

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Рижков Олександр Михайлович

УДК 62-83, 681.587, 681.5.033

ДИСЕРТАЦІЯ

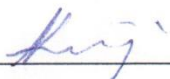
Динамічне керування приводами автоматизованого крана-маніпулятора

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Рижков О.М.

Науковий керівник Стяжкін Віталій Павлович, канд. техн. наук, старший науковий співробітник

Київ – 2021

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 позиціювання 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 (позиціювання) 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 віртуальну модель електромеханічної 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 віртуальною 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 Льюенбергера третього порядку на підставі лінеаризованої моделі зі змінними параметрами. Адаптація середньогеометричного 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 електромеханічної 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 дезактивуючий 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 дезактивуючого розчину та неприпустиме занурення колони вантажопідйомного пристрою або її деталей у дезактивуючий 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 з пристроєм завдання усталеного значення кутового положення, пропорційно-інтегральним регулятором швидкості та лінійним пропорційним регулятором положення, яка задовольняє вимогам технологічного процесу (а саме вимогам позиціонування) і може бути рекомендовано для вантажопідйомних 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 віртуальну модель електромеханічної приводної системи крана-маніпулятора при переміщенні вантажу шляхом реалізації в моделі залежності моменту навантаження, величина якого змінюється в процесі переміщення, що дає змогу врахувати динамічну зміну навантаження.

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.

Розроблено нову математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного 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 вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, який підвищує швидкодію і точність позиціонування вантажу крана та полягає у синтезі системи позиційного керування з пристроєм завдання усталеного значення кутового положення,

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 віртуальна модель електромеханічної 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 задатчиків 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. Стяжкін В.П., Подейко П.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 19 (95). С. 71-74. Режим доступа: 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 доступа: <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 доступа: <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 доступа: <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.

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1	24
ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА- МАНІПУЛЯТОРА В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ З ПОЗИЦІЮВАННЯМ ВАНТАЖУ	24
1.1 Особливості керування електроприводами крана-маніпулятора в системах з позиціюванням вантажу	25
1.2 Керування електроприводами крана-маніпулятора в системах з позиціюванням вантажу, який має підвищену небезпеку для персоналу.....	26
HYPERLINK \l "_Toc69137747" 1.3 Узагальнена структурна схема системи к	
1.4 Особливості керування електроприводом вантажопідйомного пристрою крана- маніпулятора при позиціюванні вантажу, вага якого змінюється.	31
Висновки до розділу 1.....	33
РОЗДІЛ 2	35
РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА- МАНІПУЛЯТОРА.....	35
2.1 Розробка віртуальної моделі для дослідження процесів переміщення вантажу при одночасній роботі моста, візка і вантажопідйомного пристрою	37
2.2 Аналіз даних моделювання механізмів крана-маніпулятора при позиціюванні вантажу	64
2.3. Розробка моделі для дослідження процесів роботи вантажопідйомного пристрою при переміщенні вантажу, вага якого змінюється	70
Висновки до розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3	78

о

п

р

и

в

СТРАТЕГІЇ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА З ПОЗИЦІЮВАННЯМ ВАНТАЖУ	78
3.1 Стратегії керування електроприводами моста та візка крана-маніпулятора....	78
3.1.1 Розімкнута система скалярного керування двома асинхронними двигунами	78
3.1.2 Система замкненого скалярного керування за швидкістю	82
3.1.3 Замкнена система скалярного керування за положенням.....	84
3.1.4 Стратегія керування «Master-Slave».....	87
3.1.5 Стратегія керування «Mean control».....	92
3.1.6 Замкнена система векторного керування при живленні двигунів від індивідуальних ПЧ	97
3.1.7 Системи керування електроприводом візка	103
3.2. Стратегії керування електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора	119
3.3. Синтез системи керування позиційним електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора	126
Висновки до розділу 3.....	128
РОЗДІЛ 4.	131
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА З ПОЗИЦІЮВАННЯМ ВАНТАЖУ.....	131
4.1. Автоматизована система керування електроприводами мостового крана-маніпулятора для установки дезактивації металів.....	131
4.2. Опис системи керування УДМ	148
4.3. Розробка відеокадрів керування цехом та електроприводами крана-маніпулятора з позиціонуванням вантажу.....	151
Висновки до розділу 4.....	155
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	156
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	160
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача.....	166
ДОДАТОК Б.....	168
ДОДАТОК Б.1. Програма ініціалізація параметрів моделі	168

ДОДАТОК Б.2 Структурна схема скалярного електроприводу з регулюванням швидкості	171
ДОДАТОК Б.3 Структурна схема скалярного електроприводу з регулюванням положення	172
ДОДАТОК В	173
ДОДАТОК В.1. Структурна схема стратегії керування «Master–Slave».....	173
ДОДАТОК В.2. Структурна схема стратегія керування «Mean control»	174
ДОДАТОК Г. Перелік команд підпрограм	175
ДОДАТОК Д. Системи керування положенням	180
ДОДАТОК Ж. Акт впровадження	185

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

УДМ	–	Установка дезактивації металу
РАЕС	–	Рівненська атомна електрична станція
АРМ	–	Автоматизоване робоче місце
АСУ ТП	–	Автоматизована система керування технологічним процесом
МРВ	–	Металеві радіоактивні відходи
КВП	–	Контрольно-вимірювальні прилади
СРК	–	Система радіаційного контролю
УЗД	–	Ультразвукова дезактивація
МАГДО	–	Модуль аерогідродинамічної обробки
МПО	–	Модуль проміжного ополіскування
МПМ	–	Модуль перевантаження металу
МОФТС	–	Модуль ополіскування форсунками та сушіння
МЕД	–	Модуль електрохімічної дезактивації
МУЗД-КР	–	Модуль ультразвукової дезактивації в кислому розчині
МУЗД-ЛР	–	Модуль ультразвукової дезактивації в лужному розчині
МПРР	–	Модуль приготування та регенерації розчинів
ПЛК	–	Програмований логічний контролер
ТК	–	Технологічна корзина
ШУ	–	Шафа керування
ПК	–	Персональний комп'ютер
КМ	–	Кран-маніпулятор
ПЧ	–	Перетворювач частоти
FOC	–	Field oriented control

ВСТУП

Сучасні системи автоматизації технологічних установок повинні забезпечувати високі показники якості керування, продуктивності і енергетичної ефективності виконавчого електромеханічного обладнання. Важною складовою електромеханічного обладнання, що використовується на високотехнологічних установках в енергетичній, будівельній галузях виробництва є крани-маніпулятори (КМ).

Більша частина кранів-маніпуляторів призначена для роботи разом з оператором, який слідкує за переміщенням вантажу і виступає в якості керівника процесом керування швидкістю руху, з метою забезпечення позиціонування. Для спрощення роботи оператора використовується часткова автоматизація, наприклад, для зменшення коливань підвісу та автоматичного спуску вантажу. В разі, коли необхідно позиціонувати вантаж з великою точністю та підвищити продуктивність, використовують автоматизовані системи керування рухом крана.

Автоматизоване переміщення вантажу передбачає побудову системи керування, замкненої за положенням приводних механізмів крану-маніпулятора. Така система керування приводами крану-маніпулятора повинна мати динамічні характеристики, які гарантують відхилення реального положення вантажу від заданої траєкторії руху, що не перевищують встановлені значення у відповідності до вимог безпеки.

Обґрунтування вибору теми дослідження. В енергетичній галузі, зокрема на атомних електростанціях, використовуються крани-маніпулятори для транспортування спеціальних матеріалів, яке вимагає підвищеної точності позиціонування, що визначається умовами безпеки. Такі установки, наприклад, установки дезактивації металевих відходів, є унікальними і тому для проектування їх системи керування рухом 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. Тому створення автоматизованої системи

позиційного керування приводами крану-маніпулятора при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка забезпечить підвищення швидкодії та точності позиціонування вантажу крана в умовах динамічної зміни характеристик навантаження та збурень, є **актуальною** науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертаційну роботу виконано в рамках державної науково-дослідної роботи «ІНТЕХЕН-2» (Електромеханічні системи з електричними машинами і напівпровідниковими перетворювачами підвищеної ефективності), державний номер 0120U002125 та НДР «Розробити засоби регулювання напруги, струму і частоти для електротехнологій та систем безредукторних електроприводів з застосуванням методів інтелектуального керування» (шифр «База-П8», виконується згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 12.06.2018, протокол №10, №ДР0119U001282), в яких здобувач виконував функції виконавця.

Здобувач також був виконавцем х/д №799-17 від 1.11.2017 р. «Моделювання електромеханічної системи крана-маніпулятора при динамічній зміні навантаження» та х/д №361-18 від 1.09.2018 р. «Розробка алгоритмів автоматичного керування системами електроживлення установки УДМ шляхом моделювання прогностичних графіків зміни її навантаження» між Інститутом електродинаміки НАН України та науково-технічною фірмою «ТЕМС», результати яких були використані 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».

Мета і завдання досліджень. Метою дисертації є підвищення швидкодії і точності позиціонування електроприводів крану-маніпулятора при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів шляхом синтезу систем автоматичного керування з урахуванням динамічної зміни характеристик навантаження електроприводів крану.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Провести аналіз існуючих систем автоматичного керування електроприводами кранів-маніпуляторів.

2. Розробити віртуальну модель електромеханічної системи крану-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка дозволяє проводити 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.

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

4. Розробити математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів при переміщенні вантажу у технологічній ванні обмеженого об'єму з рідиною, враховуючи дію виштовхувальної сили та зміни рівня рідини у ванні при поступовому зануренні вантажу.

5. Розробити Simulink-моделі систем частотного керування електроприводами моста та візка крана-маніпулятора з використанням живлення двох двигунів від загального та індивідуальних перетворювачів частоти, зробити порівняльний аналіз та визначити оптимальну стратегію керування, яка підвищує швидкодію і точність позиціонування крана.

6. Розробити Simulink-моделі систем частотного керування електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора та визначити оптимальну стратегію керування, яка підвищує швидкодію і точність позиціонування вантажу крана.

7. Синтезувати систему керування позиційним електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, використовуючи математичну модель його механічної частини, яка підвищує швидкодію і точність позиціонування вантажу крана.

8. Практично реалізувати систему позиційного керування електроприводами мостового крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів та провести експериментальні дослідження створеної системи керування в умовах діючого підприємства.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в системах частотно-регульованого електроприводу.

Предмет дослідження – системи позиційного електроприводу кранових механізмів з векторним та скалярним частотним керуванням.

Методи дослідження. При виконанні поставлених в дисертаційній роботі завдань використовувалися: методи теорії електричних кіл і електромагнітних полів; методи класичної та сучасної теорії автоматичного керування, в тому числі методи поліноміального синтезу систем з регуляторами та спостерігачами стану повного порядку; математичне моделювання в середовищі MATLAB та його додатків Simulink та SimMechanics.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше розроблено віртуальну модель електромеханічної приводної системи крана-маніпулятора при переміщенні вантажу шляхом реалізації в моделі залежності моменту навантаження, величина якого змінюється в процесі переміщення, що дає змогу врахувати динамічну зміну навантаження.

2. 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.

3. Розроблено нову математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного 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.

4. Вдосконалено метод керування за положенням електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, який підвищує швидкість і точність позиціонування вантажу крана та полягає у синтезі системи позиційного керування з пристроєм завдання усталеного значення кутового положення, 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

Практичні результати дисертаційної роботи наступні:

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

2. 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.

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

4. Основні положення дисертаційної роботи (моделі механічної системи крана-маніпулятора, алгоритми автоматичного керування електроприводами крана) були використані 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».

Особистий внесок здобувача: Всі теоретичні та практичні результати, представлені в дисертації, отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: у [1] – розробка функціональної схеми системи керування; у [2] – інформаційний пошук та аналіз літературних даних; у [3] – розробка віртуальної моделі механічної системи крана; у [4] – синтез спостерігача стану для оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу; у [5] – синтез метода керування електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора.

Апробація результатів дисертаційної роботи: Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися і були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: на XXIV Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика 2017» (м. Київ, 2017) та XV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2018). А також на наукових семінарах відділів №7 та №1 (г. Київ, 2016-2020).

Публікації. За темою дисертації здобувача опубліковано 5 наукових робіт які відносяться к статтям професійних наукових видань України, дві з яких входить в міжнародну базу даних SCOPUS.

Обсяг і структура дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 185 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 121 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 8 таблицями, 127 рисунками. Список використаних джерел містить 59 найменування, з них 42 кирилицею та 17 латиницею.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ З ПОЗИЦІЮВАННЯМ ВАНТАЖУ

Важною складовою електромеханічного обладнання, що використовується на високотехнологічних установках в енергетичній, будівельній галузях виробництва є крани-маніпулятори.

Більша частина кранів-маніпуляторів призначена для роботи разом з оператором, який слідкує за переміщенням вантажу і виступає в якості керівника процесом керування швидкістю руху з метою забезпечення позиціювання. При цьому деформація та пошкодження конструкції крана може виникнути під час певних умов роботи (наприклад, вплив зовнішнього середовища, некваліфіковані маніпуляції та керування), що може призвести до псування крана [6].

Для спрощення роботи оператора використовується часткова автоматизація, наприклад, для зменшення коливань підвісу та автоматичного спуску вантажу. В разі, коли необхідно позиціонувати вантаж з великою точністю та підвищити продуктивність, використовують автоматизовані системи керування рухом крана.

Автоматизоване переміщення вантажу передбачає побудову системи керування, замкненої за положенням приводних механізмів крану-маніпулятора. Така система керування приводами крану-маніпулятора повинна мати динамічні характеристики, які гарантують відхилення реального положення вантажу від заданої траєкторії руху, що не перевищують встановлені значення у відповідності до вимог безпеки.

В даному розділі викреслені особливості керування та основні завдання, які постають при створенні автоматизованої системи позиційного керування приводами крану-маніпулятору при відпрацюванні найбільш складного і характерного технологічного процесу дезактивації радіоактивних металів, де позиціювання вантажу крана відбувається в умовах динамічної зміни характеристик навантаження та збурень.

1.1 Особливості керування електроприводами крана-маніпулятора в системах з позиціюванням вантажу

При керуванні краном-маніпулятором виникають наступні технічні завдання, які потребують вирішення в автоматизованій системі керування електроприводами крану:

- запобігання розгойдування вантажу;
- синхронізація коліс моста і візка;
- запобігання провисання канату вантажопідйомного механізму;
- позиціонування вантажу в заданій точці;
- синхронізація переміщень вантажу з платформою.

В роботі [7] наведено порівняльний аналіз законів керування для мостового крана, що забезпечують гасіння коливання вантажу. Добре себе показали трьохетапні закони керування, вони забезпечують більшу швидкодію ніж двохетапні та одноетапні, але вимагають додаткових розрахунків в реальному часі.

Результати роботи [8] показали, що використання фазі-регулятора проти розгойдування для крана з 5 ступенями свободи дозволяє підвищити стабільність системи порівняно з пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором.

В роботах [9] представлено системи синхронізації приводів підйомного механізму при використанні фазі та ПІ регуляторів.

Відомі наступні роботи, в яких розглядається опускання вантажу в рідину, де вирішується задача з синхронізації швидкості опускання з хвилями [10,11].

В [12] представлені математичні моделі динаміки підйому/опускання вантажу для режимів „з підхватом” та „з вісу”, встановлено загальні положення, які дозволяють підвищити ефективність роботи механізму підйому вантажу за рахунок реалізації алгоритмів керування.

Статистика, яка надана в роботі [13], дає представлення о фінансових втратах, спричинених крановим устаткуванням, яке не використовує автоматизоване

керування. Збитки, які можливо було зменшити при використанні автоматичного та автоматизованого керування, можуть сягати 1.5 млн дол. США на рік.

1.2 Керування електроприводами крана-маніпулятора в системах з позиціюванням вантажу, який має підвищену небезпеку для персоналу

При роботі зі шкідливими для здоров'я людини матеріалами, а саме забрудненими металевими радіоактивними відходами [14], необхідно забезпечення точності відпрацювання положення відповідно до обмежень технологічного устаткування, щоб попередити можливість аварійної ситуації при переміщенні робочих органів крана-маніпулятора [1]. Проблема ускладнюється тим, що маса транспортованого вантажу не завжди є нормованою, тому система відпрацювання положення має змінні навантаження та момент інерції. Також складністю коректного встановлення вантажу є те, що на ємності, в які він опускається, відсутні напрямні.

При використанні стандартних серійних електроприводів можливо створити прості цикли роботи, використовуючи вбудовані програмовані логічні контролери (ПЛК) та спеціалізовані модулі розширення [15], але неможливо забезпечити роботу при різномірних циклах переміщення вантажу та автоматичного калібрування. Тому для реалізації таких рухів з необхідною динамічною точністю, а також забезпечення гнучкої інтеграції в систему автоматизації крана-маніпулятора, необхідно розроблювати замкнені системи керування положенням для всіх ступенів свободи з підвищеною точністю.

В [16] представлена система керування крана-маніпулятора для переміщення контейнерів з відпрацьованими радіоактивними матеріалами. До складу електромеханічної системи входять внутрішні підсистеми регулювання кутової швидкості, а також зовнішній контролер положення з давачами кутового та лінійного переміщення. Лінійними давачами виступають лазерні далекоміри, сигнали з яких використовуються для уточнення даних з давачів кутового положення, а також для визначення початкового положення по осям переміщення.

У світовій практиці в комплексах по дезактивації радіоактивних металів використовують два крани. Один з них - кран-маніпулятор для переміщення технологічної корзини з фрагментами дезактивованих металевих радіоактивних відходів від столу прийому і видачі технологічної корзини до модуля технологічної лінії та установки корзини в ванни модулів для обробки і вилучення корзини з ванни після обробки.

Другий мостовий кран використовується для переміщення корзини з дезактивованими металевими радіоактивними відходами по технологічним позиціям на ультразвуковій дезактивації металу, переміщення пустої корзини до столу прийому-видачі технологічної корзини, а також для виконання різних вантажних операцій при роботі або ремонті обладнання цеху.

Для покращення техніко-економічних показників технологічної лінії дезактивації металу та зменшення фінансових витрат прийнято технічне рішення використовувати один мостовий кран-маніпулятор, який об'єднує функції обох кранів.

Тому вимоги надійності та точності керування краном – пріоритетні.

Така система керування приводами крану-маніпулятора повинна мати динамічні характеристики, які гарантують відхилення реального положення вантажу від заданої траєкторії руху, що не перевищують встановлені значення у відповідності до вимог безпеки.

1

.

З Зовнішній вигляд узагальненої структурної схеми системи керування краном-маніпулятором показано на рис. 1.1.

У Оператор може задавати як координати (чи список координат) місць, куди треба перемістити вантаж, так і керувати переміщенням вручну. Завдання передається на підсистему генерування траєкторії чи напівавтоматичну систему, які генерують команди системам керування мостом, візком, вантажопідйомним

а

л

ь

н

пристроєм. Системи керування слідкують за відповідними елементами крана та подають команди на відпрацювання заданої координати.

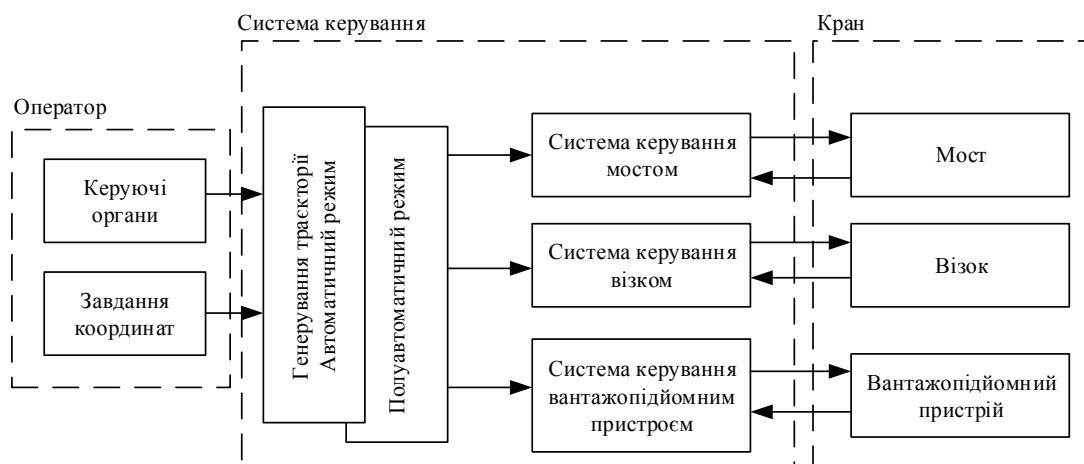


Рис. 1.1 Узагальнена структурна схема системи керування

Алгоритми генерування траєкторії в підсистемі керування обираються в залежності від середовища, в якій буде працювати кран, і функції, які він буде виконувати. Якщо середовище, в якому кран встановлено, змінюється, наприклад люди контактують з середовищем де переміщується кран, чи змінюється положення устаткувань, то необхідно використовувати алгоритми пошуку з системами спостереження за середовищем. Щоб при появі у забороненій зоні стороннього об'єкту оминати його, чи аварійно зупинити переміщення.

Приклади таких алгоритмів пошуку шляху Дейкстри, A* базовані, Theta* базовані, D* базовані та інші їх модифікації. Ці алгоритми можуть знаходити найкоротший шлях від однієї вершини графа до всіх інших вершин. Для їх роботи треба створити граф.

Граф, зображений на рис. 1.2, відображає сукупність об'єктів із зв'язками між ними, тобто для роботи алгоритму треба оцифрувати оточуюче середовище, в якому буде переміщатися кран, та визначати положення робочого органу при переміщенні.

