маніпулятором для оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу при переміщенні крану, з урахуванням зміни довжини каната, який полягає у синтезі системи модального керування зі зворотним зв'язком за вектором стану і спостерігачем стану Люенбергера третього порядку, який відновлює кут відхилення вантажу від вертикалі та його кутову швидкість, на підставі лінеаризованої моделі зі змінними параметрами.

Вперше розроблено математичну модель механічної частини системи електроприводу вантажопідійомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів, в якій враховано зміну моменту статичного навантаження, зумовлену дією виштовхувальної сили при зануренні вантажу у технологічну ванну обмеженого об'єму з рідиною, та зміну моменту інерції приводу після досягнення вантажем дна ванни.

Вдосконалено метод керування за положенням електроприводом вантажопідійомного пристрою крана-маніпулятора, який підвищує швидкодію і точність позиціонування вантажу крана та полягає у синтезі системи позиційного керування з задаючим пристроєм, пропорційно-інтегральним регулятором швидкості та лінійним пропорційним регулятором положення.

Практичне значення одержаних результатів полягає в доведенні надійності запропонованої системи керування електроприводами мостового крана-маніпулятора та створенні наукової бази для синтезу системи керування електроприводами крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів.

Розроблена імітаційна модель механічної системи крану-маніпулятора може бути використана для дослідження процесів переміщення вантажу при одночасній роботі моста, візка і вантажопідйомного пристрою любого іншого крана-маніпулятора.

Використання запропонованих систем керування дозволяє виключити можливість переїзду чи недоїзду робочого органу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора при зануренні в технологічну ванну обмеженого об'єму з рідиною за рахунок розроблених методів керування та датчиків положення. При цьому виключається використання складних механічних посадочних пристроїв для точного позиціонування.

Розроблені методи та системи керування можуть бути використані для розробки нових методів частотного керування будь-якими іншими електроприводами спеціалізованих кранів-маніпуляторів.

Результати виконаних в дисертації досліджень (моделі механічної системи крана-маніпулятора, алгоритми автоматичного керування електроприводами крана) використано компанією ТОВ «НТФ ТЕМС» при створенні системи позиційного керування електроприводами мостового крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів на ДП «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» ВП «Рівненська атомна електростанція», що підтверджено відповідним актом. Реалізована система позитивно зарекомендувала себе при використанні.

*Ключові слова:* кран-маніпулятор, модель, автоматизована система, система керування, вантажопідйомний пристрій.

*Список публікацій здобувача*

1. Стяжкин В.П., Подейко П.П., Зайченко О.А., Гаврилук С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-

- манипулятора для установки дезактивації металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 19 (95). С. 71-74. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2015\\_19\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2015_19_17) (дата звернення: 10.9.2020). Назва з екрану. (Особистий внесок – розробка функціональної схеми системи керування)
2. Рижков О.М., Кондратенко І.П., Толочко О.І., Стяжкін В.П. Шляхи побудови системи автоматичного керування краном-маніпулятором. *XXIV міжнародна конференція з автоматичного керування: Автоматика-2017*, м. Київ, Україна, 13-15 вересня, 2017. С. 104-105. Режим доступу: <https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/7.pdf#page=104> (дата звернення: 10.9.2020). Назва з екрану. (Особистий внесок – інформаційний пошук та аналіз літературних даних)
  3. Толочко О.І., Стяжкін В.П., Рижков О.П. Дослідження процесів руху механізмів мостового крана при їх одночасній роботі методом математичного моделювання з використанням віртуальних механічних блоків бібліотеки Simmechanics пакету Matlab. *Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електропривода. Силова електроніка та енергоефективність*. 2017, вип. 27 (1249). С.48-52. Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/34131> (дата звернення: 10.9.2020). Назва з екрану. (Особистий внесок – розробка віртуальної моделі механічної системи крана)
  4. Толочко О.І., Рижков О.М. Синтез та аналіз системи модального керування крановим механізмом поступального руху з врахуванням роботи підйимального механізму. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 131-134. Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.131> (дата звернення: 10.9.2020). Назва з екрану. (Особистий внесок – синтез спостерігача стану для оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу)
  5. Толочко О.І., Стяжкін В.П., Рижков О.М. Керування вантажопідйомним пристроєм крана-маніпулятора під час опускання вантажу у ванну з агресивною рідиною. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С.46-51. Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.046> (дата звернення: 10.9.2020). Назва з