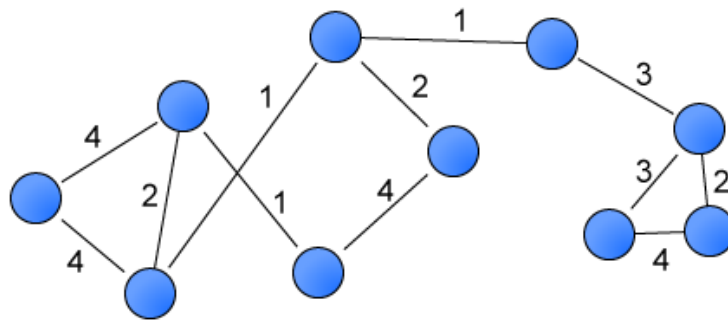


Рис. 1.2 Граф

На рис. 1.3 показано приклад роботи подібної системи. Система складається з двох алгоритмів: пошуку найкоротшого шляху та відпрацьованого шляху [17].

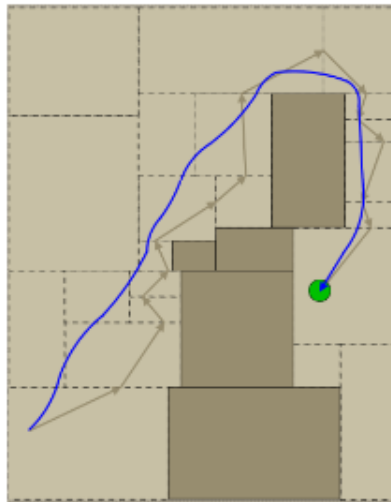


Рис. 1.3 Пошук шляху в просторі

При наявності в крані підвісу з канатом та крюком, який може розгойдуватись, система керування вантажопідйомним пристроєм може впливати на системи керування візком та мостом, щоб звести до мінімуму розгойдування закріпленого вантажу.

При напівавтоматичному режимі роботи траєкторія генерується на коротких відрізках переміщень. При цьому працює тільки система усунення коливань вантажу.

Структурна схема на рис.1.4 представляє собою загальну систему керування положенням краном маніпулятором. Вхід системи представляє собою задану функцію положення за часом, яка подається на комбіновану систему керування, з якої виходять задані сили які прикладаються до крана. Цієї системи достатньо для

базового керування крана в системах з малою динамікою. Модуль зворотного зв'язку та модуль оцінки збурень - це додаткові системи які можуть покращити якість керування. [18]

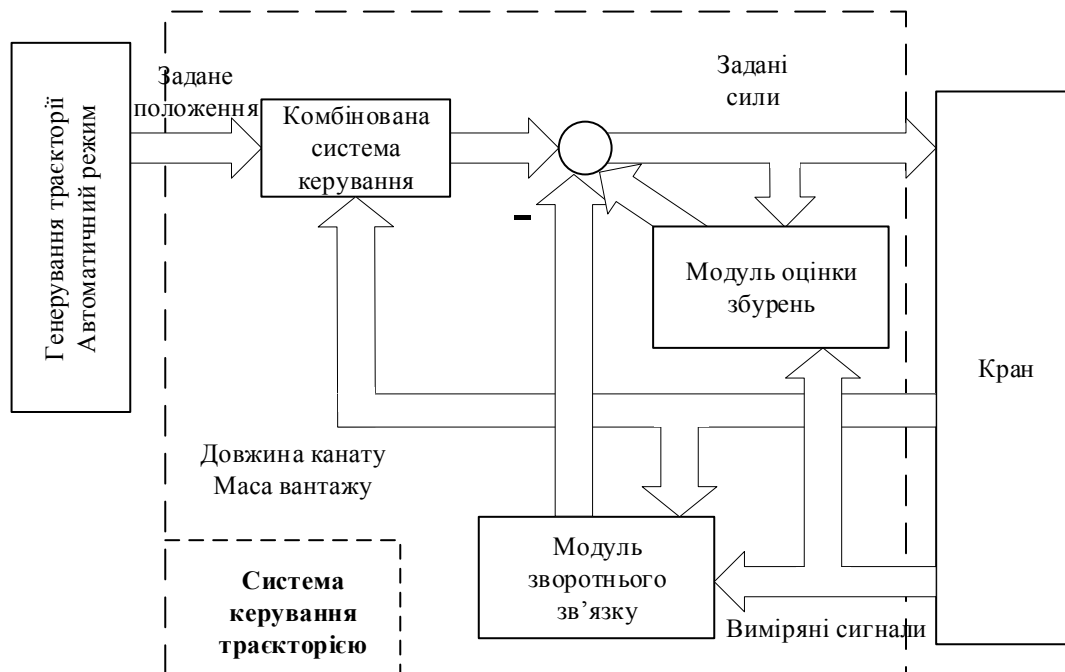


Рис. 1.4 Узагальнена структурна схема системи керування положенням

Найбільш прості системи керування рухом відносяться до класу розімкнутих систем і використовують або так звані алгоритми input-shaping [19, 20], які формують серію прямокутних імпульсів, визначеної амплітуди і тривалості для впливу на електропривод в заздалегідь обчислені моменти часу або попередньо розраховані тахограми, синтезовані в тому числі і з використанням методів оптимального керування [21].

Недоліком даних підходів є те, що вони розроблені для деякої фіксованої довжини каната, що не змінює свого значення в процесі переміщення вантажу, що в принципі неможливо. Крім того, вони мають високу чутливість до сигнальних і параметричних збурень, таким як вітер і тертя, а також вимагають, щоб в момент початку переміщення відхилення каната від вертикалі було нульовим. Перевагою їх є

відсутність дорогих допоміжних датчиків або складних спостережних пристроїв, які оцінюють параметри коливань.

Також синтез замкнутих систем виконують лінійними методами, використовуючи лінеаризовані моделі об'єкта регулювання [22], нелінійними методами, які базуються на лінеаризації зворотним зв'язком з доказом асимптотичної стійкості методом Ляпунова [23], методами нечіткого керування з використанням фазі-логіки (Fuzzy-Logic) [24] і методами релейного керування з ковзними режимами (Sliding-mode Control) [25].

Для реалізації цих методів потрібна або web-камера з пристроєм обробки відео, або спостерігачі стану, малочутливі до сигнальних і параметричних збурень. При синтезі спостерігачів також використовують лінійні і нелінійні методи, а також ковзні режими [23, 26].

У деяких випадках застосовують двостадійне керування, при якому на першому етапі здійснюється переміщення вантажу, а мінімізація його хитань відбувається в цільовій точці [27].

Для синтезу системи керування треба в даній роботі розробити віртуальну модель електромеханічної системи крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка дозволить проводити моделювання та аналіз статичних і динамічних режимів роботи приводних механізмів крана (моста, візка і вантажопідйомного пристрою) при переміщеннях вантажу (відпрацюванні технологічного процесу) у трьох координатах.

1.4 Особливості керування електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора при позиціюванні вантажу, вага якого змінюється.

Головною особливістю електроприводу вантажопідйомного пристрою є наявність активного характеру навантаження. Активний момент навантаження завжди має один знак, тобто момент, створюваний вагою вантажу, завжди прагне

розкрутити механізм в бік спуску. Таким чином, при підйомі вантажу електропривод повинен долати цей момент, а при роботі в напрямку спуску не давати вантажу опускатися в режимі вільного падіння. Тому перетворювач частоти повинен бути обладнаний пристроєм рекуперації або розсіюванням енергії гальмування (гальмівний резистор) з потужністю, достатньою для забезпечення опускання вантажу максимальної допустимої маси на номінальній швидкості.

Вантажопідйомний механізм крану-маніпулятора, що розглядається в даній роботі, виконує рухи з позиціонуванням по зануренню кошика (вантаж) у технологічні ванни обмеженого об'єму з рідиною, тому розробка системи керування електроприводом механізму потребує врахування дії виштовхувальної сили, що аналогічно зміні ваги, та зміни рівня рідини у ванні при поступовому зануренні вантажу.

Відомі наступні роботи в яких розглядається опускання вантажу в рідину, де вирішується задача з синхронізації швидкості опускання з хвилями, щоб мінімізувати різниці вертикальних швидкостей вантажу та хвилі [10].

Гідравлічна система керування вантажопідйомним механізмом має гідравлічний виконуючий пристрій який приводить у рух через редуктор барабан на який намотується канат на кінці якого закріплено пристрій захвату з вантажем. Та при спостереженні за зміною тиску гідравлічної речовини тримається постійні сили натягу [11].

Також можна розглянути задачі з встановленням чи підніманням вантажу без ривка. Подібні маніпуляції можуть виконуватись наприклад з відпрацьованими ядерним паливом який знаходиться в сухому сховищі. Замість використання жорсткої кінематики, запропонований в статті пристрій механізм «капсули» яка може бути занурена в комірку, при цьому для занурення використовуються типовий кран та трос. Капсула скомплектована розширюваним актуатором, який занурюється з відпрацьованим паливом в комірку, впираючись у стіни [28].

Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів розглядається в роботі [12], в якій авторами представлено теоретичні та експериментальні дослідження режимів роботи механізму підйому вантажу мостових

кранів. Побудовані багатоетапні математичні моделі динаміки підйому/опускання вантажу для режимів „з підхватом” та „з вісу”. На основі математичних моделей автори провели динамічний та енергетичний аналізи режимів роботи механізму підйому вантажу за реостатного та частотного керування його приводом. Також було виконано синтез оптимальних режимів роботи механізму підйому вантажу та проведено моделювання роботи механізму в цих режимах. Подана програма та методика експериментальних досліджень режимів роботи механізму підйому вантажу. Та встановленні загальні положення, щоб підвищити ефективність механізму підйому вантажу.

Для синтезу системи керування електроприводом вантажопідйомного пристрою треба в даній роботі розробити математичну модель електромеханічної частини вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів при переміщенні вантажу у технологічній ванні обмеженого об’єму з рідиною, враховуючи дію виштовхувальної сили та зміни рівня рідини у ванні при поступовому зануренні вантажу. Іншими словами, модель повинна адекватно відображати такі особливості технологічного процесу як зміну моменту статичного опору та моменту інерції електроприводу при зануренні кошика з вантажем у дезактивуючий розчин, миттєве зменшення швидкості кошика до нуля та відділення маси кошика від маси колони при досягненні кошиком дна ванни.

Висновки до розділу 1

1. 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 при створенні нової системи автоматичного керування

електроприводами крана-маніпулятора, який відпрацьовує технологічний процес у складі установки дезактивації радіоактивних металів.

2. У більшості існуючих робіт використовуються спрощені рівняння руху крана чи розглядається переміщення окремих його частин, що пояснюється прагненням зменшити складність розрахунків. Для створення системи керування рухом крана-маніпулятора, який відпрацьовує технологічний процес у складі установки дезактивації радіоактивних металів, слід врахувати, що на швидкодію та точність позиціонування робочого органу такого крану впливають невизначеність масо-інерційних характеристик вантажу, що транспортується, а також неідеальність конструкції механічної частини крана. Тому є доцільним розробити універсальну віртуальну модель крана, яка дозволила б проводити аналіз статичних і динамічних режимів роботи приводних механізмів крану та викреслила б рішення проблеми оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу при переміщенні крану.

3. Необхідно розробити математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів при переміщенні вантажу у технологічній ванні обмеженого об'єму з рідиною, враховуючи дію виштовхувальної сили та зміни рівня рідини у ванні при поступовому зануренні вантажу. Це дозволить синтезувати систему керування позиційним електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, яка підвищить швидкодію і точність позиціонування вантажу крана.

Посилання: [1-28] див. список використаних джерел стор. 160-165

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА

Метою даного розділу є побудова та досліджування віртуальної моделі крана-маніпулятора. Проводиться опробування та порівняння результатів дослідів з характеристиками коливань вантажу моделі з отриманого аналізу лінеаризованого математичного опису.

На рис. 2.1 представлена система координат мостового крана [29] і його вантажу. XYZ – інерційна система координат, M_x і M_y є відповідно еквівалентною масою візка у напрямку осі x і еквівалентною масою візка у напрямку осі y , включаючи момент інерції зубчаті передачі і двигунів. θ – кут повороту вантажу у просторі XYZ , який має два компоненти θ_x і θ_y , відповідно. Припускається, що динамічна модель має властивість, при якій вантаж і візок сполучені безмасовим твердим зв'язком.

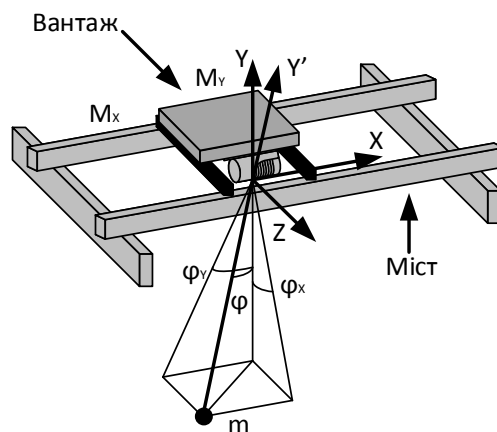


Рис. 2.1 Система координат мостового крана

Рівняння руху системи мостового крана можуть бути отримані відносно узагальнених координат x, y, θ_x і θ_y .

$$(M_x + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}_x \cos\theta_x \cos\theta_y - ml\ddot{\theta}_y \sin\theta_x \sin\theta_y - ml\dot{\theta}_x^2 \sin\theta_x \cos\theta_y - ml\dot{\theta}_y^2 \sin\theta_x \cos\theta_y - 2ml\dot{\theta}_x \dot{\theta}_y \cos\theta_x \sin\theta_y = f_x - D_x \dot{x}; \quad (2.2)$$

$$(M_Y + m)\ddot{y} + ml\ddot{\theta}_Y \cos\theta_Y - ml\dot{\theta}_X^2 \sin\theta_Y = f_Y - D_Y\dot{y}; \quad (2.3)$$

$$ml^2\ddot{\theta}_X \cos^2\theta_Y + ml\ddot{x} \cos\theta_X \cos\theta_Y + mgl \sin\theta_X \cos\theta_Y - \\ - 2ml^2\dot{\theta}_X \dot{\theta}_Y \sin\theta_Y \cos\theta_Y = 0; \quad (2.4)$$

$$ml^2\ddot{\theta}_Y + \ddot{y}ml \cos\theta + mgl \sin\theta_Y \cos\theta_X - ml^2\ddot{x} \sin\theta_X \sin\theta_Y + \\ + ml^2\dot{\theta}_X^2 \dot{\theta}_Y \cos\theta_Y \sin\theta_Y = 0, \quad (2.5)$$

де D_x і D_y відповідно позначають коефіцієнти в'язкого тертя у напрямі x та y , f_x і f_y є зовнішніми силами на мостовому крані у напрямі x та y , відповідно.

У промисловості, максимальне прискорення мостового крана встановлене меншим, ніж прискорення сили тяжіння. З міркувань безпеки, довжина канату зазвичай зберігається постійною при русі мостового крана. Для малих відхилень навколо вертикального стану рівноваги, $\sin\theta_x \approx \theta_y$, $\cos\theta_x \approx 1$ і $\cos\theta_y \approx 1$. Крім того, $\sin\theta_x \sin\theta_y \approx 0$, $\dot{\theta}_x^2 \approx 0$, $\dot{\theta}_y^2 \approx 0$ і $\dot{\theta}_x \dot{\theta}_y \approx 0$ також справедливі для малих коливань. Нелінійна модель може бути спрощена до наступної лінеаризованої моделі:

$$(M_x + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}_x = f_x - D_x\dot{x}; \\ l\ddot{\theta}_x + \ddot{x} + g\theta_x = 0; \quad (2.6)$$

$$(M_y + m)\ddot{y} + ml\ddot{\theta}_y = f_y - D_y\dot{y}; \\ l\ddot{\theta}_y + \ddot{y} + g\theta_y = 0. \quad (2.7)$$

Кран зазвичай приводиться у рух сервомоторами, що мають три режими керування: керування положенням, швидкістю і моментом. На практиці, в'язке тертя і маси візка, і вантажу, як правило, невідомі чи завжди змінюються. Важко спроектувати контролер при відсутності точних значень цих параметрів у режимі керування положенням, або моментом. Ось чому, режим керування швидкістю використовується через наступне зворотне перетворення:

$$u_x = (M_x + m)^{-1}(f_x - D_x\dot{x} - ml\ddot{\theta}_x); \\ u_y = (M_y + m)^{-1}(f_y - D_y\dot{y} - ml\ddot{\theta}_y). \quad (2.8)$$

Після чого, модель системи може бути описана наступним чином:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= u_x; \\ l\ddot{\theta}_x + u_x + g\theta_x &= 0;\end{aligned}\tag{2.9}$$

$$\begin{aligned}\ddot{y} &= u_y; \\ l\ddot{\theta}_y + u_y + g\theta_y &= 0.\end{aligned}\tag{2.10}$$

Можна побачити, що перетворена система є незалежною від в'язкого тертя і мас візка та вантажу, виходами системи стають прискорення по відповідним осям. Входи системи керування u_x і u_y можуть бути безпосередньо обчислені за допомогою перетвореної моделі і певного алгоритму керування, що є також незалежним від в'язкого тертя і мас візка та вантажу. Для заданого прискорення, серводвигуни у режимі керування швидкістю можуть автоматично визначити вихідний момент відносно фактичної системи, тому не має потреби обчислювати зовнішні сили керування f_x і f_y , використовуючи зворотне перетворення стану (2.8). Інакше кажучи, до тих пір поки серводвигуни, встановлені у візок, приводяться у рух із прискоренням, яке отримується із певного алгоритму керування, завдання керування можуть легко бути реалізованими на практиці.

Із (2.6) і (2.7), або (2.9) і (2.10) можна побачити, що лінеаризована динамічна модель складається із направлених по осям x та y динамік переміщення. Вони є роз'єднаними і мають одну й ту ж структуру. Ось чому, той самий алгоритм керування може бути розроблений як для системи переміщення по осі x , так і по осі y .

2.1 Розробка віртуальної моделі для дослідження процесів переміщення вантажу при одночасній роботі моста, візка і вантажопідйомного пристрою

Розробимо модель для дослідження рухів вантажу масою m , у якого точка підвісу прикріплена до візка масою M , що рухається у напрямку осі x по мосту масою M_b , який у свою чергу пересувається у напрямку осі z .

Міст, як і візок, і вантаж, у першому наближенні будемо вважати точковою масою, зосередженою у центрі його тяжіння. Рух моста відбувається по горизонтальній осі під дією деякої сили F_z . Довжину каната при переміщенні вантажу вважаємо незмінною.

Коливальний рух вантажу визначається двома кутами Ейлера. При одночасному русі мосту і візка на вантаж діють відцентрова та сили коріоліса, які зумовлюють взаємовплив коливань вантажу в обох напрямках.

Для математичного опису механічних систем з декількома ступенями свободи доцільно застосовувати рівняння

Вирази швидкостей рухомих тіл, необхідні для обчислення кінетичної енергії системи, запишуться у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{v}_{Mb} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_z(t) \end{bmatrix}, \quad \vec{v}_M = \begin{bmatrix} v_x(t) \\ 0 \\ v_z(t) \end{bmatrix}, \\ \vec{v}_m = \begin{bmatrix} v_x(t) + L\omega_x(t)\cos\varphi_x(t) \\ L\omega_z(t)\cos\varphi_x(t)\sin\varphi_z(t) + L\omega_x(t)\cos\varphi_z(t)\sin\varphi_x(t) \\ v_z(t) + L\omega_z(t)\sin\varphi_z(t) \end{bmatrix}. \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Потенціальна і кінетична енергії визначаються виразами

$$\begin{aligned} W_p &= -mgL \cos\varphi_x \cos\varphi_z, \\ W_k &= \frac{M_b + M + m}{2} v_z^2 + \frac{M + m}{2} v_x^2 + \\ &+ \frac{mL}{2} \left[L(\omega_x \cos\varphi_x)^2 + 2v_x \omega_x \cos\varphi_x + L(\omega_z \sin\varphi_z)^2 + 2v_z \omega_z \sin\varphi_z + \right. \\ &\left. + L(\omega_x \cos\varphi_z \sin\varphi_x)^2 + L(\omega_z \cos\varphi_x \sin\varphi_z)^2 + \right. \\ &\left. + 2L\omega_x \omega_z \cos\varphi_x \sin\varphi_x \cos\varphi_z \sin\varphi_z \right]. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Тоді функція Лагранжа для системи міст-візок-вантаж матиме вигляд:

$$\mathcal{L} = \frac{M+m}{2} v_x^2(t) + \frac{mL}{2} (2v(t)\omega(t)\cos\varphi(t) + L\omega^2(t) + 2g\cos\varphi(t)). \quad (2.13)$$

У відповідності із рівнянням Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = T_i, \quad (i=1,2,3,4) \quad (2.14)$$

Послідовно виведемо усі компоненти рівняння (2.14) для кожного тіла.