екрану. (Особистий внесок – синтез метода керування електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора)

*Патенти на корисні моделі:*

Система інтелектуального керування краном-маніпулятором установки дезактивації радіоактивних металів: пат. на кор. модель 145193 Україна: МПК В60W 20/00 (2016.01), В66С 17/00 (2006.01). № u2020 03975; заявл. 24.06.2020; опубл. 25.11.2020, Бюл. №22. 4 с.

Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи розглядалися на міжнародних наукових і науково-практичних конференціях:

1. XXIV Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика 2017» (м. Київ, 13-15 вересня 2017р., форма участі – усна доповідь)
2. XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 5-8 червня 2018р., форма участі – усна доповідь)

## ANNOTATION

*Ryzhkov O.M.* Dynamics control of electrical drives for the bridge crane with manipulator. – Qualifying scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a doctor of philosophy science degree in speciality 141, “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”.– the institute of Electrodynamics of the NASU, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to creation of the automated system of positional control of electric drives. For the crane manipulator witch working in technological process as a part of radioactive metals decontamination system. This system used for providing increasing of speed and accuracy for the cargo positioning in conditions of dynamic change of characteristics of loading and disturbances.

In the energy sector, in particular at nuclear power plants, process lines use cranes to transport special materials, which requires increased accuracy of cargo positioning and requires strict safety conditions. Such installations, such as metal waste decontamination plants, are unique and therefore it is not possible to use the approaches commonly used for general industrial cranes to create a crane-manipulator movement control system. The speed and accuracy of positioning of the working body of such a crane under the influence by the uncertainty of the mass-inertial characteristics of the transported cargo, as well as the imperfection of the design of the mechanical part of the crane. The control system of the manipulator crane drives must provide dynamic characteristics that guarantee the deviation of the actual position of the load from the specified trajectory, not exceeding the set values in accordance with safety requirements.

The analysis of existing systems of automatic control of electric drives of cranes was carried out, from which it follows that the accuracy of control (positioning) in such systems depends: on accuracy of angular position in drive motor shaft on which the position sensor is established. Movement of the load, from the presence of oscillations of the load and the dynamic change of the characteristics of the drive and the environment in which the load is lowered, and requires appropriate compensation for changes in load and disturbances.



A simulation model of the mechanical system of the crane-manipulator as a part of the installation of decontamination of radioactive metals is developed, modeling and analysis of static and dynamic modes of operation of crane drive mechanisms (bridge, trolley and lifting device) during cargo movements (technological process testing) in three coordinates.

A comparative analysis of the results of calculations on the simulation model of the crane-manipulator and on the linearized mathematical description is carried out. The obtained results testify to the adequacy of the model. This model make possible simulating the drive mechanisms of bridge cranes and using it in load position control systems.

A system for controlling the speed of translational movement of the crane-manipulator with the help of linear control with variable parameters has been synthesized, which effectively dampens the oscillations of the load moving by the bridge crane, taking into account the change in the rope length.

A new solution to the problem of eliminating oscillations of a load moving by a crane mechanism of translational motion and a lifting device, obtained by synthesizing a system with feedback on the state vector and a third-order Luenberger state observer based on a linearized model with variable parameters. Adaptation of the geometric mean root of the characteristic polynomial and the coefficients of the state regulator to change the length of the rope allows reducing the amplitude of oscillations of the load during acceleration and braking of the truck, and eliminating them in the area of movement at constant speed and at the target point.

From the obtained results, it is concluded that it is expedient to use a position control system for the drive of the telescopic column of the crane-manipulator.

A mathematical model of the mechanical part of the electric drive system of the load-lifting device of the crane-manipulator of the radioactive metal decontamination unit has been developed. This adequately reflects such features of the technological process as the change of static resistance moment and drive moment of inertia when immersing the mass of the basket from the mass of the column when the basket reaches the bottom of the bath.