Узагальненими координатами і силами для досліджуваної системи являються:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \varphi_x \\ \varphi_z \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}} = \frac{d\mathbf{q}}{dt} \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Тоді окремі похідні функції Лагранжа за узагальненими координатами

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \begin{bmatrix} (M+m)v_x + mL\omega_x \cos \varphi_x, \\ (M_b + M + m)v_z + mL\omega_z \sin \varphi_z, \\ mL[v_x \cos \varphi_x + L(\omega_x \cos^2 \varphi_x + \omega_x \cos^2 \varphi_z \sin^2 \varphi_x + \\ + \omega_z \cos \varphi_x \sin \varphi_x \cos \varphi_z \sin \varphi_z)], \\ mL[v_z \sin \varphi_z + L(\omega_z \sin^2 \varphi_z + \omega_z \cos^2 \varphi_x \sin^2 \varphi_z + \\ + \omega_x \cos \varphi_x \sin \varphi_x \cos \varphi_z \sin \varphi_z)] \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

а похідні за часом від останніх окремих похідних –

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) = \begin{bmatrix} (M+m) \frac{dv_x}{dt} + mL(\varepsilon_x \cos \varphi_x - \omega_x^2 \sin \varphi_x), \\ (M_b + M + m) \frac{dv_z}{dt} + mL(\varepsilon_z \sin \varphi_z + \omega_z^2 \cos \varphi_z), \\ mL[a_x \cos \varphi_x - v_x \omega_x \sin \varphi_x + LMatrix \\ mL[v_z \sin \varphi_z + L(\omega_z \sin^2 \varphi_z + \omega_z \cos^2 \varphi_x \sin^2 \varphi_z + \\ + \omega_x \cos \varphi_x \sin \varphi_x \cos \varphi_z \sin \varphi_z)] \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$\text{де } Matrix = \left(\begin{array}{l} \frac{d\omega_x}{dt} \cos^2 \varphi_x - 2\omega_x^2 \cos \varphi_x \sin \varphi_x + \\ + \frac{d\omega_x}{dt} \cos^2 \varphi_z \sin^2 \varphi_x + \\ + 2\omega_x^2 \cos^2 \varphi_z \sin \varphi_x \cos \varphi_x - \\ - 2\omega_x^2 \sin^2 \varphi_x \cos \varphi_z \sin \varphi_z + \\ + \varepsilon_z \cos \varphi_x \sin \varphi_x \cos \varphi_z \sin \varphi_z + \\ + \omega_z^2 (\cos \varphi_x \sin \varphi_x \cos^2 \varphi_z - \\ - \cos \varphi_x \sin \varphi_x \sin^2 \varphi_z - \\ + \cos_x^2 \varphi \cos \varphi_z \sin \varphi_z - \sin_x^2 \varphi \cos \varphi_z \sin \varphi_z) \end{array} \right).$$

Основні правила створення віртуальних SimMechanics-моделей (SM-моделей) викладено у [30-31]. Модель розроблена за цими правилами, наведена на рис. 2.2.

Комбінація блоків Machine Environment і Ground задає гравітаційні сили, прикладені до центру координат, та їх орієнтацію в заданій системі відліку. Щоб приєднати блок Ground до блоку Machine Environment, треба активізувати його параметр Show Machine Environment port.

Переміщення окремих елементів кінематичної схеми може здійснюватися у різних системах координат. Світовою (World) системою координат (СК) вважають декартову 3-вимірну СК xuz , в якій вісь x спрямована праворуч, вісь u – догори, а вісь z перпендикулярна площині xu та спрямована на глядача. Центр світової СК має координати $[0 \ 0 \ 0]$. Саме тому прискорення вільного падіння $g = 9.81$ м/с, що задає напрям сил гравітації у блоці Machine Environment задано від'ємним ($[0 \ -9.81 \ 0]$).

Нерухома основа Ground, до якої послідовно прив'язуються частини механічної моделі може мати як мирову СК, так і іншу СК, зсунуту відносно мирової у просторі. Координати центру цієї СК і є єдиним параметром блоку Ground. У даному СК основи визначена як мирова.

До основи приєднано кінематичний зв'язок *Prismatic*, що утворює із нерухомою опорою *Ground* та тіла *Brige* з точковою масою M_b кінематичну пару з одним обертовим ступенем свободи вздовж осі z , що імітує рух моста, яка задається параметром *Axis of Action* $[x \ y \ z]$, який у даному прикладі має значення $[0 \ 0 \ 1]$.

До кінематичного зв'язка приєднаємо блок *Joint Actuator*, який дозволяє задати у функції часу силову дію (*Generalized Force*) між елементами кінематичної пари або рух (*Motion*) наступного тіла (*Following*) відносно базового (*Base*); у першому випадку вхідний сигнал актуатора є скалярним, а у другому – векторним, що складається з відносних величин переміщення, швидкості та прискорення. Для нашого випадку оберемо силову дію F_z .

Переміщення візка вздовж осі x утворюється приєднуючи до порту CS2 тіла *Brige* кінематичного зв'язку *Prismatic* з тілом *Trolley* яке має масу M . До кінематичного зв'язку приєднаємо блок *Joint Actuator1*, який задає у функції часу силову дію F_x .

До тіла *Trolley* приєднано кінематичний зв'язок *Bearing*, який має 3 обертові R1, R2, R3 та 1 поступальний *Prismatic* (P1) ступені свободи, причому поступальний рух здійснюється після завершення поворотів подовж тієї осі, навкруги якої виконувався останній поворот

До невагомого з'єднання (нитка, канат) і тіла з точковою масою *Load m (Load)* приєднані відповідні датчики *Joint Sensor* та *Body Sensor*. Обрані для візуалізації сигнали фіксуються будь-якими вихідними блоками *Simulink*-бібліотеки *Sinks*.

При виборі датчиків враховуємо, що блоки *Joint Sensor* вимірюють координати руху тіла *Following (F)* відносно тіла *Base (B)*, а блоки *Body Sensor* – абсолютні координати відповідних тіл.

Отже, в моделі рис. 2.2 датчик *Joint Sensor1* вимірює переміщення моста відносно нерухомої основи, датчик *Joint Sensor2* – переміщення візка відносно моста, блоки *Body Sensor1* та *Body Sensor* – абсолютні координати візка і вантажу у тривимірному просторі відповідно. Тому для того, щоб визначити величини відхилення вантажу від вертикалі, що проходить через точку підвісу, в напрямках осей x та z треба від абсолютних координат вантажу відняти абсолютні координати візка та моста.

Кожний ступінь свободи блоків *Joint* потребує для вимірювання власний сенсор.

Досвід показав, що навіть при створенні моделі можна припуститися деяких помилок. Для їх виявлення треба порівнювати між собою результати математичного та віртуального моделювання. Усувати їх потрібно коригуванням сумнівних параметрів або з'єднань.

Вихідними сигналами наведеної моделі є $[z_b \ v_b \ a_b]$ (порт 7) – положення, швидкість та прискорення моста, $[d_{xt} \ d_{vt} \ d_{at}]$ (порт 6) – положення, швидкість та прискорення візка відносно моста, $[x_t \ y_t \ z_t]$ – абсолютні координати візка у 3-вимірному просторі, $[x_l \ y_l \ z_l]$ (порт 3) – абсолютні координати вантажу у 3-вимірному просторі, $[d_{x_l} \ d_{z_l}]$ (порти 1, 2) – лінійні відхилення вантажу від вертикалі, $[f_{ix} \ w_x]$ (порт 4) – кутове відхилення вантажу від вертикалі та кутова швидкість у площині xu , $[f_{iz} \ w_z]$ (порт 5) – кутове відхилення вантажу від вертикалі та кутова швидкість у площині zu , вхідні сигнали можна формувати, а вихідні реєструвати будь-якими блоками бібліотек *simulink*, що дозволяє доповнити механічну модель крана системами керування координатами його механізмів у структурному вигляді.

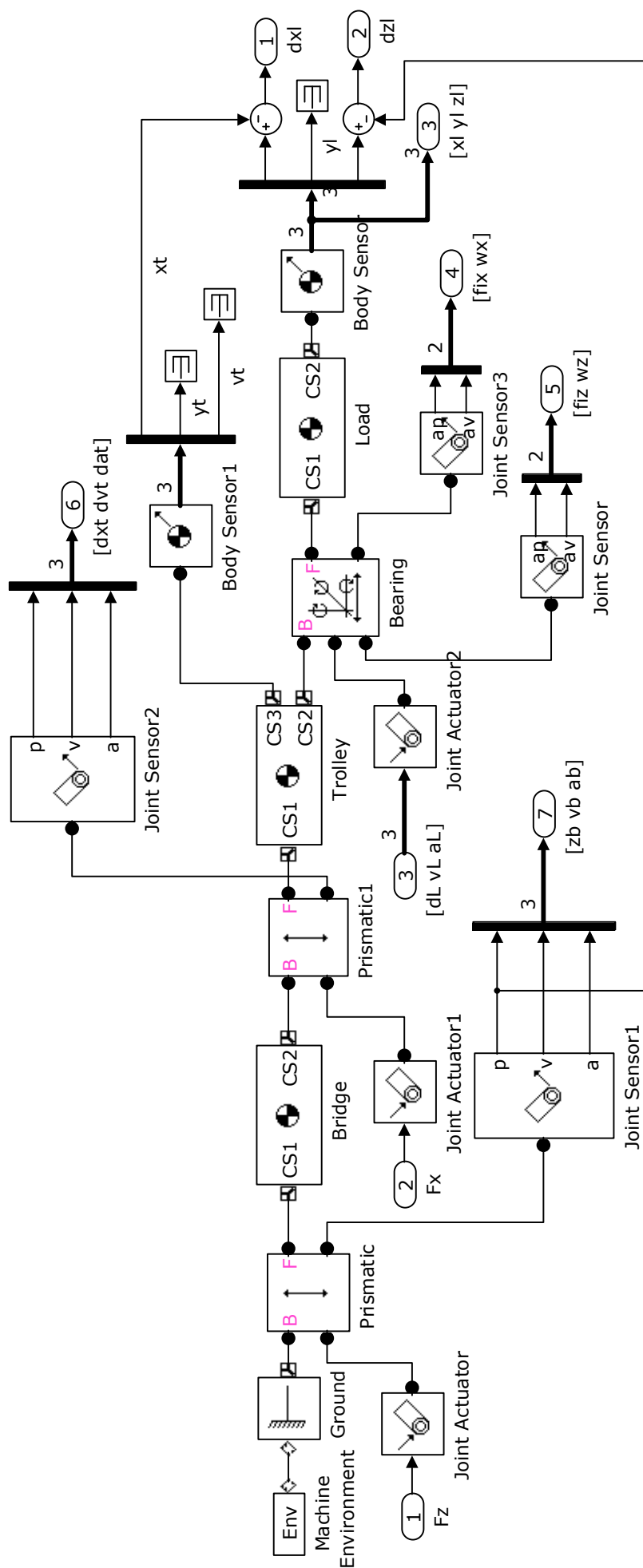


Рис. 2.2 Віртуальна фізична модель мостового крана

Апробацію запропонованої моделі виконано при таких вихідних даних вказаних в таблиці 2.1:

Таблиця 2.1

Параметри мостового крана

Параметр	Значення
Маса вантажу з гаком	$m = 4000$ кг
Маса візка із закріпленням на ньому підймальним пристроєм і відповідними двигунами	$M = 2000$ кг
Маса моста з приводними двигунами	$M_b = 18000$ кг
Довжина канату при переміщенні вантажу при нехтуванні її зміною	$L = 12$ м
Довжина (проліт) моста	$L_b = 20$ м

Для перевірки її адекватності попередньо були розраховані основні характеристики коливань, отримані з аналізу лінеаризованого математичного опису:

1) для вантажу, підвішеного до нерухомої опори при тестовому значенні початкового кута $\varphi_0 = 30^\circ$

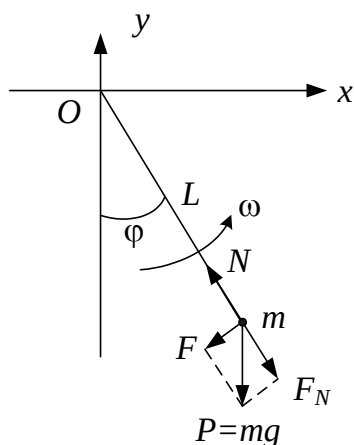


Рис. 2.3 Математичний маятник

Схематичне зображення математичного маятника масою m з довжиною нитки підвісу L подано на рис. 2.3.

Силу тяжіння $P = mg$ ($g = 9.81$ м/с² – прискорення сили тяжіння) можна розкласти на 2 складові, одна з яких (F_N) урівноважується силою натягу нитки N , а друга ($F = mg \cdot \sin\varphi$) створює відносно точки закріплення нитки O момент $M = -FL$, спрямований у бік зменшення кута φ .

Тому його записуємо зі знаком «-». Момент інерції матеріальної точки відносно точки

підвісу дорівнює $J = mL^2$. Тому рівняння руху математичного маятника $M = J \cdot d\omega/dt$ можна записати у вигляді $-mgL \sin \varphi = mL^2 \cdot d\omega/dt$, або після скорочення множник mL

$$-g \sin \varphi = L \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.18)$$

Після доповнення рівняння (2.18) диференціальним рівнянням

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega \quad (2.19)$$

складаємо на їх основі структурну *Simulink*-модель (*S*-модель), показану на рис. 2.4.

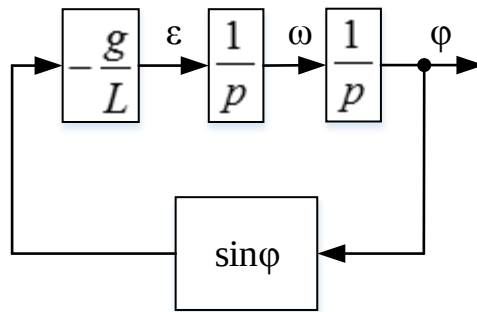


Рис. 2.4 Нелінійна структурна схема математичного маятника

При невеликих кутах відхилення маятника її можна лінеаризувати, скориставшись співвідношенням

$$\sin \varphi \approx \varphi. \quad (2.20)$$

Характеристичний поліном лінеаризованого об'єкта має вигляд

$$T_0^2 s^2 + 1 = 0, \quad (2.21)$$

де

$$T_0 = \sqrt{L/g}, \quad (2.22)$$

а перехідний процес, зумовлений початковим відхиленням маятника на кут φ_0 ($\varphi(0) = \varphi_0, \omega_0 = 0$) описується рівнянням

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cos \Omega_0 t, \quad \omega(t) = -\varphi_0 \Omega_0 \sin \Omega_0 t = -\omega_m \sin \Omega_0 t, \quad (2.23)$$

де $\Omega_0 = 1/T_0$ – кругова частота власних (невимушених) коливань лінеаризованій моделі математичного маятника, $\omega_m = \varphi_0 \Omega_0 = \varphi_0 / T_0$ – амплітуда коливань кутової швидкості.

У відповідності з (2.22) період коливань становить

$$T_{k0} = 2\pi T_0 = 2\pi \sqrt{L/g}. \quad (2.24)$$

Період коливань нелінійної моделі при $\varphi_0 \leq 60^\circ$ можна приблизно (з похибкою менше 1%) визначити за більш точною формулою

$$T_{kn} \approx 2\pi \sqrt{L/g} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\varphi_0}{2} \right). \quad (2.25)$$

Для наведених у таблиці 2.1 вихідних даних ($m = 4000$ кг, $L = 12$ м) основні параметри власних коливань при початковому куті відхилення 30° складають:

$$\begin{aligned} T_0 &= \sqrt{L/g} = 1.106 \text{ с}, \\ T_{k0} &= 2\pi T_0 = 2\pi \sqrt{L/g} = 6.95, \\ \omega_{m0} &= \varphi_0 / T_0 = 27.13 \text{ рад/с}, \\ T_{kn} &\approx T_{k0} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\varphi_0}{2} \right) = 7.07 \text{ с}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Також розрахуємо максимальні відхилення вантажу по осям x та y : $x_m = x_0 = L \sin \varphi_0 = 6 \text{ м}$, $y_m = y_0 = -L \cos \varphi_0 = 10.4 \text{ м}$.

Графіки власних коливань вантажу, описаного як математичний маятник, отримані за допомогою моделі з рис. 2.2, представлені на рис. 2.5-2.6. Як бачимо, параметри характерних точок перехідних процесів повністю співпадають з розрахованими вище, незважаючи на те, що початковий кут не такий вже й малий.

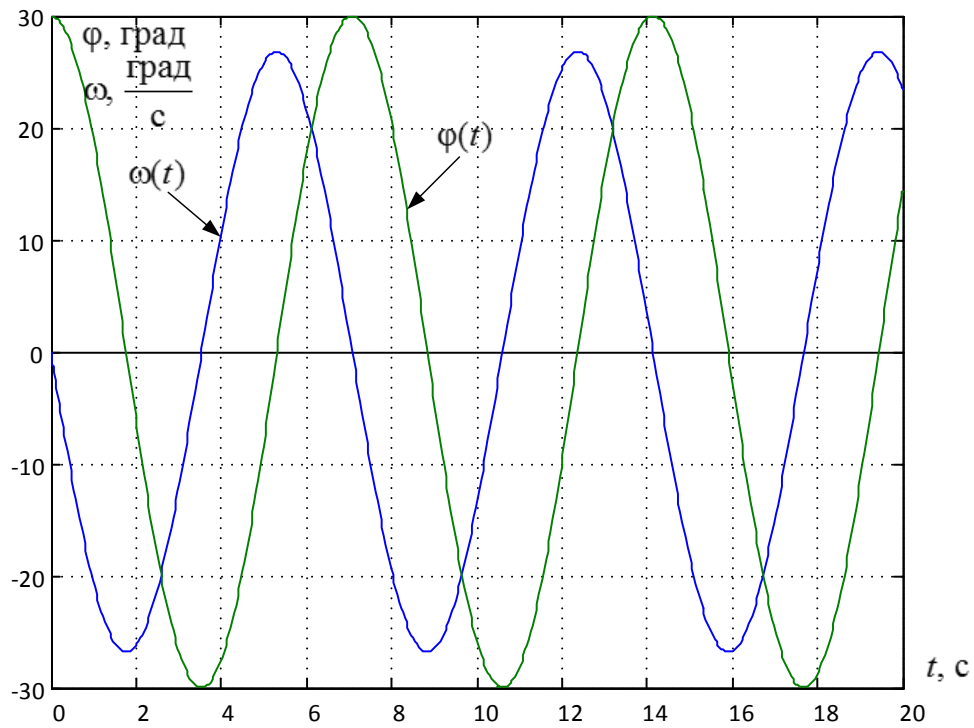


Рис. 2.5 Графіки власних рухів математичного маятника

2) для вантажу, підвішеного до візка, що пересувається по нерухомому мосту при ступінчастому прикладенні до візка постійного зусилля, розрахованого з умови забезпечення середнього прискорення візка.

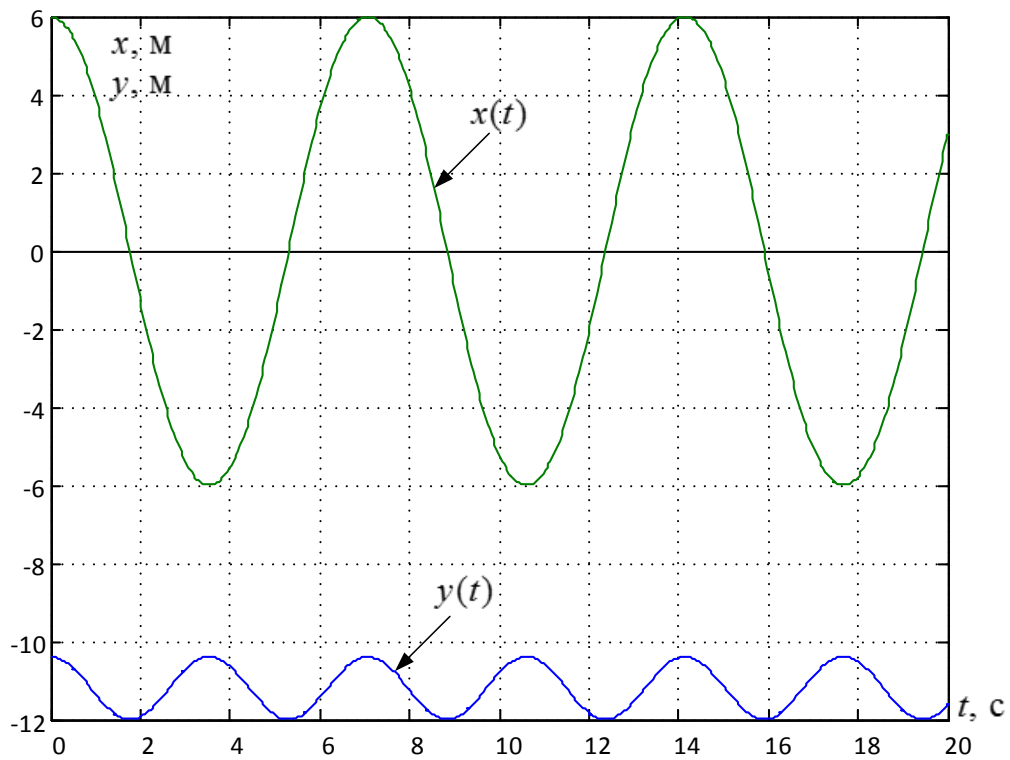


Рис. 2.6 Графіки власних рухів математичного маятника

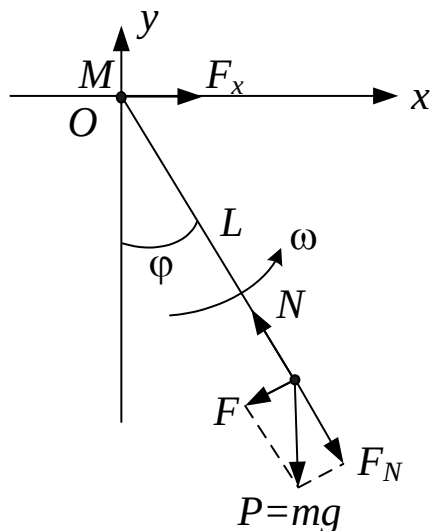


Рис. 2.7 Механічна система візок-вантаж

Розробимо моделі для дослідження рухів вантажу, у якого точка підвісу прикріплена не до нерухомої опори, а до візка, що здійснює переміщення вантажу у напрямку x , представлено на рис. 2.7. Механічна система складається з вантажу масою m , який на канаті підвішений до візка мостового крана масою M , тобто вона стає двомасовою. Візок, як і вантаж, будемо вважати точковою масою, зосередженою у центрі його тяжіння. Рух візка відбувається по горизонтальній осі під дією деякої сили F_x при постійній довжині канату.

Для складання математичного опису скористаємося, як і у попередньому випадку, рівняннями Лагранжа другого роду.

Вирази для визначення просторових координат візка та вантажу в кожний момент часу мають вигляд

$$\begin{aligned}\vec{s}_M &= [s_{Mx}(t), 0] = [x(t), 0], \\ \vec{s}_m &= [s_{mx}(t), s_{my}(t)] = [x(t) + L \sin \varphi(t), -L \cos \varphi(t)],\end{aligned}\quad (2.27)$$

у результаті диференціювання яких отримаємо такі вирази для проекцій векторів швидкостей руху візка і вантажу на обрані координатні осі:

$$\begin{aligned}\vec{v}_M &= [v_{Mx}(t), 0] = [v_x(t), 0], \\ \vec{v}_m &= [v_{mx}(t), 0] [v_x(t) + L \omega(t) \cos \varphi(t), L \omega(t) \sin \varphi(t)].\end{aligned}\quad (2.28)$$

У формулах (2.27-2.28) індекси векторів положення і швидкостей вказують на масу, до якої вони належать.

Для системи візок-вантаж формули потенціальної і кінетичної енергії мають вигляд

$$\begin{aligned}
W_k &= \frac{m}{2} \left[(v_x(t) + L\omega(t)\cos\varphi(t))^2 + (L\omega(t)\sin\varphi(t))^2 \right] + \frac{M}{2} v_x^2(t) = \\
&= \frac{m+M}{2} v_x^2(t) + \frac{mL}{2} (L\omega^2(t) + 2v_x(t)\omega(t)\cos\varphi(t)), \\
W_p &= -mgL\cos\varphi(t).
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Тоді функція Лагранжа для системи «візок-вантаж» матиме вигляд:

$$\mathcal{L} = \frac{M+m}{2} v_x^2(t) + \frac{mL}{2} (2v(t)\omega(t)\cos\varphi(t) + L\omega^2(t) + 2g\cos\varphi(t)). \tag{2.30}$$

Послідовно виведемо усі компоненти рівняння (2.14) для кожного тіла.

Узагальненими координатами і силами для досліджуваної системи є:

$$\begin{cases} q_1 = x, & \dot{q}_1 = v_x, & Q_1 = F_x; \\ q_2 = \varphi, & \dot{q}_2 = \omega, & Q_2 = 0. \end{cases} \tag{2.31}$$

Тоді окремі похідні функції Лагранжа за узагальненими координатами

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_1} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_2} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \varphi} = -mL(v_x(t)\omega(t)\sin\varphi(t) + g\sin\varphi(t)) \tag{2.32}$$

за їх першими похідними –

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} &= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_x} = (M+m)v_x(t) + mL\omega(t)\cos\varphi(t), \\
\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_2} &= \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \omega} = mL(v_x(t)\cos\varphi(t) + L\omega(t)),
\end{aligned} \tag{2.33}$$

а похідні за часом від останніх окремих похідних –

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_x} \right) = (M+m) \frac{dv_x(t)}{dt} + mL\cos\varphi(t) \frac{d\omega(t)}{dt} - mL\omega^2(t)\sin\varphi(t),$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}} \right) = mL \left(\cos \varphi(t) \frac{dv_x(t)}{dt} - v_x(t) \omega(t) \sin \varphi(t) + L \frac{d\omega(t)}{dt} \right). \quad (2.34)$$

Підставивши отримані вирази у (2.27), одержуємо такі рівняння:

$$\begin{cases} (M + m) \frac{dv_x(t)}{dt} + mL \cos \varphi(t) \cdot \varepsilon(t) - mL \omega^2(t) \cdot \sin \varphi(t) = F(t), \\ L \frac{d\omega(t)}{dt} + \cos \varphi(t) \cdot a_x(t) + g \sin \varphi(t) = 0, \end{cases} \quad (2.35)$$

які доповнюємо рівняннями, що пов'язують узагальнені координати з їхніми похідними:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = v_x(t), & \frac{dv_x(t)}{dt} = a_x(t); \\ \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), & \frac{d\omega(t)}{dt} = \varepsilon(t). \end{cases} \quad (2.36)$$

де $a(t)$ – лінійне прискорення візка; $\varepsilon(t)$ – кутове прискорення вантажу;

Структурна модель, що відповідає рівнянням (2.34), (2.35) наведена на рис. 2.8.

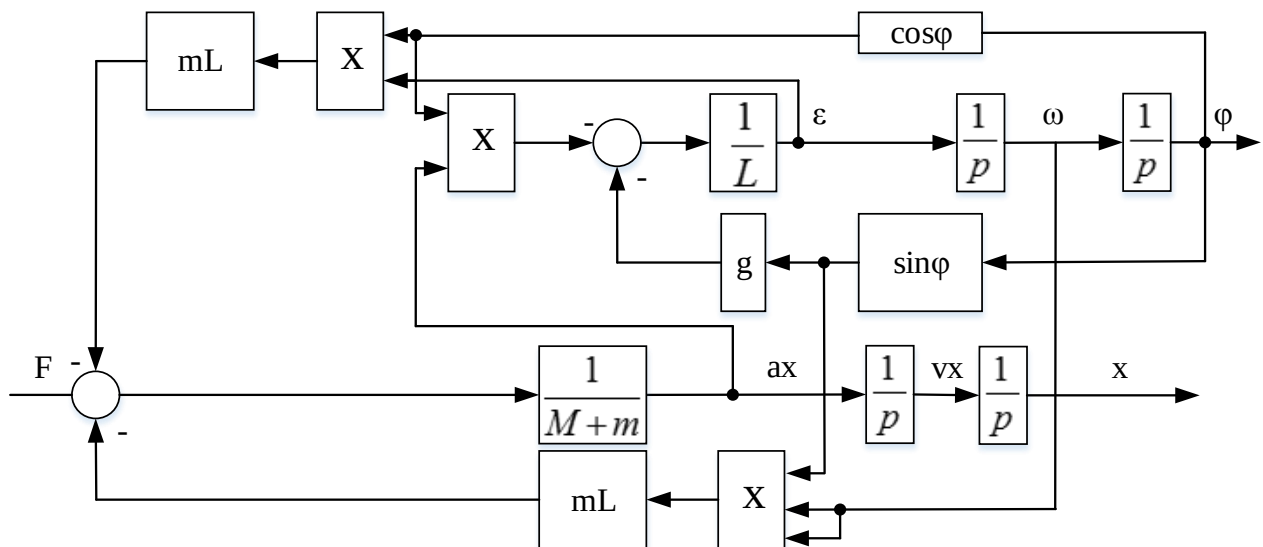


Рис. 2.8 Структурна модель системи візок- вантаж

Для порівняння результатів моделювання моделі представлених на рис.2.2 треба подати на вхід *Joint Actuator* кінематичного зв'язку *Prismatic* силу Fz рівною 0, щоб міст був зафіксований та не приймав участь в моделюванні.

На рис. 2.9 наведені перехідні процеси коливань вантажу при ступінчатому прикладенні до візка постійного зусилля, розрахованого з умови забезпечення середнього прискорення візка $ax_0 = 0.5 \text{ м/с}^2$: $F_{x_0} = (M + m)a_{x_0} = 3000 \text{ Н}$.

Графіки отримані за допомогою моделей рис. 2.2 та рис. 2.9 (результати симуляції обох моделей співпадають).

Для того, щоб оцінити ступінь адекватності розроблених нелінійних моделей, їх треба лінеаризувати. З рис. 2.9 бачимо, що при пересуванні візка значення кута відхилення канату від вертикалі приймає досить невеликі значення, завдяки чому можна прийняти:

$$\varphi \approx 0, \quad \cos \varphi \approx 1, \quad \sin \varphi \approx \varphi, \quad \omega^2 \approx 0. \quad (2.37)$$

В такому випадку рівняння (2.30) набувають вигляду:

$$\begin{cases} (M + m) \frac{dv(t)}{dt} = F(t) - mL\varepsilon(t), \\ L \frac{d\omega(t)}{dt} = -a(t) - g\varphi(t). \end{cases} \quad (2.38)$$

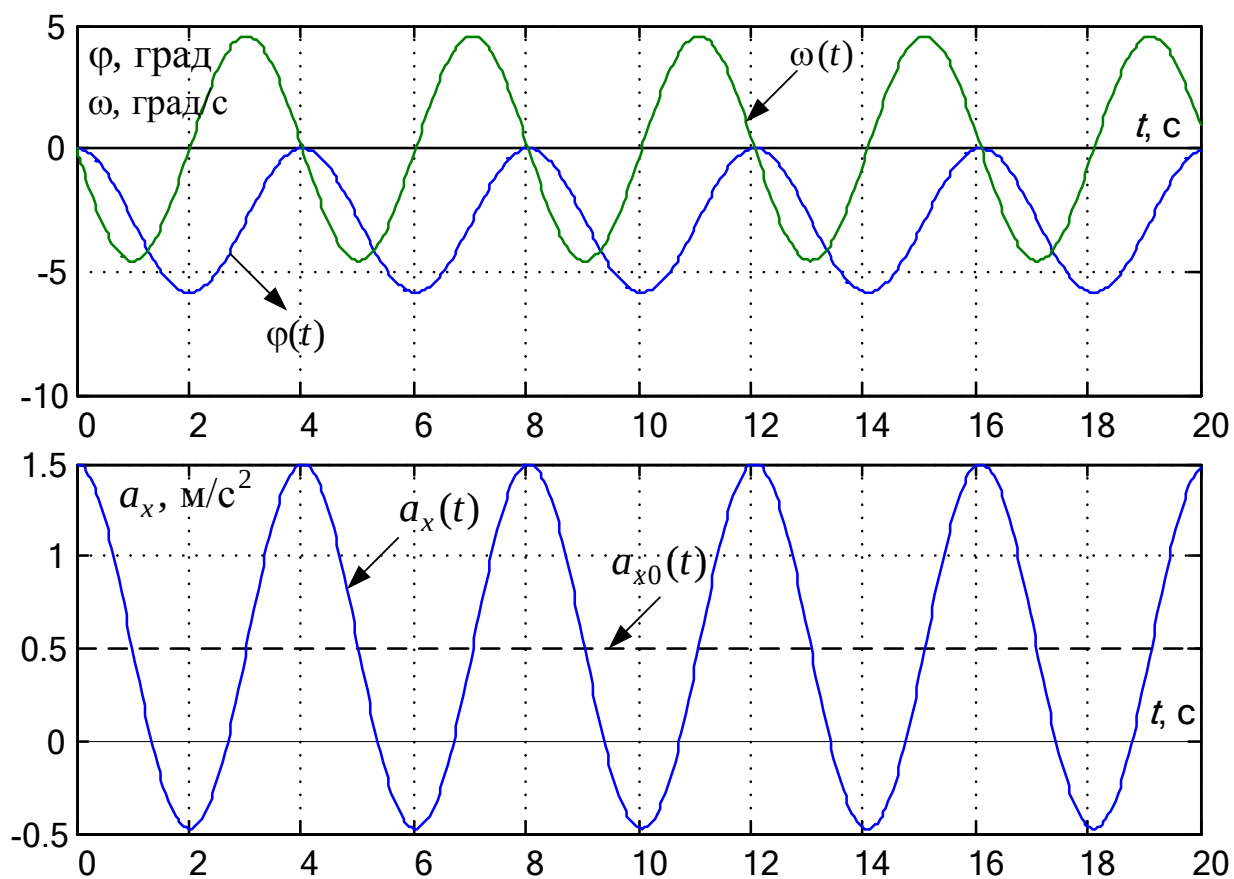


Рис. 2.9 Перехідні процеси коливань кутових координат вантажу та прискорення візка при русі візку під дією прикладеного до нього постійного зусилля

Такій системі рівнянь відповідає структурна модель, наведена на рис. 2.10.

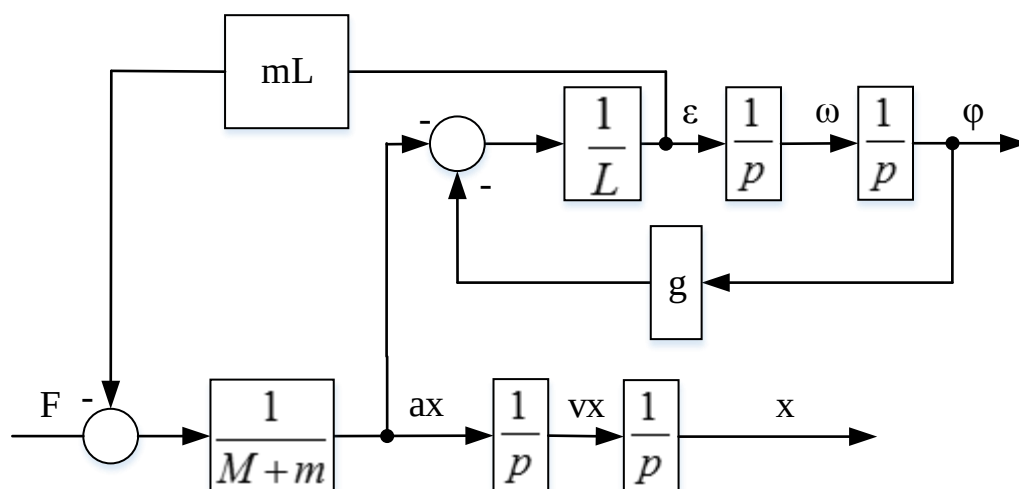


Рис. 2.10 Лінеаризована структурна модель системи візок-вантаж

Із структурної схеми рис. 2.10 знаходимо передавальні функції (ПФ) механічного об'єкта:

$$\frac{\varphi(p)}{a_x(p)} = -\frac{1}{g} \cdot \frac{1}{(T_0^2 p^2 + 1)}, \quad (2.39)$$

де $T_0 = \sqrt{L/g}$ – стала часу власних коливань вантажу;

$$\frac{\varphi(p)}{F_x(p)} = -\frac{1}{(M+m)g} \cdot \frac{1}{(T_{12}^2 p^2 + 1)}, \quad (2.40)$$

де

$$T_{12} = \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{M}{M+m}} = T_0 \sqrt{\frac{M}{M+m}} \quad (2.41)$$

– стала часу коливань двомасової системи візок-вантаж.

Діленням (2.39) на (2.40) отримуємо:

$$\frac{a_x(p)}{F_x(p)} = \frac{1}{(M+m)} \cdot \frac{(T_0^2 p^2 + 1)}{(T_{12}^2 p^2 + 1)} \quad (2.42)$$

Із ПФ (2.40) знаходимо реакцію кутових координат вантажу на стрибок зусилля $F_x(t) = F_{0x} \cdot 1(t)$ при нульових початкових умовах:

$$\varphi(t) = -\frac{F_{0x}}{(M+m)g} \left(1 - \cos \frac{t}{T_{12}} \right), \quad (2.43)$$

що відповідає коливанням двомасової системи вантаж-візок з періодом

$$T_{k12} = 2\pi T_{12} \quad (2.44)$$

навколо похилої осі $\varphi_{mean} = \frac{F_0}{(M+m)g}$ від $\varphi_{min} = 0$ до

$$\varphi_{max} = -\frac{2F_{0x}}{(M+m)g}. \quad (2.45)$$

Шляхом диференціювання (2.43) знайдемо закон зміни кутової швидкості:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{F_{0x}}{(M+m)gT_{12}} \sin \frac{t}{T_{12}} = \frac{F_{0x}}{\sqrt{Lg(M+m)M}} \sin \frac{t}{T_{12}}, \quad (2.46)$$

звідкіля маємо

$$\omega_{\max} = \frac{F_{0x}}{(M+m)gT_{12}} = \frac{\varphi_{\max}}{2T_{12}}. \quad (2.47)$$

З передавальної функції (2.43) знаходимо

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{F_{0x}}{(M+m)} \left[\left(1 - \cos \frac{t}{T_{12}} \right) + T_0^2 \frac{d^2}{dt^2} \left(1 - \cos \frac{t}{T_{12}} \right) \right] = \\ &= \frac{F_{0x}}{(M+m)} \left(1 - \cos \frac{t}{T_{12}} + \frac{T_0^2}{T_{12}^2} \cos \frac{t}{T_{12}} \right) \\ &= \frac{1}{(M+m)} \left[1 + \left(\frac{T_0^2}{T_{12}^2} - 1 \right) \cos \frac{t}{T} \right], \end{aligned} \quad (2.48)$$

або з врахуванням (2.23)

$$a(t) = \frac{F_{0x}}{(M+m)} \left[1 + \frac{m}{M} \cos \frac{t}{T_{12}} \right] \quad (2.49)$$

З рівняння (2.49) знаходимо

$$a_{\max} = \frac{F_{0x}}{M}, \quad a_{\min} = \frac{F_{0x}}{M+m} \cdot \frac{M-m}{M} = a_{\max} \frac{M-m}{M+m} \quad (2.50)$$

Отже, лінійне прискорення коливається навколо середнього значення

$$a_0 = (a_{\max} + a_{\min})/2 = F_{0x}/(M+m) \quad (2.51)$$

з амплітудою

$$A_a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2} = \frac{F_{0x}m}{2M(M+m)} \quad (2.52)$$

Розрахуємо характерні параметри графіків рисунка 2.8 при вихідних даних, зведених у таблиці 2.1, за наведеними вище формулами:

$$\begin{aligned}
 T_{12} &= \sqrt{12/9.8 \cdot 2000/6000} = 0.64 \text{ с}, \\
 T_{k12} &= 2\pi \cdot 0.64 = 4.01 \text{ с}, \\
 \varphi_{\max} &= -2 \cdot 3000/6000/9.8 = 0.102 \text{ рад} = 5.84^\circ, \\
 \omega_{\max} &= 5.84/2/0.64 = 4.57 \text{ град/с}, \\
 a_{\max} &= 3000/2000 = 1.5 \text{ м/с}^2, \\
 a_{\min} &= 1.5 \cdot (2000 - 4000)/(2000 + 4000) = -0.5 \text{ м/с}^2
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

Результати розрахунків співпадають з параметрами перехідних процесів представлених на рис. 2.8, що свідчить про адекватність розроблених моделей.

Як бачимо, вантаж з великою масою не тільки розгойдується сам, але й розгойдує візок.

3) для вантажу, підвішеного до візка, закріпленого на мосту, який рухається під дією постійного зусилля, розрахованого з умови забезпечення середнього прискорення візка $a_{z0} = 0.2 \text{ м/с}^2$: $F_{z0} = (M_x + M_z + m)a_{z0} = 4800 \text{ Н}$

Використаємо розрахунок с попереднього пункту, враховуючи масу мосту

$$T_{13} = \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{M_b}{M_b + M + m}}, \quad T_{k13} = 2\pi T_{13}, \tag{2.54}$$

$$\varphi_{z\max} = -\frac{2F_{z0}}{(M_b + M + m)g} = -\frac{2a_{z0}}{g}, \quad \omega_{z\max} = \frac{\varphi_{z\max}}{2T_{13}}, \tag{2.55}$$

$$a_{z\max} = \frac{F_{0z}}{M_b + M} = a_{z0} \frac{M_b + M + m}{M_b + M}, \quad a_{\min} = a_{z0} \cdot \frac{M_b + M - m}{M_b + M} \tag{2.56}$$

При використанні вихідних параметрів, заданих у таблиці 2.1, за наведеними вище формулами отримуємо: $T_{13} = 1.01 \text{ с}$, $T_{k12} = 6.34 \text{ с}$, $\varphi_{\max} = -2.34^\circ$, $\omega_{\max} = 1.15 \text{ град/с}$, $a_{\max} = 0.24 \text{ м/с}^2$, $a_{\min} = 0.16 \text{ м/с}^2$, що збігається з параметрами наведених на графіках рис. 2.11 і свідчить про адекватність моделі. Із аналізу перехідних процесів також видно, що при однаковій кутовій амплітуді коливань вантажу, амплітуда коливань

прискорення візка у 10 раз перевищує амплітуду коливань прискорення моста, що пояснюється таким же відношенням маси моста з візком до маси візка.