It is determined that using speed control for the hoisting device of the crane-manipulator make the errors in the calculation of the tachogram and leads to jerks when the

basket reaches the bottom of the bath. This causes splashing of decontamination solution, unacceptable immersion before the basket hangs over the bottom, and the process of separating the basket from the column is disrupted.

Simulink-models of frequency control systems of bridge electric drives and truck crane trolleys using power supply of two motors from common and individual frequency converters are developed, comparative analysis is made and optimal control strategies are determined, which increase crane speed and accuracy. The analysis of control strategies showed that the best results for the scalar system are "Master-Slave" and "Mean control". Which have high system performance and as a result high accuracy of trolley positioning, namely with the control strategy "Master-Slave" positioning error was  $2.3 \cdot 10^{-5}$  m with a permissible 0.02 m and with "Mean control"  $2 \cdot 10^{-5}$  m, which is a fairly high positioning accuracy and meets the requirements. The difference in speeds in such strategies is small and is present only during acceleration and braking, from which it can be concluded that the actual slippage of the wheels of the cart is unlikely.

It is established that when using a vector control system and two frequency converters we get results with positioning errors: in the absence of compensation  $1.6 \cdot 10^{-5}$  m, and with compensation  $8 \cdot 10^{-6}$  m, which indicates high accuracy of positioning.

Simulink-models of frequency control systems of the electric drive of the load-lifting device of the crane-manipulator are developed, the comparative analysis is made and the optimum control strategy, which increases speed and accuracy of positioning of cargo of the crane, is defined.

A positional electric drive system with a master device, a proportional-integrated speed controller and a linear proportional position controller has been synthesized, which satisfies the requirements of the technological process (namely positioning requirements) and can be recommended for hoisting devices of manipulator cranes. An automatic control system based on programmable logic controllers has been developed, in which the software implementation of the developed control algorithms for the automated crane-manipulator has been performed.

The novelty of the work is as follows. For the first time a simulation model of the mechanical system of the manipulator crane was developed as a part of the radioactive metal

decontamination unit, which allows modeling and analysis of static and dynamic modes of crane drive mechanisms during cargo movements (technological process testing) in three coordinates.

The method of control of the crane-manipulator for optimum on speed of damping of fluctuations when moving the crane is improved. Also taking into account change of length of a rope, which consists in synthesis of system of modal control with feedback on a vector of a condition from the vertical and its angular velocity, based on a linearized model with variable parameters.

For the first time a mathematical model of the mechanical part of the electric drive system of the hoisting device of the crane-manipulator of the radioactive metal decontamination unit was developed, which takes into account the change of static load moment due to the action of the ejection force. cargo bottom of the bath.

The method of position control of the electric lifting device of the crane-manipulator has been improved, which increases the speed and accuracy of positioning of the crane load and consists in the synthesis of the position control system with the master, proportional-integrated speed controller and linear proportional position controller.

The practical significance of the obtained results is to prove the reliability of the proposed control system of electric drives of the bridge crane-manipulator and to create a scientific basis for the synthesis of the control system of electric drives of the crane-manipulator of radioactive metals decontamination unit.

The developed simulation model of the mechanical system of the crane-manipulator can be used for research of processes of movement of cargo at simultaneous work of the bridge, the cart and the load-lifting device of any other crane-manipulator.

The use of the proposed control systems eliminates the possibility of moving or not reaching the working body of the lifting device of the crane-manipulator when immersed in a technological bath of limited volume with liquid due to the developed control methods and position sensors. This eliminates the use of complex mechanical landing devices for accurate positioning.

The developed methods and control systems can be used to develop new methods of frequency control of any other electric drives for specialized cranes.

The results of research performed in the dissertation (models of the mechanical system of the crane-manipulator, algorithms of automatic control of electric crane drives) were used by NTF TEMS LLC for creation positional control system of electric drives for the bridge crane-manipulator. This crane used by energy company "Energoatom" SE "Rivne Nuclear Power Plant", which is confirmed by the relevant act. The implemented system has proven itself in use.

Keywords: manipulator crane, model, automated system, control system, hoisting device.