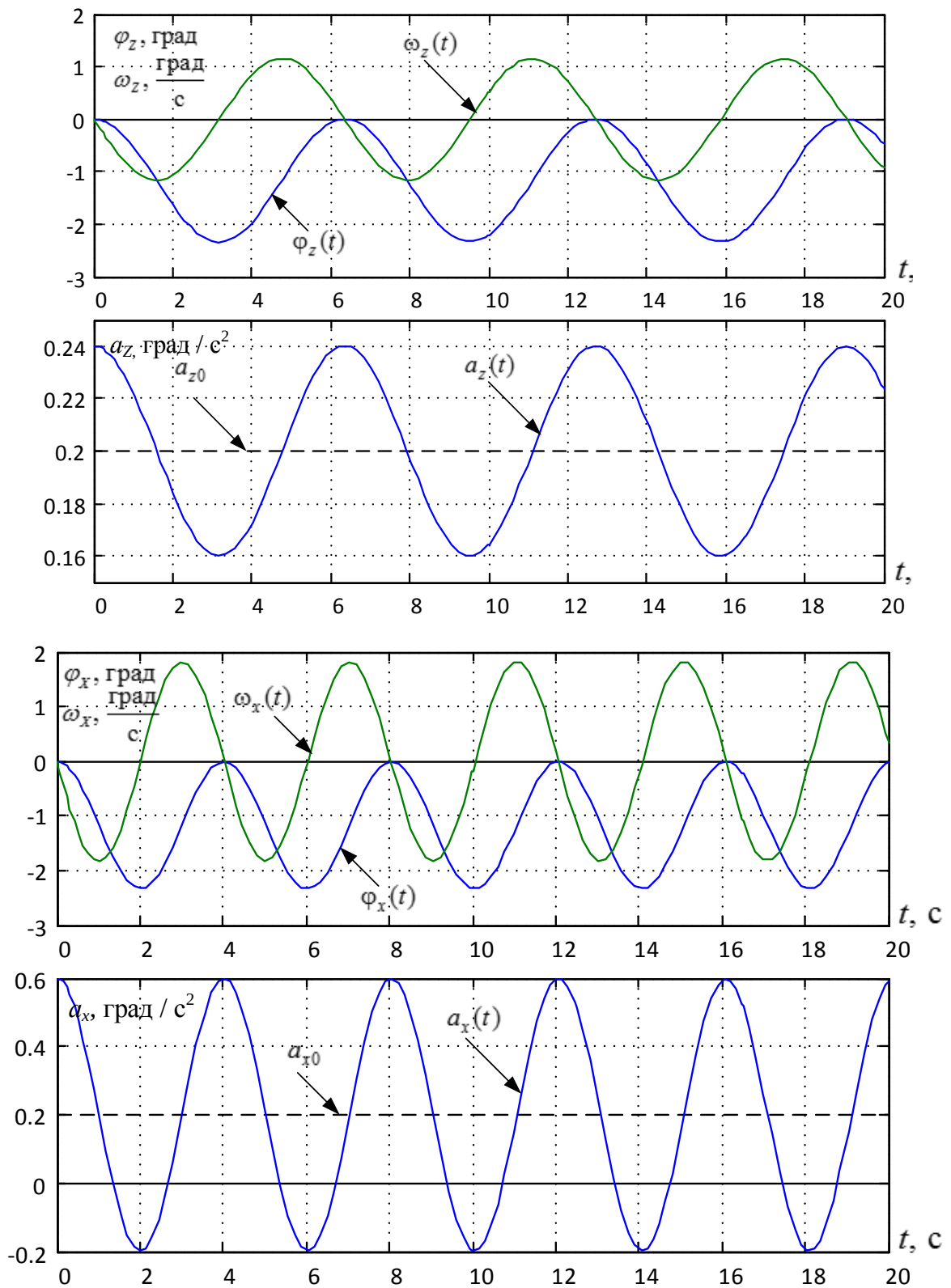


Рис. 2.11 Реакції системи міст-візок-вантаж на ступінчасті зусилля

Розглянемо перехідні процеси при зусиллях, розрахованих так, щоб при одночасному початку руху візка і моста візок пересунувся на 5 м, а міст – на 4 м, здійснюючи переміщення за трапецеїдальними тахограмами при усталеній швидкості $v_{xu} = v_{zu} = 0.4$ м/с.

Такі графіки показані на рис. 2.12: перший графік – прискорення, швидкість та переміщення моста з візком та вантажем; другий графік – прискорення, швидкість та переміщення візка з вантажем відносно моста; третій і четвертий графіки – коливання вантажу у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

На рис. 2.12 показано траєкторію рухів вантажу відносно вертикалі, що проходить через точку підвісу.

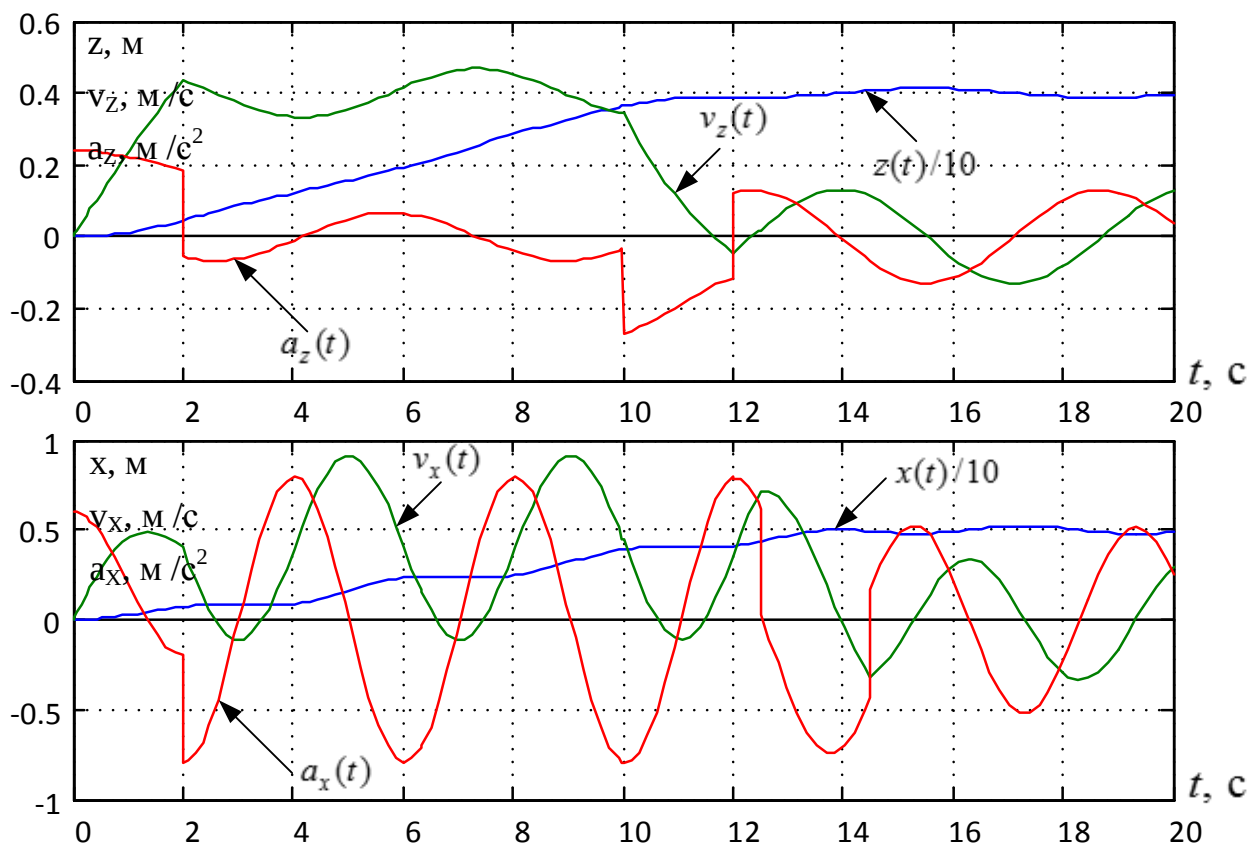


Рис. 2.12 Перехідні процеси при переміщенні моста і візка на задані відстані

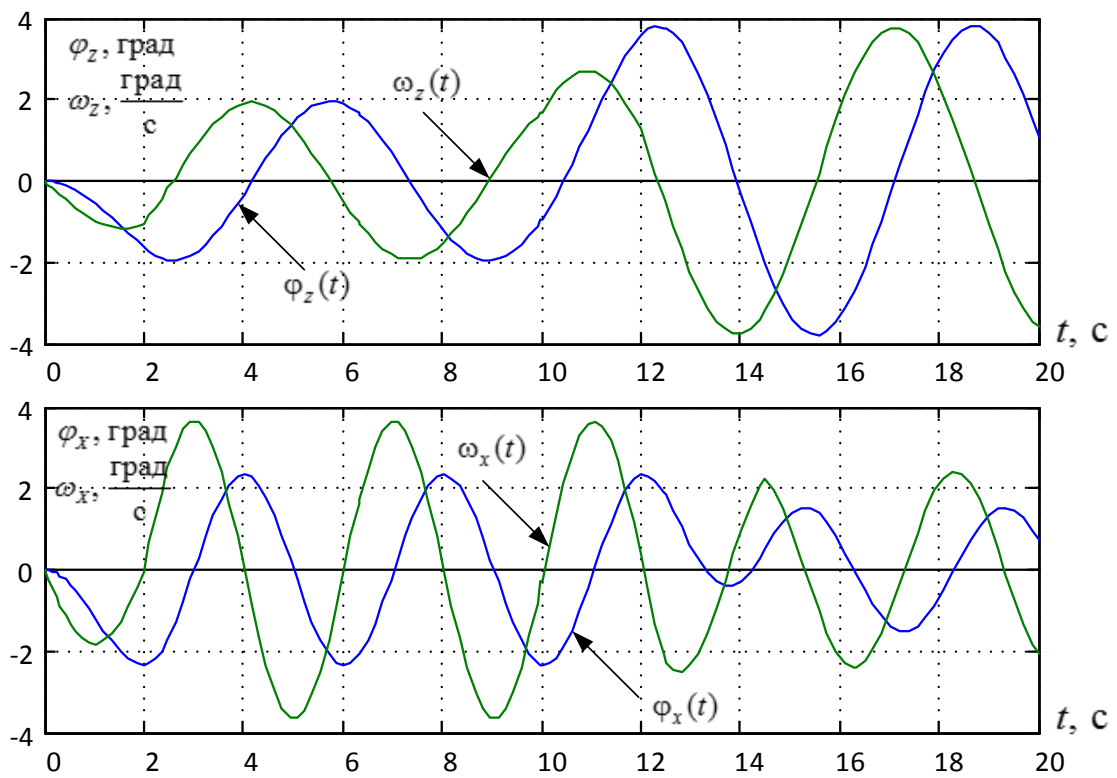


Рис. 2.12 (продовження) Перехідні процеси при переміщенні моста і візка на задані відстані

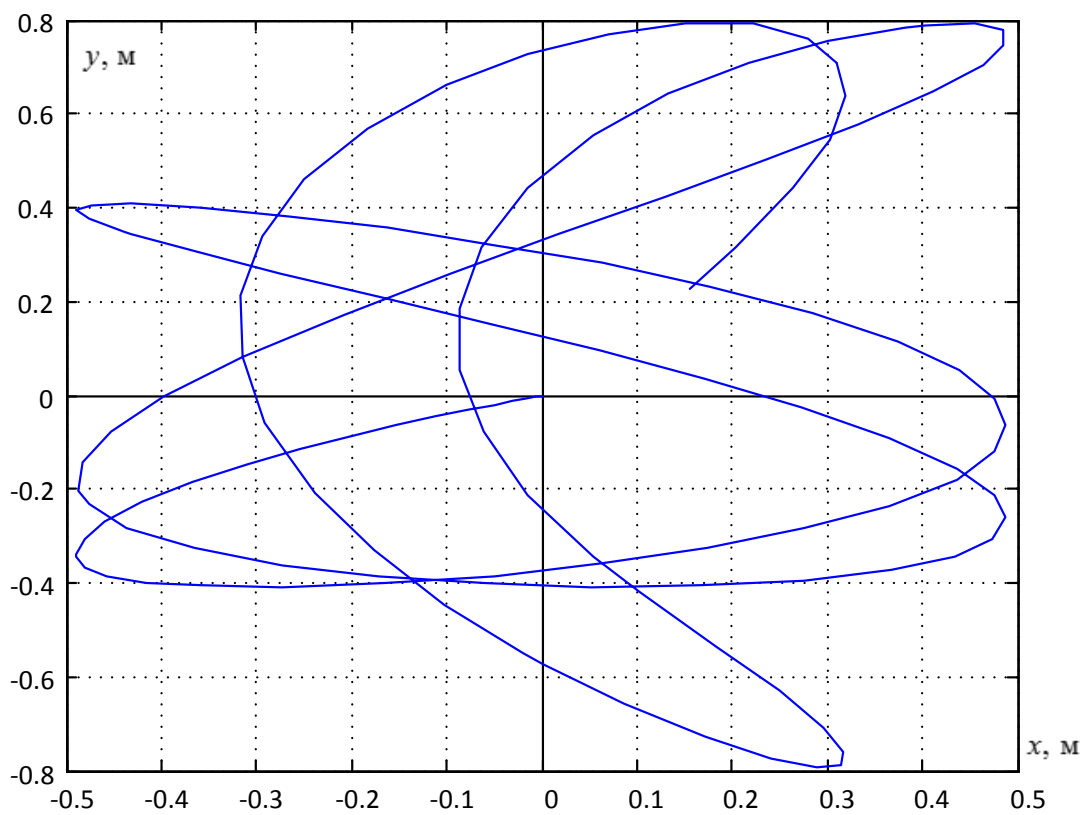


Рис. 2.13 Траєкторія рухів вантажу відносно вертикалі (вид зверху з точки підвісу вантажу)

З аналізу наведених графіків видно, що коливання усіх зосереджених мас продовжуються навіть тоді, коли зусилля F_x та F_z стають нульовими.

На рис. 2.14-2.15 зображені ті ж самі графіки при скоригованих часових характеристиках сигналів $F_x(t)$ та $F_z(t)$. Коригування полягає у тому, що тривалість рухів з постійною силою дорівнює для візка періоду коливань T_{k12} , а для моста $-T_{k13}$, тобто ступінчаті зміни зусиль відбуваються тоді, коли кути відхилення вантажу від вертикалі і кутові швидкості коливань нульові. При цьому на ділянках руху візка та моста з усталеною швидкістю та при зупинці цих механізмів коливання вантажу відсутні. Вантаж здійснює лише по одному коливанню під час розгону та гальмування візка і крана.

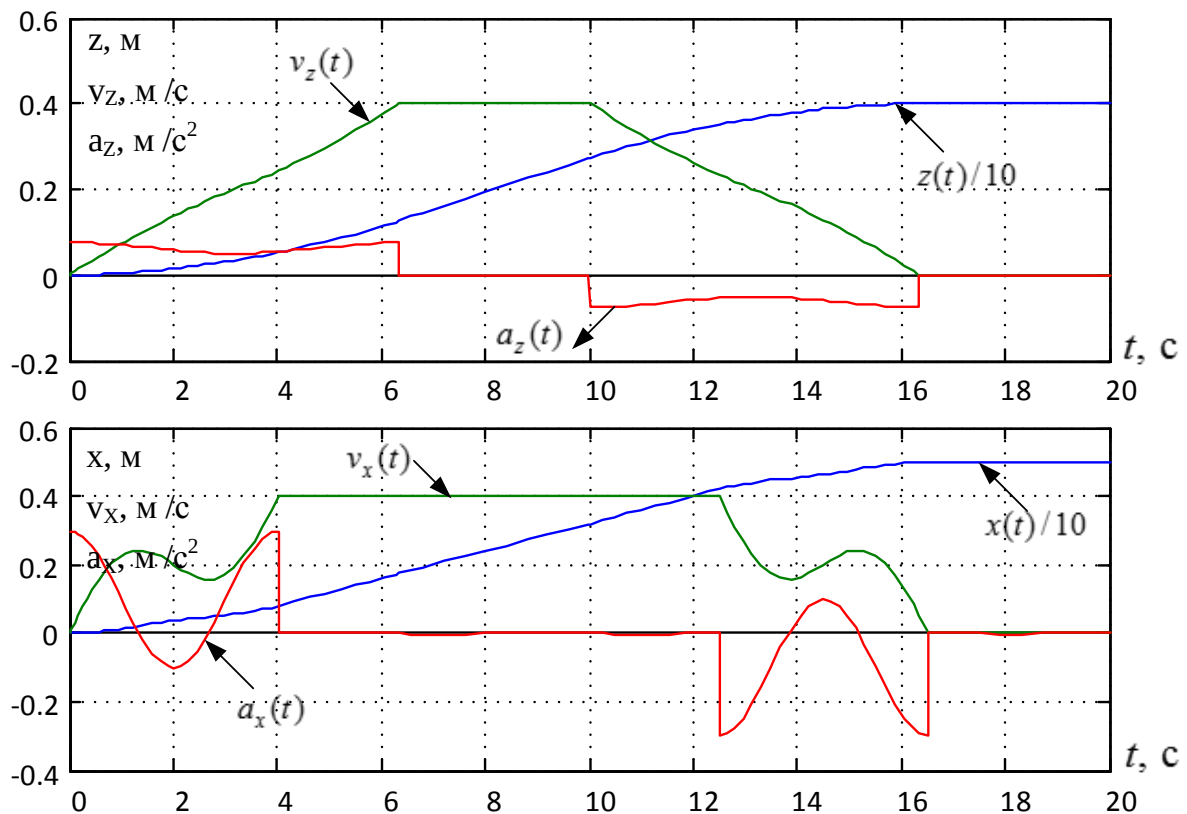


Рис. 2.14 Перехідні процеси при переміщенні моста і візка на задані відстані при скоригованих часах розгону та гальмування

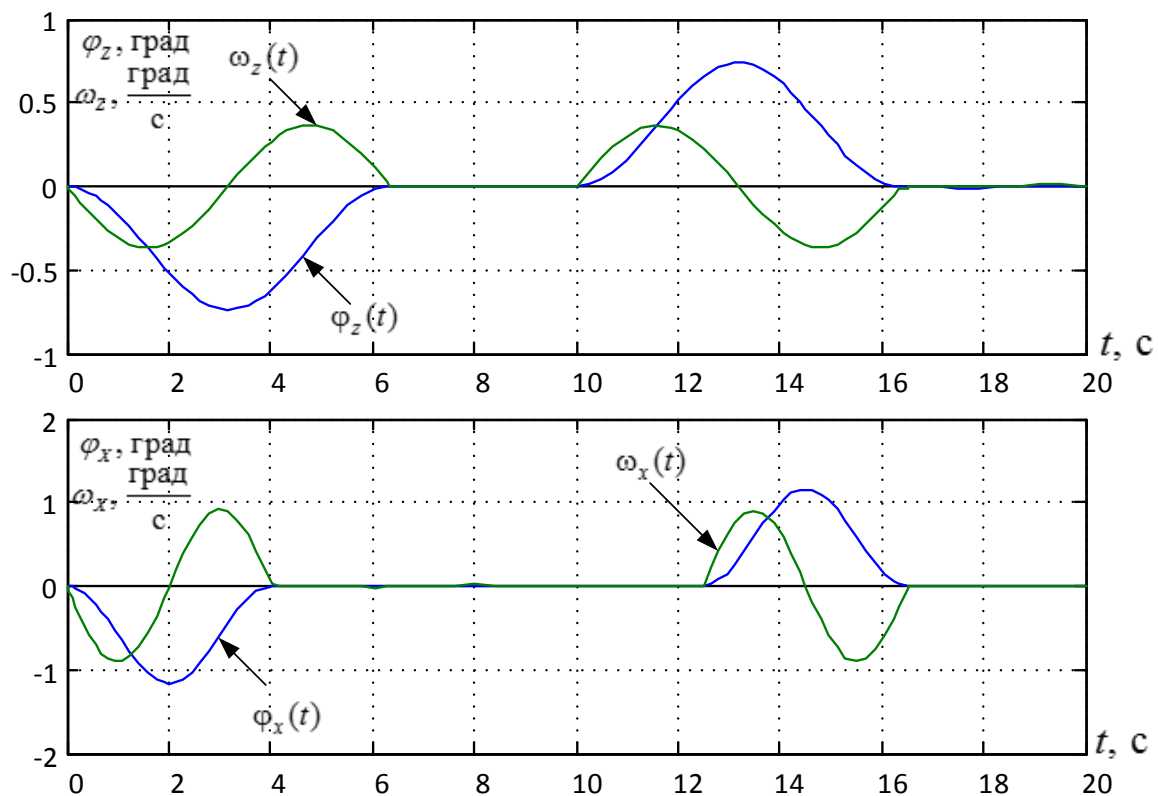


Рис. 2.15 Перехідні процеси при переміщенні моста і візка на задані відстані при скоригованих часах розгону та гальмування

Траєкторія відхилень вантажу від вертикальної осі, що проходить через точку підвісу вантажу до візка, у такому випадку має вигляд рис. 2.16.

Недоліком цього способу гасіння коливань вантажу є зниження величини прискорення, що приводить до зменшення продуктивності.

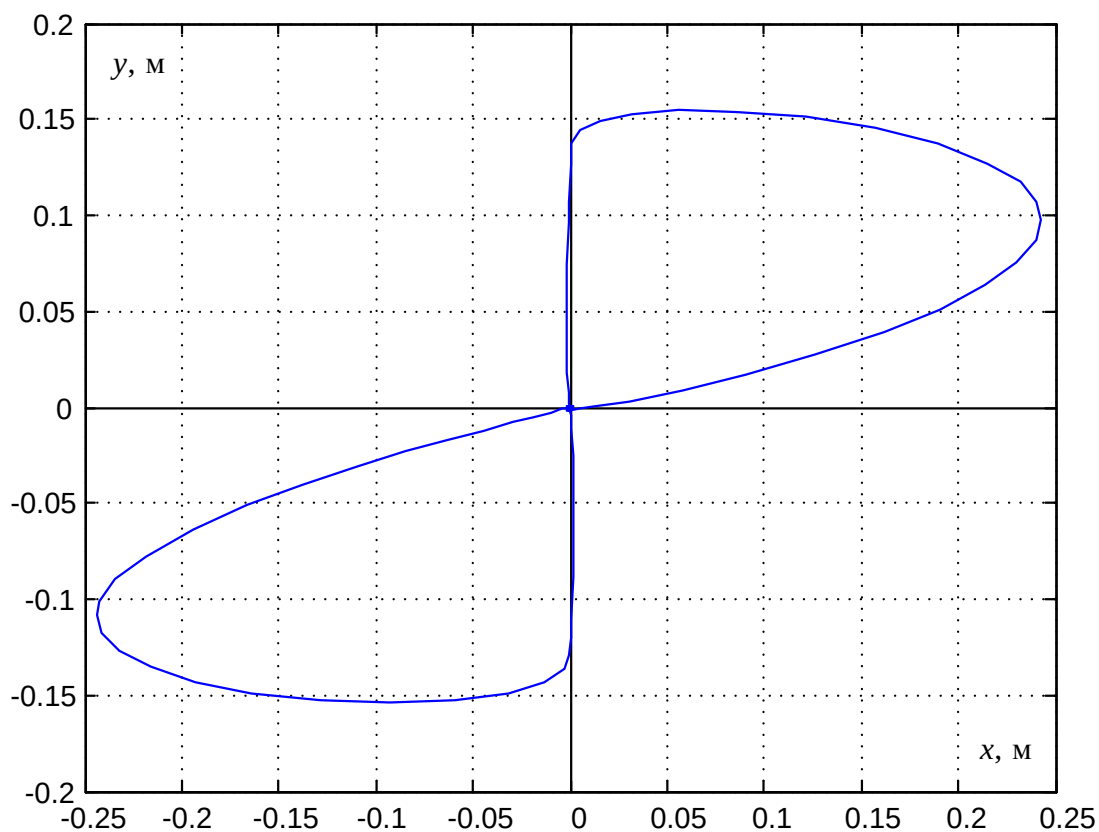


Рис 2.16 Траєкторія рухів вантажу відносно вертикалі при скоригованих часах розгону та гальмування візка і крана

Розглянемо одночасну роботу усіх трьох механізмів: моста, візка і лебідки. Графіки перехідних процесів, отримані при переміщенні моста на 12 м, візка по мосту на 15 м при зміні довжини канату на 7 м, отримані за допомогою розробленої моделі, показані на рис. 2.17. На початку руху довжина канату зменшується, тобто вантаж підіймають на певну висоту, а потім довжина відновлюється, тобто вантаж опускають дондолу.

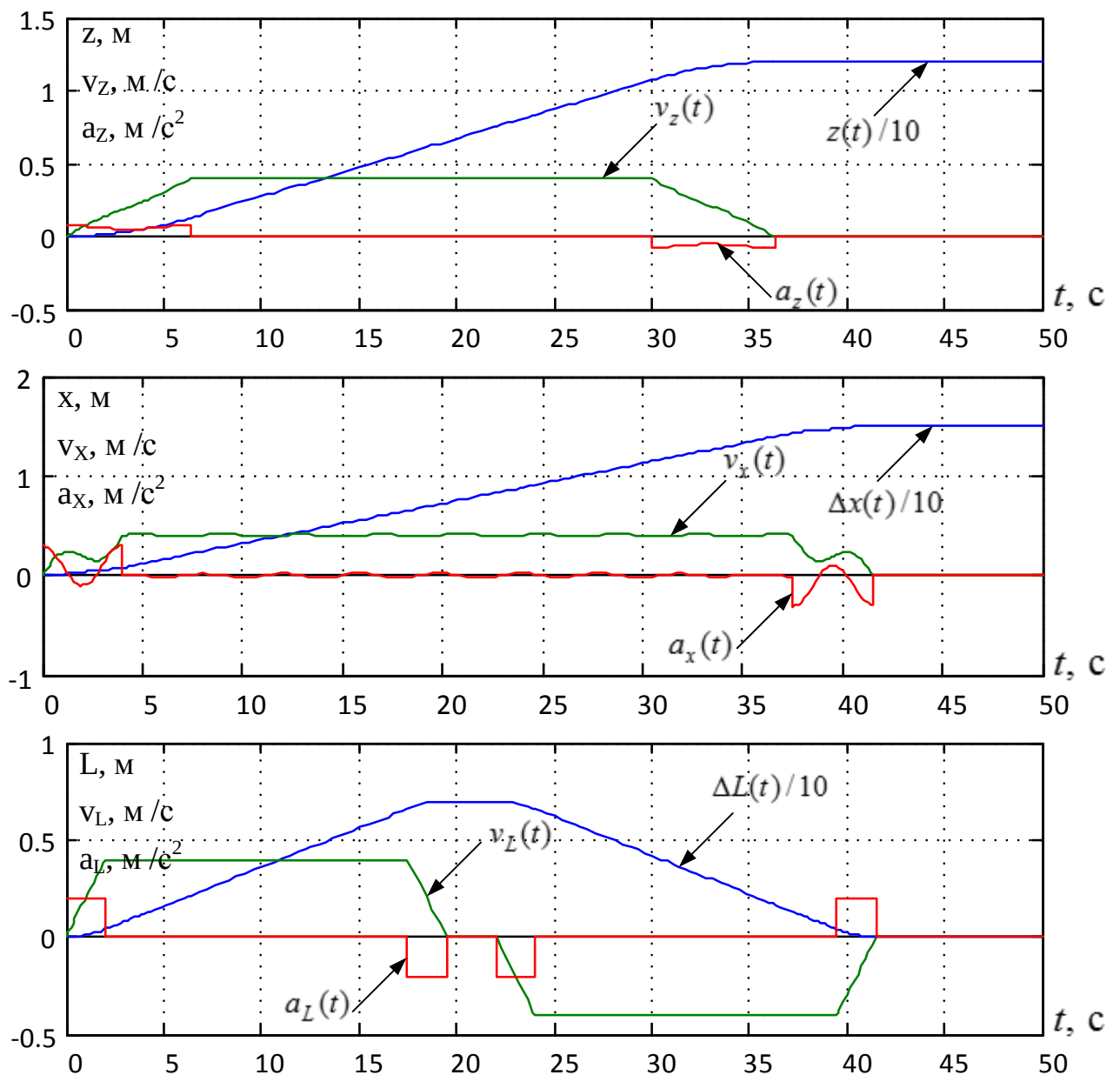


Рис. 2.17 Графіки перехідних процесів прискорень, швидкостей та переміщень моста, візка та зміни довжини каната

На рис. 2.18 подані траєкторії руху вантажу, а на рис. 2.19 – траєкторії відхилень вантажу від вертикалі, що проходить через точку підвісу канату, у тривимірному просторі.

На початку руху довжина канату зменшується, тобто вантаж підіймають на певну висоту, а потім довжина відновлюється, тобто вантаж опускають додолу.

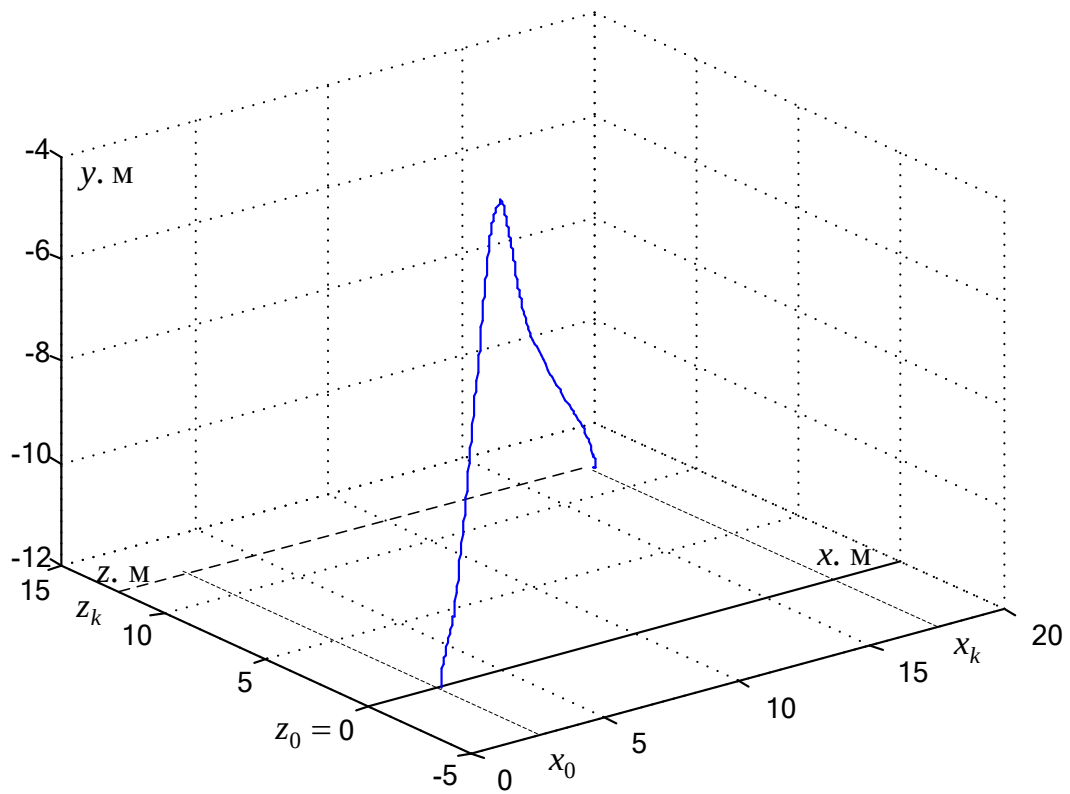


Рис. 2.18 Траєкторія руху вантажу при одночасних переміщеннях моста на 12 м, візка – на 15м та при зміні довжини канату – на 7 м

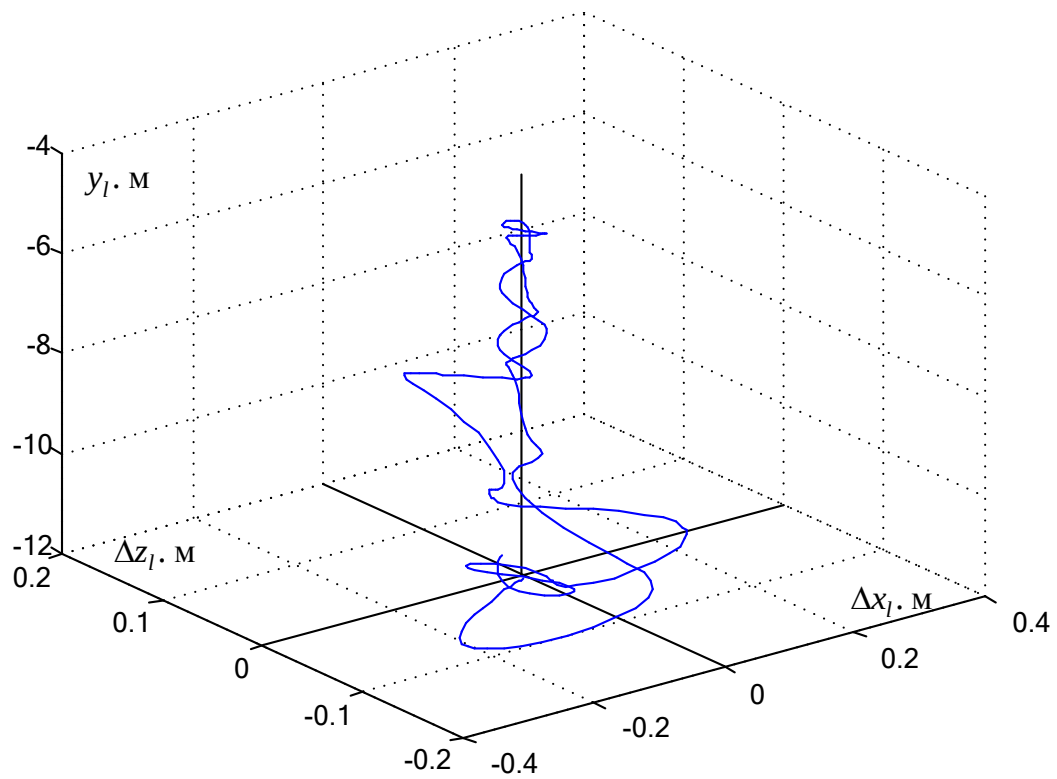


Рис. 2.19 Траєкторія руху вантажу відносно вертикалі, що проходить через точку підвісу канату

2.2 Аналіз даних моделювання механізмів крана-маніпулятора при позиціюванні вантажу

Одне з питань, яке виникає при керуванні краном, це переміщення вантажу в кінцеву точку без коливань, іншими словами позиціонування вантажу. Тому синтезуємо систему регулювання швидкості кранового механізму поступального переміщення за допомогою лінійного керування зі змінними параметрами, яка зможе ефективно гасити коливання вантажу, що переміщується мостовим краном, з урахуванням зміни довжини каната.

Як приклад механізмів, що здійснюють поступальне переміщення вантажу в горизонтальному і вертикальному напрямках, розглянемо візок мостового крана і розташований на ньому підйомний пристрій блочного типу. Схематичне зображення такої механічної системи приведено на рис. 2.20.

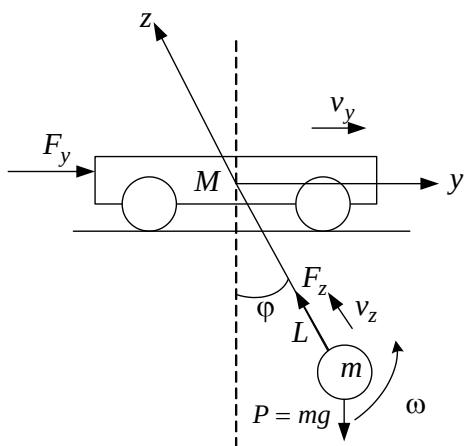


Рис. 2.20 Схематичне зображення механічної системи візка

S_y, v_y – лінійне переміщення і швидкість візка масою M ; F_y – зусилля, що виробляється приводними двигунами візка; φ, ω – кут відхилення вантажу від вертикалі і його кутова швидкість відповідно; m – маса вантажу; L – довжина канату; v_z – швидкість підйому вантажу; F_z – зусилля, що виробляється приводом підйому вантажу, g – прискорення вільного падіння.

Математичний опис руху даної системи має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dv_y(t)}{dt} = \frac{1}{M+m} \left[F_y(t) + mL(t) \left(\frac{d\omega(t)}{dt} \cos \varphi(t) - L(t) \omega^2(t) \sin \varphi(t) + \frac{dv_z(t)}{dt} \sin \varphi(t) + 2v_z(t) \omega(t) \cos \varphi(t) \right) \right], \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{L(t)} \left[\frac{dv_y(t)}{dt} \cos \varphi(t) + g \sin \varphi(t) + 2v_z(t) \omega(t) \right], \\ \frac{dv_z(t)}{dt} = \frac{F_z(t)}{m} + \frac{dv_y(t)}{dt} \sin \varphi(t) + L(t) \omega^2(t) + g \cos \varphi(t), \\ \frac{ds_y(t)}{dt} = v_y(t), \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \quad \frac{dL(t)}{dt} = -v_z(t). \end{cases} \quad (2.57)$$

Відомо, що одним із способів гасіння пружних коливань в системах регулювання швидкості багатомасових електромеханічних об'єктів, є використання систем зі зворотним зв'язком по вектору стану повного порядку, які часто називають системами модального керування (СМК). Спробуємо використовувати таку систему для гасіння коливань вантажу.

При цьому будемо керувати тільки приводом горизонтального переміщення. Тому виключимо з системи (2.57) рівняння для похідних за швидкістю і переміщенню в вертикальному напрямку, а 3 рівняння які залишились лінеаризуємо при загальноприйнятих припущеннях, справедливих для малих значень кута відхилення вантажу і його кутової швидкості ($\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\omega_2 \approx 0$):

$$\begin{cases} (M+m) \frac{dv_y(t)}{dt} + mL(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = F_y(t), \\ \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \\ \frac{dv_y(t)}{dt} + L(t) \frac{d\omega(t)}{dt} + g\varphi(t) = 0. \end{cases} \quad (2.58)$$

Робота підйомного пристрою враховується в рівняннях (2.57) довжиною каната, яка змінюється в функції часу.

Для математичного опису досліджуваного об'єкта в просторі станів перетворимо перше і третє рівняння системи (2.57) таким чином, щоб в кожному з них були присутні похідні тільки по одному з регульованих сигналів:

$$\begin{cases} M \frac{dv_y(t)}{dt} = F_y(t) + mg\varphi(t), \\ \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) \\ L(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{1}{M} F_y(t) - \frac{g(M+m)}{M} \varphi(t). \end{cases} \quad (2.59)$$

Із системи (2.59) отримуємо опис даного об'єкту регулювання в просторі станів:

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}u(t), \quad s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}u(s), \quad (2.60)$$

де

$$u = F_y, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} v_y \\ \varphi \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{(M+m)g}{ML(t)} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{ML(t)} \end{bmatrix}. \quad (2.61)$$

Структурна схема СМК досліджуваним об'єктом представлена на рис. 2.21, де *Crane* – модель крана представлена на рис. 2.2, *Fz-Loop*, *Fy-Loop* – замкнуті контури регулювання зусиль, *Speed Controller* – ПІ-регулятор швидкості підйомного пристрою, *Reference Speed Generator* – задатчик інтенсивності систем керування візком (*y*) і підйомним пристроєм (*z*), *Filter* – фільтр, *Dot Product* – скалярний добуток.

Вектор коефіцієнтів зворотних зв'язків СМК $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3] = [k_v \ k_\varphi \ k_\omega]$ можна визначити рішенням рівняння

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}) = G(s), \quad (2.62)$$

де

$$G(s) = s^3 + \Omega_0 \gamma_2 s^2 + \Omega_0^2 \gamma_1 s + \Omega_0^3, \quad (2.63)$$

γ_1, γ_2 – коефіцієнти бажаного нормованого характеристичного полінома, що визначають вид перехідної характеристики, Ω_0 – середньо геометричний корінь (СГК), який визначає швидкодію замкнутої системи.

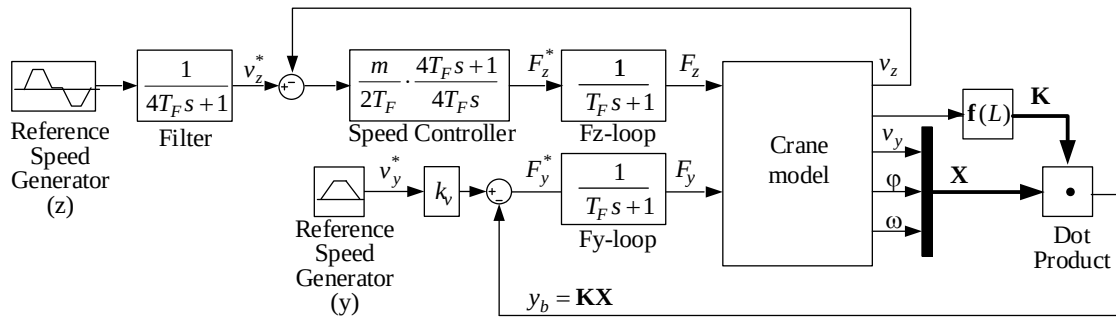


Рис. 2.21. Структурна схема СМК візка мостового крана і підйомного пристрою блочного типу

Вирази для коефіцієнтів регулятора стану, знайдені з рівняння (2.62), мають вигляд

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0^3 M L(t)}{g} & g(M + m) - \Omega_0^2 \gamma_1 L(t) M & -\frac{M \Omega_0 L(t) (\gamma_2 g - \Omega_0^2 L(t))}{g} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

В якості бажаного характеристичного полінома замкнутої системи приймемо поліном Бесселя, який має коефіцієнти $\gamma_2 = 2.433$, $\gamma_1 = 2.466$ [32], і забезпечує протікання перехідних процесів з малим перерегулюванням (1-2%).

Результати моделювання системи рис.2.21 при $M = 2000$ кг, $m = 4000$ кг, $L_0 = 12$ м, $a_{y\max} = 0.5$ м/с², $v_{y\max} = 0.5$ м/с, $T_F = 0.002$ с, $\Omega_0 = 1.9$ с⁻¹ в відносних до номінальних значень приведені на рис.2.22 та рис. 2.23.

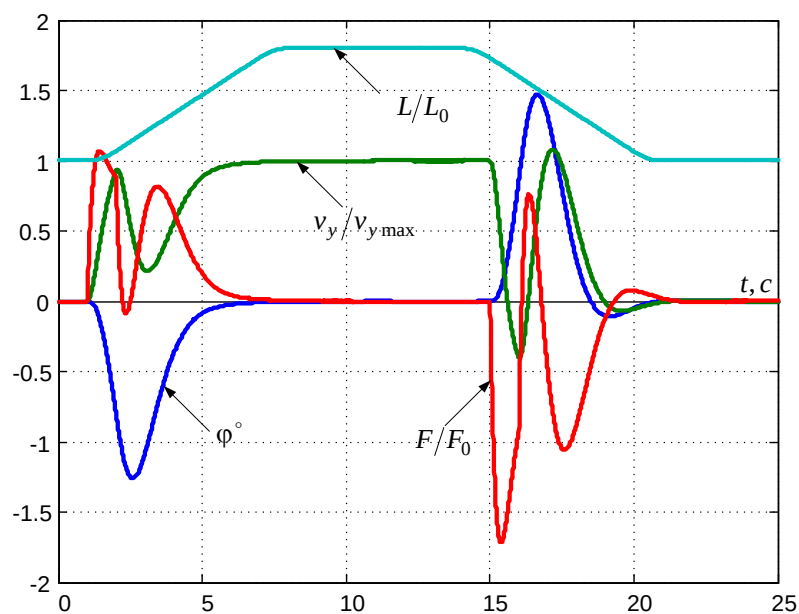


Рис. 2.22.

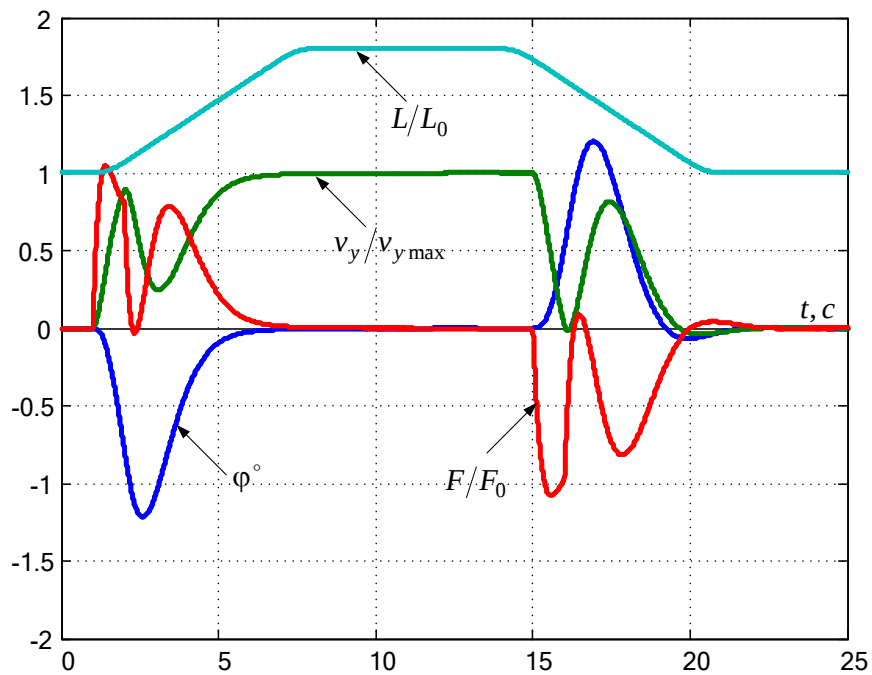


Рис. 2.23.

З аналізу графіків рис.2.23 видно, що при збільшенні довжини каната підвищуються максимальні значення сили, що прикладається до візка, його прискорення та відхилення вантажу від вертикалі. Це обумовлено зміною частоти власних коливань вантажу, яка пов'язана з довжиною каната квадратичною залежністю. Тому для того, щоб не перевищувати максимально допустиме прискорення, спробуємо адаптувати величину СГК Ω_0 до зміни частоти власних коливань вантажу відповідно до емпіричної формули

$$\Omega_{0v} = \Omega_0 \cdot \sqrt{\frac{L_0}{L}}, \quad (2.65)$$

де L_0 – початкове значення довжини каната. Результати роботи системи рис.2.23 з варіацією СГК характеристичного полінома представлені на рис. 2.24, з якого видно, що, завдяки корекції СГК, якість перехідних процесів стало значно менше залежати від довжини каната.

Для реалізації, запропонованої САК необхідні дорогі датчики, які вимірюють кутову швидкість і кут відхилення вантажу від вертикалі. Більш економічним рішенням є відновлення вектору стану за допомогою спостерігача.

Структурна схема спостерігача стану (СС) Люенбергера, побудована на лінеаризованій моделі об'єкта регулювання (2.58) з урахуванням зміни довжини каната, зображена на рис. 2.24. Вектор коефіцієнтів коригувальних зв'язків спостерігача $\mathbf{L}_{obs} = [l_1 \ l_2 \ l_3] = [l_v \ l_\phi \ l_\omega]$ можна визначити рішенням рівняння

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{L}_{obs}\mathbf{C}) = G(s), \quad (2.66)$$

де матриця виходу визначає змінну v_y , по якій здійснюється корекція НС: $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0]$.

З рівняння (2.66) знаходимо

$$\mathbf{L}_{obs} = \left[\alpha_2 \Omega_{obs}, \quad \frac{L(t)M\alpha_3\Omega_{obs}^2 - (M+m)g}{L(t)mg}, \quad -\frac{\alpha_2 g(M+m)\Omega_{obs} - L(t)M\Omega_{obs}^3}{L(t)mg} \right]^T. \quad (2.67)$$

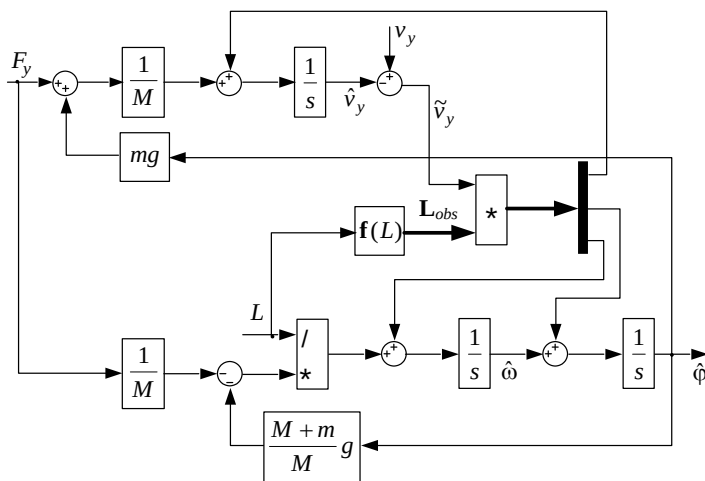


Рис.2.24

При наявності такого СС зворотні зв'язки за кутом відхилення вантажу від вертикалі і по кутовій швидкості вантажу в системі рис.2.21 можна замінити зворотними зв'язками за оцінками цих сигналів.

Моделювання показує, що перехідні процеси в СМК, замкнутої через СС рис.2.24, при $\Omega_{obs} = 2\Omega_0$,

практично не відрізняються від перехідних процесів в СМК рис.2.21, замкнутої по вимірним змінним стану, і мають вигляд рис.2.23.

Слід звернути увагу на те, що тахограма візка в розглянутій замкнутій системі, попри те, що задатчик інтенсивності формує трапецеїдальну діаграму, автоматично набуває вигляду триетапної діаграми, тобто при розгоні має ділянку пригальмовування, а при гальмуванні – ділянку подрозгону. Як відомо, трьохетапні тахограми руху візка використовуються при синтезі задаючого пристрою, для оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу, і вимагають попереднього розрахунку тривалості кожного з етапів тахограми. Будь-яке параметричне або сигнальне збурення (наприклад, початкове

відхилення каната від вертикалі або зміну довжини каната) робить такий спосіб гасіння коливань неспроможним. Можна показати, що в розробленій замкнутій системі наявність збурень впливає тільки на якість перехідних процесів, але не заважає виконанню основного завдання позиціонування.

2.3. Розробка моделі для дослідження процесів роботи вантажопідйомного пристрою при переміщенні вантажу, вага якого змінюється

В даному розділі розглядається розробка структурної математичної моделі механічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації металевих відходів, що виконує функцію підйому-опускання кошика з забрудненим металом у ванну з дезактивуючим розчином. При розробці моделі враховано зміну моменту статичного опору, зумовлену дією виштовхувальної сили при зануренні кошика з вантажем у рідину, та зміну моменту інерції приводу при роз'єднанні колони і кошика після досягнення кошиком дна ванни. Шляхом Simulink-моделювання доведено доцільність застосування для вантажопідйомного пристрою системи позиційного електроприводу.

Металеві відходи відвантажуються на стіл прийому і видачі у кошику, після чого в роботу включається кран-маніпулятор, який за допомогою автоматичної зачепи захоплює кошик з відходами та переміщає його до модуля ультразвукової дезактивації з ваннами, що містять кислий або лужний розчини. Перед підходом крана-маніпулятора до потрібної ванни, кришка ванни автоматично відкривається, і вантажопідйомний пристрій, виконаний у вигляді телескопічної колони, опускає кошик у ванну. Після досягнення кошиком дна ванни рухома частина колони опускається ще на невелику відстань, щоб відчепити від кошика гачки, і потім знову підіймається на максимальну висоту. Тоді кришка ванни закривається і запускається ультразвуковий процес дезактивації.

Схематично вантажопідйомний пристрій крана-маніпулятора з кошиком, який занурено у ванну, наведено на рис. 2.25.

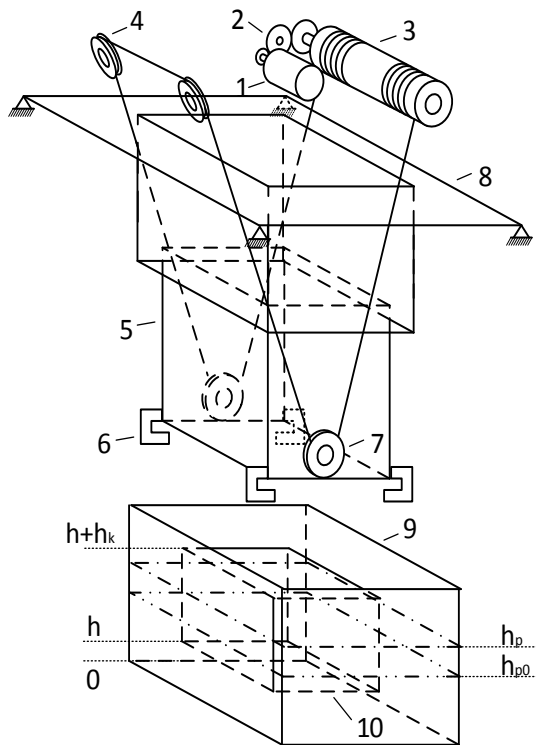


Рис. 2.25 Вантажопідйомний пристрій крана-маніпулятора

1 – двигун; 2 – редуктор; 3 – барабан;
 4 – продольний блок; 5 – рухома частина колони; 6 – гачки зачепу кошика;
 7 – поперечний блок; 8 – основа телескопічної колони; 9 – ванна;
 10 – кошик; h_{p0} – початковий (до занурення кошика); h_p – поточний рівень рідини у ванні; h_k – висота кошика;
 h – позиція нижнього краю колони

Під час руху вантажу в рідині на нього згідно з законом Архімеда діє окрім сили тяжіння виштовхуюча сила, яка визначається виразом

$$F_A(h) = \rho_p V(h)(g \pm a) \quad (2.68)$$

де ρ_p – щільність рідини; $V(h)$ – об'єм рідини, витісненої кошиком з вантажем, що залежить від глибини занурення кошика h ; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; a – прискорення кошика. У формулі знак «+» діє при зануренні вантажу, а знак «-» – при його підйманні. З урахуванням малості прискорення $a \ll g$, що є дійсним для більшості кранів-маніпуляторів, сила Архімеда визначається рівнянням

$$F_A(h) = \rho_p g V(h). \quad (2.69)$$

Якщо припустити, що вантаж є однорідним та його об'єм рівномірно розподілений за висотою кошика і повністю його заповнює, то

$$V(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } (h > h_{p0}), \\ S_k(h_p - h) & \text{при } 0 < h < h_{p0} \text{ \& } (h_p - h) \leq h_k, \\ Sh_k & \text{при } 0 < h < h_{p0} \text{ \& } (h_p - h) > h_k, \end{cases} \quad (2.70)$$

де S_k – площа дна кошика; h_{p0}, h_p – початковий (до занурення кошика) та поточний рівень рідини у ванні відповідно; h_k – висота кошика; h – позиція нижнього краю колони, яка має значення 0 тоді, коли кошик з вантажем торкається дна ванни.

Із балансу обсягів кошика з відходами, що занурюється, та рідини, що виштовхується з ванни з площею дна S_b

$$S_k(h_p - h) = S_b(h_p - h_{p0}), \quad (2.71)$$

випливає

$$h_p = \frac{h_{p0} - k_S h}{1 - k_S}, \quad h_p = \frac{h_{p0} - k_S h}{1 - k_S}, \quad (2.72)$$

де $k_S = S_k / S_b$.

З урахуванням дії виштовхувальної сили статичний момент навантаження двигуна вантажопідйомного пристрою визначатиметься формулою

$$M_c(h) = (mg - F_A(h))r, \quad r = v_{\text{ткуст}} / \omega_{\text{уст}}, \quad (2.73)$$

де $v_{\text{ткуст}}, \omega_{\text{уст}}$ – усталені значення лінійної швидкості переміщення телескопічної колони та кутової швидкості обертання валу двигуна відповідно. Маса m у рівнянні (2.73) при опусканні кошика складається з маси рухомої частини телескопічної колони $m_{\text{тк}}$, маси порожнього кошика m_k та маси вантажу m_b , а після досягнення кошиком дна – тільки з маси $m_{\text{тк}}$. В радіусі приведення не враховано кут нахилу канатів.

При відчепленні кошика з вантажем від телескопічної колони змінюється стрибком і сумарний момент інерції установки, приведений до валу двигуна:

$$J_{\Sigma 1}(h) = J_d + (m_{\text{тк}} + m_k + m_b)r^2, \quad J_{\Sigma 2}(h) = J_d + m_{\text{тк}}r^2. \quad (2.74)$$

Якщо вантаж має довільну форму та є різномірним, то характер зміни виштовхувальної сили, а відповідно і залежності $M_c(h)$ стає більш складним. Відомо тільки те, що при зануренні вантажу він буде монотонно зростаючим. Для такого об'єкта керування досить важко розрахувати тахограму, яка б забезпечила досягнення кошиком з вантажем дна ванни при нульовій швидкості без додавання зворотного зв'язку за положенням.

Щоб порівняти можливості систем регулювання швидкості та положення розробимо структурну математичну модель механічної частини системи електроприводу з врахуванням миттєвої зупинки кошика та стрибкоподібної зміни сумарного моменту інерції електроприводу при досягненні кошиком дна ванни. Така *Simulink*-модель зображена на рис. 2.26.

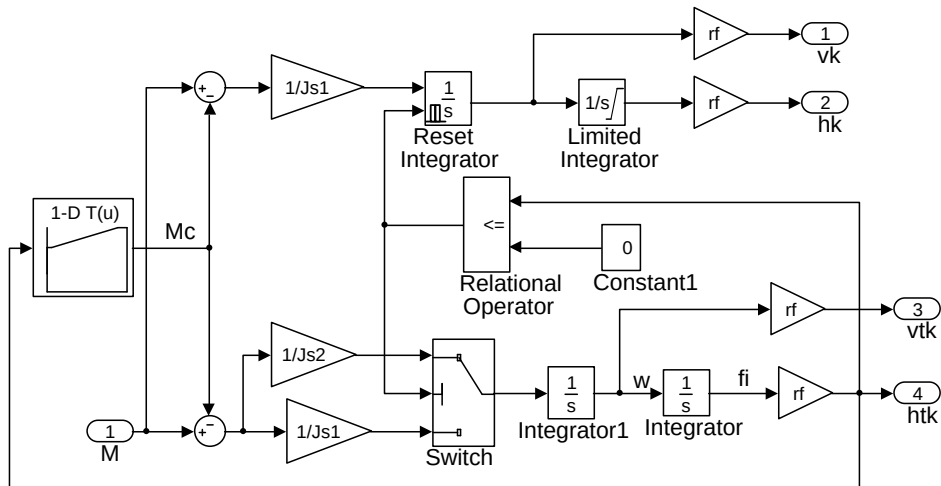


Рис. 2.26 Структурна математична модель механічної системи електроприводу механізму вантажопідйомного пристрою

Залежність $M_c(h)M_c(\varphi)$ при виконанні припущення (2.60) імплементована в модель у вигляді попередньо розрахованої таблиці (блок *Look Up Table*). Дві паралельні гілки моделі відображають той факт, що при опусканні кошика на дно маса кошика з вантажем відокремлюється від телескопічної колони з приводним двигуном. Керований ключ *Switch* в момент відокремлення зменшує сумарний момент інерції системи, приведений до валу двигуна, згідно з рівняннями (2.64). Для імітації миттєвої зупинки кошика при стиканні його з дном ванни положення кошика формується інтегратором з обмеженням (*Limited Integrator*), а швидкість кошика – інтегратором зі скиданням (*Reset Integrator*). Скидання у початковий рівень (в даному випадку у 0), відбувається при досягненні інтегратором, що імітує положення колони, нульового рівня. Останнє є ознакою стикання кошика з дном ванни. Щоб утримати цей стан при продовженні моделювання, параметр *External reset* інтегратора *Reset Integrator* встановлено у стан *Level hold*.

Результати моделювання традиційної потокоорієнтованої системи векторного керування швидкістю [10] телескопічної колони при опусканні її з початкового рівня $h_0=0.85$ м зі швидкістю $v_{\text{TK,уст}}=0.132$ м/с, з урахуванням особливостей механічної частини приводу згідно зі структурною математичною моделлю рис. 2.26, наведені на графіках рис. 2.22 та рис. 2.23.

При моделюванні застосовано параметри асинхронного двигуна 4А80В4У3: $P_H=1,5$ кВт; $n_H=1395$ об/хв; $U_{fH}=220$ В; $I_{SH}=3,3$ А; $M_H=10,27$ Нм; $J_D=0,00355$ кг·м²; $R_s=7,1$ Ом; $R'_r=3,92$ Ом; $L_{s\sigma}=0,015$ Гн; $L'_{r\sigma}=0,022$ Гн; $L_m=0,372$ Гн. Маси $m_{\text{TK}}=1000$ кг; $m_k=120$ кг; $m_B=680$ кг.

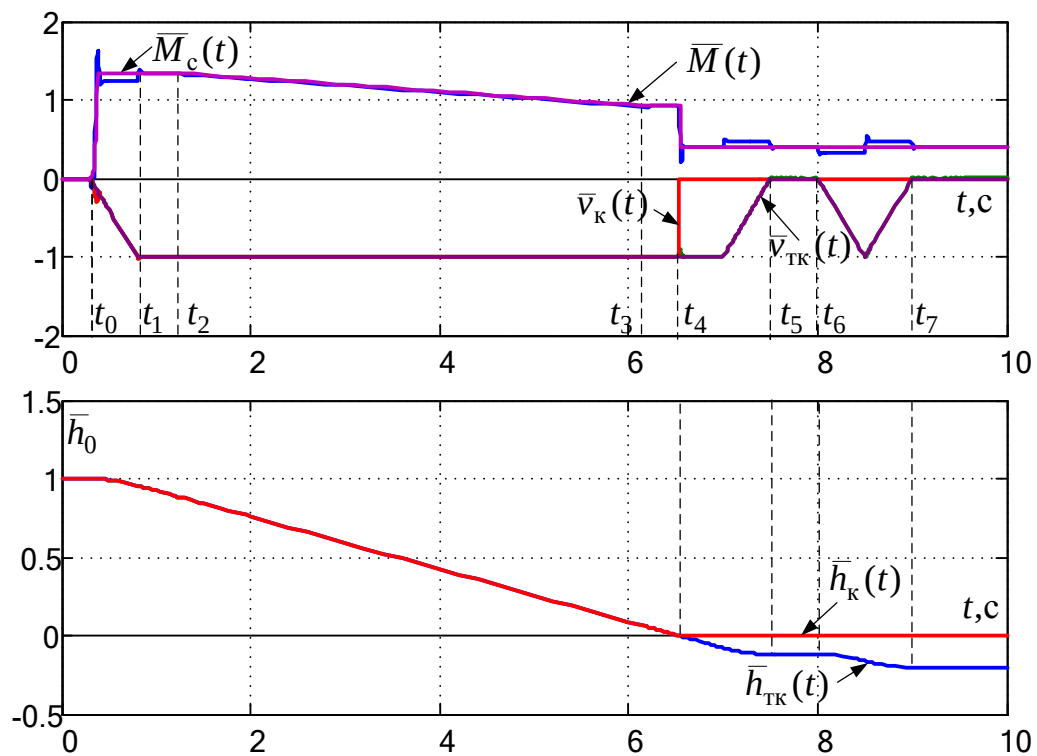


Рис. 2.27 Процес гальмування з запізненням

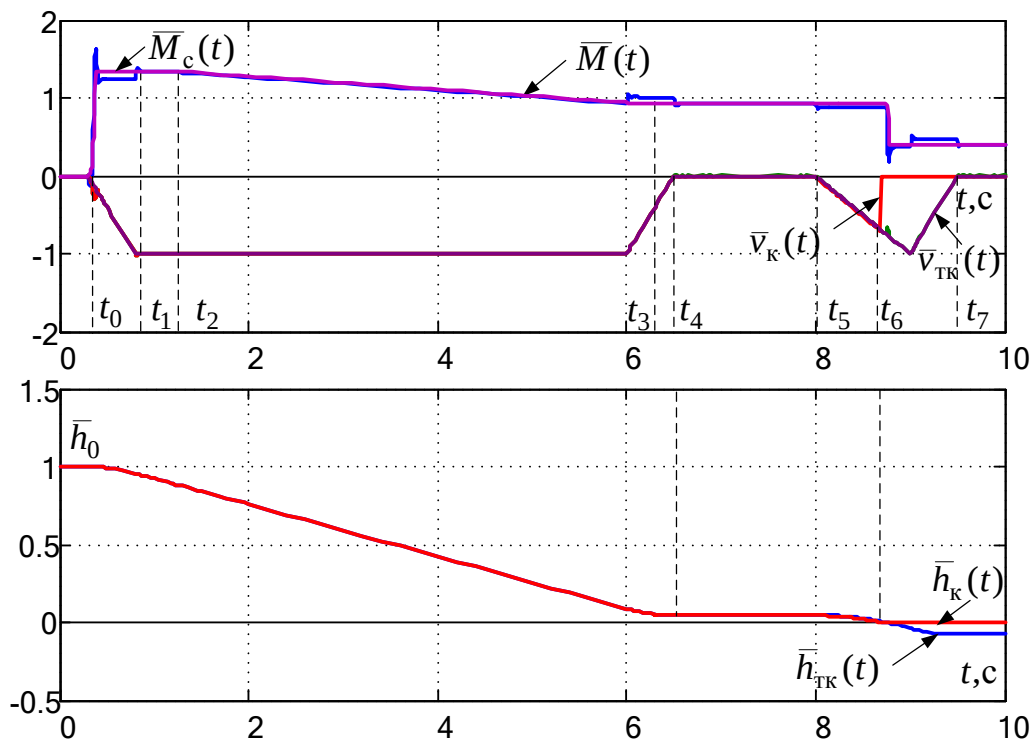


Рис. 2.28 Процес гальмування з випередженням

На рис. 2.27 процес першого гальмування колони розпочинається з запізненням, а на рис. 2.28 – з випередженням. На рисунках позначені: t_0 – час початку розгону; t_1 – час закінчення розгону; t_2 – час початку занурення кошику; t_3 – час закінчення занурення кошику; t_4 – час досягнення кошиком дна; t_5 – час закінчення першого гальмування колони; t_6, t_7 , – моменти часу початку та закінчення додаткового руху колони вниз, призначеного для відчеплення гачків від кошика. Сигнали на графіках приведені у відносних одиницях: $\bar{M} = M / M_n$, $\bar{v}_{TK} = v_{TK} / v_{TK,уст}$, $\bar{v}_K = v_K / v_{TK,уст}$, $\bar{h} = h / h_0$.

З рис. 2.27 видно, що у випадку, коли кошик з вантажем опускається на дно ванни раніше, ніж його швидкість досягне нульового рівня, в момент стикання t_4 швидкість миттєво знижується з початкового рівня до нуля, тобто стикання відбувається з великим ривком, внаслідок чого частина дезактивууючого розчину може вихлюпнутися з ванни. Між тим телескопічна колона продовжує рух донизу (ділянка t_4 - t_5) внаслідок похибки у розрахунку тахограми, а потім ще здійснює додаткове переміщення для відчеплення гачка (ділянка t_6 - t_7). У такий спосіб колона

опускається на більшу відстань ніж регламентовано технологічним процесом, і може навіть частково зануритися в розчин, що не припустимо.

З рис. 2.28 видно, що у випадку, коли при виході на нульову швидкість (момент часу t_5) кошик з вантажем не досягає дна ванни, то процес стикання відбувається під час завдання на додатковий рух телескопічної колони (ділянка t_6-t_7). Між тим додаткове переміщення колони скорочується (ділянка t_4-t_7), внаслідок чого відчеплення гачка від кошика може не відбутися. При збільшенні похибки при розрахунку тахограми вантаж взагалі може не досягнути дна.

Висновки до розділу 2

1. У розділі розроблено та досліджено віртуальну модель крана-маніпулятора. Було проведено опробування та порівняння результатів моделювання моделі з результатами аналізу лінеаризованого математичного опису. Отримані результати дають змогу проводити моделювання мостових кранів для комплексів систем керування положенням.

2. Розроблена у розділі структурна Simulink-модель вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора у складі комплексу переробки небезпечних відходів адекватно відображає такі особливості технологічного процесу, як зміна моменту статичного опору та моменту інерції приводу при зануренні кошика з вантажем у розчин, миттєве зменшення швидкості кошика до нуля та відділення маси кошика від маси колони при досягненні кошиком дна ванни.

3. Представлено нове рішення проблеми усунення коливань вантажу, який переміщується крановим механізмом поступального руху і підйомним пристроєм, отримане шляхом синтезу системи зі зворотним зв'язком по вектору стану і спостерігача 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.

4. З наведених результатів можливо зробити висновок, що доцільно використовувати для приводу телескопічної колони крану-маніпулятора системи регулювання положення.

5. При застосуванні в електроприводі вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора системи регулювання швидкості будь-яка похибка у розрахунку тахограми приводить до ривків при досягненні кошиком дна ванни (що призводить до розплескування дезактивууючого розчину та неприпустимого занурення телескопічної колони або її деталей у дезактивууючий розчин) чи до зависання кошика над дном та порушення процесу відокремлення кошика від колони.

Посилання: [29-32] див. список використаних джерел стор. 160-165

РОЗДІЛ 3

СТРАТЕГІЇ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА- МАНІПУЛЯТОРА З ПОЗИЦІЮВАННЯМ ВАНТАЖУ

3.1 Стратегії керування електроприводами моста та візка крана-маніпулятора

Основною вимогою до електроприводу переміщення моста крану є забезпечення високої точності позиціонування. Іншою проблемою при експлуатації приводу переміщення мостових кранів постає проблема забезпечити переміщення крану без перекосу. Ця проблема властива всім мостовим кранам з великим прольотом. Вирішення цієї проблеми дозволить знизити знос реборди коліс рейок, а також забезпечити відповідну точність позиціонування моста. Також при керуванні двома двигунами від одного ПЧ постає проблема вирівнювання навантаження.

Згідно з технічним завданням керування даним електроприводом передбачається на основі живлення двох електродвигунів від одного ПЧ з скалярним частотним керуванням.

3.1.1 Розімкнута система скалярного керування двома асинхронними двигунами

Частотний спосіб регулювання швидкості АД є найбільш економічним, сучасним і перспективним. Ідея частотного керування полягає в регулюванні синхронної швидкості за рахунок зміни частоти живлення напруги статора АД по закону [33]

$$\frac{U}{f} = \text{const.}$$

Структурна схема розімкнутого електроприводу з скалярним регулюванням швидкості представлена на рис. 3.1 Додаток Б.2 [35]

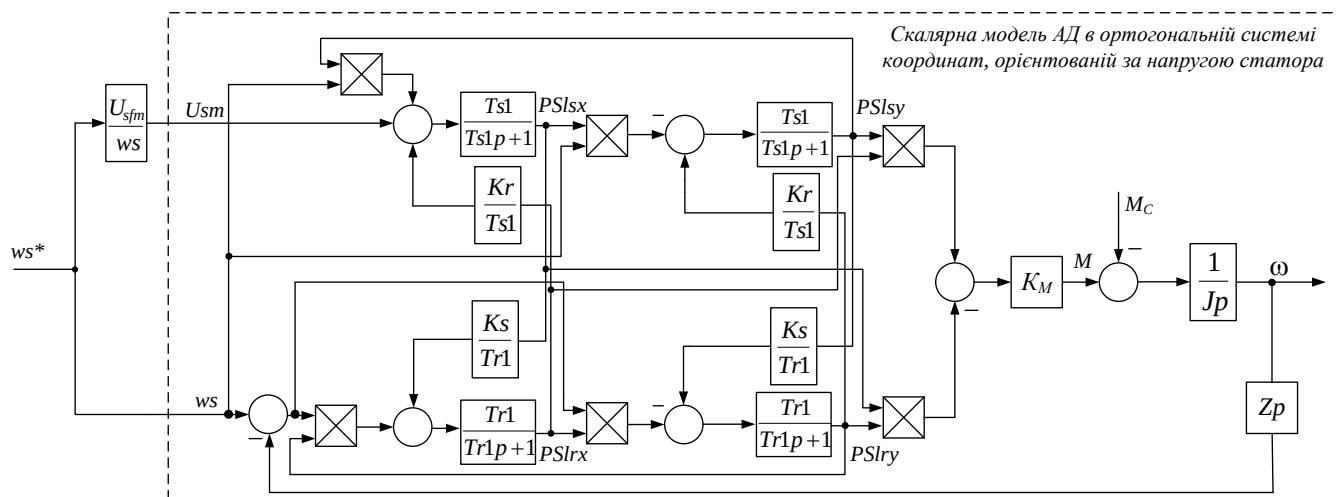


Рис. 3.1 Структурна схема розімкненої системи скалярного керування двома АД

Регульований електропривод вирішує два основні завдання: керування моментом і швидкістю обертання електродвигуна.

Метод скалярного керування відносно простий в реалізації, але має два вагомні недоліки. По-перше, при відсутності датчика швидкості на валу двигуна неможливо регулювати швидкість обертання, оскільки навантаження впливає на швидкість [33, 34]. Наявність датчика швидкості вирішує цю проблему, однак, залишається другий вагомий недолік це неможливість регулювання моменту на валу двигуна.

Необхідність регулювання моменту пред'являється до електроприводу технічними і технологічними вимогами.

Дослідження системи частотного керування здійснювалося при варіаціях активного опору ротора $2R_2$ одного з двигунів, оскільки при роботі двигунів параметри обмоток можуть змінюватися внаслідок нерівномірного навантаження на двигунах, а також в реальності не може існувати двох ідентичних двигунів з однаковими параметрами. Програму ініціалізації параметрів моделі системи розімкнутого скалярного керування в Matlab наведено в Додатку Б.1. Тахограма руху моста крана приведена на рис. 3.2

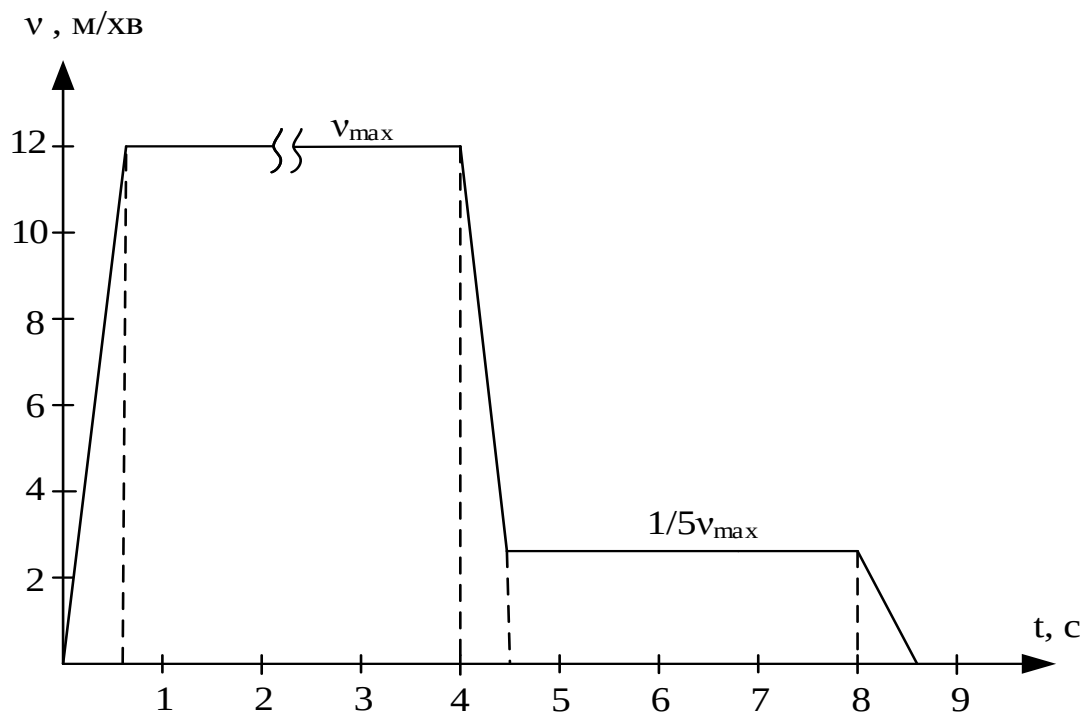


Рис. 3.2 Тахограма руху моста крана

Графіки перехідних процесів отриманих шляхом математичного моделювання приведено на рис. 3.3-рис. 3.5.

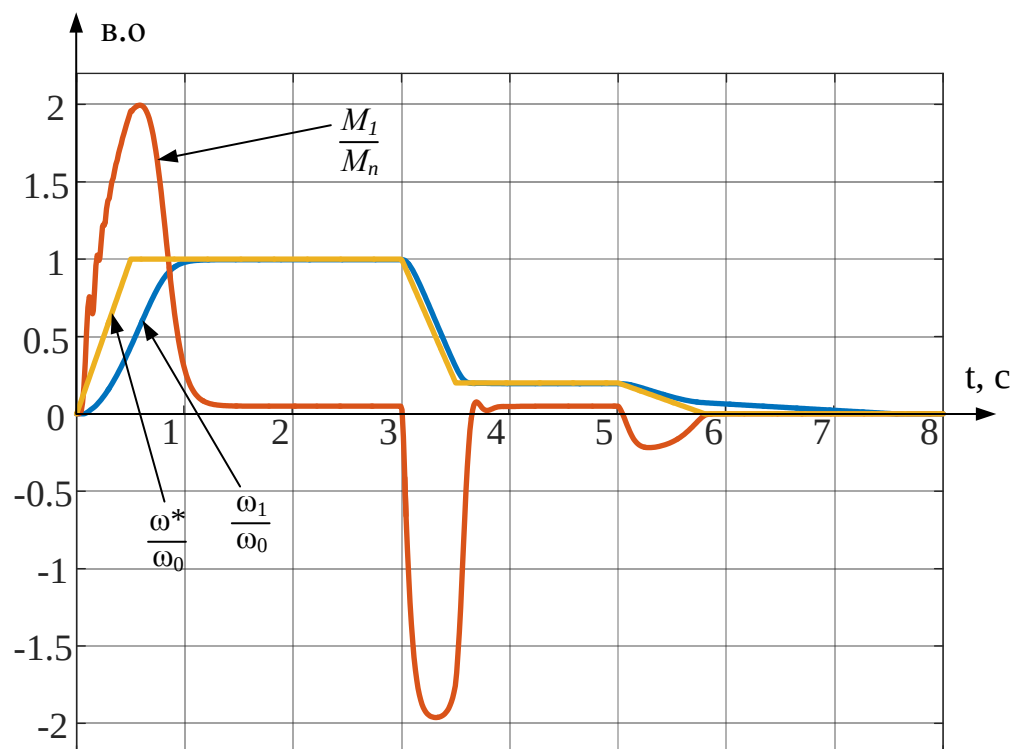


Рис 3.3 Графіки перехідних процесів першого двигуна при розімкнутій системі скалярного керування

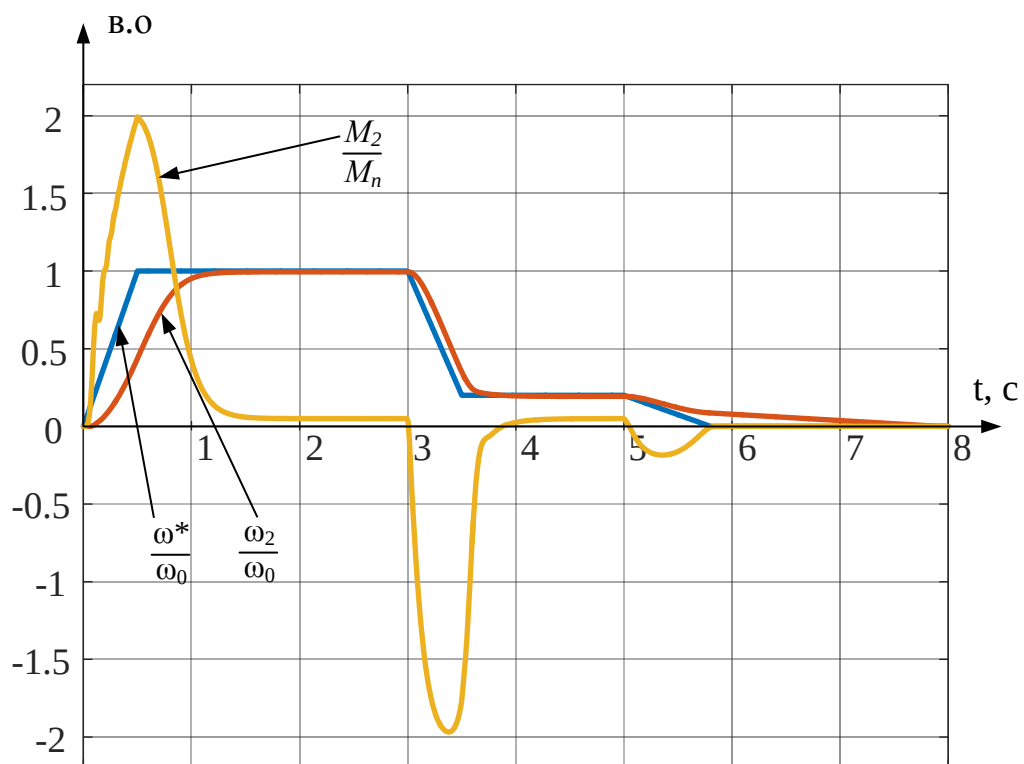


Рис 3.4 Графіки перехідних процесів другого двигуна при розімкнутій системі скалярного керування

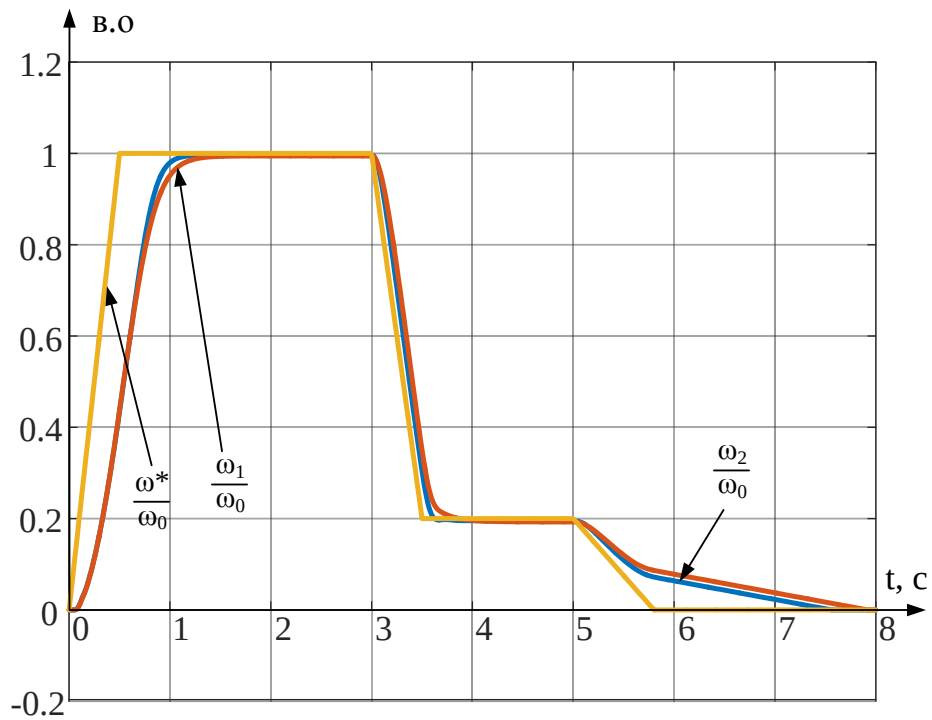


Рис 3.5 Кутові швидкості двигунів при розімкнутій системі скалярного керування

3.1.2 Система замкненого скалярного керування за швидкістю

На рис. 3.6 та в Додаток Б.3 наведена структурна схема замкненої системи скалярного керування асинхронним двигуном за швидкістю. Графіки перехідних процесів отриманих шляхом математичного моделювання приведено на рис. 3.7-рис. 3.9

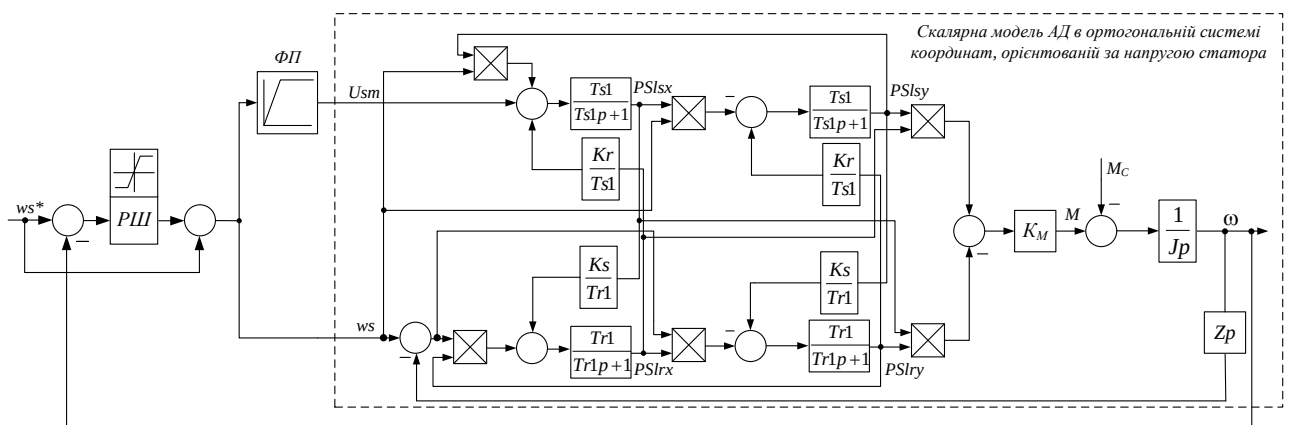


Рис 3.6 Структурна схема замкненої системи скалярного керування за швидкістю

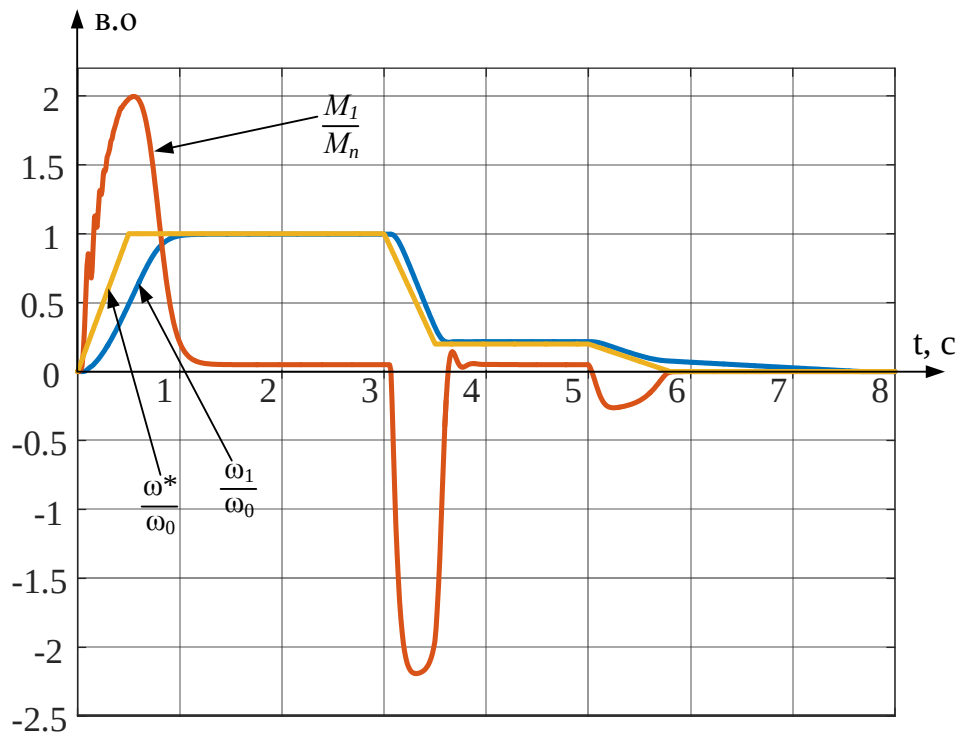


Рис. 3.7 Графіки перехідних процесів першого двигуна при замкненій системі скалярного керування за швидкістю

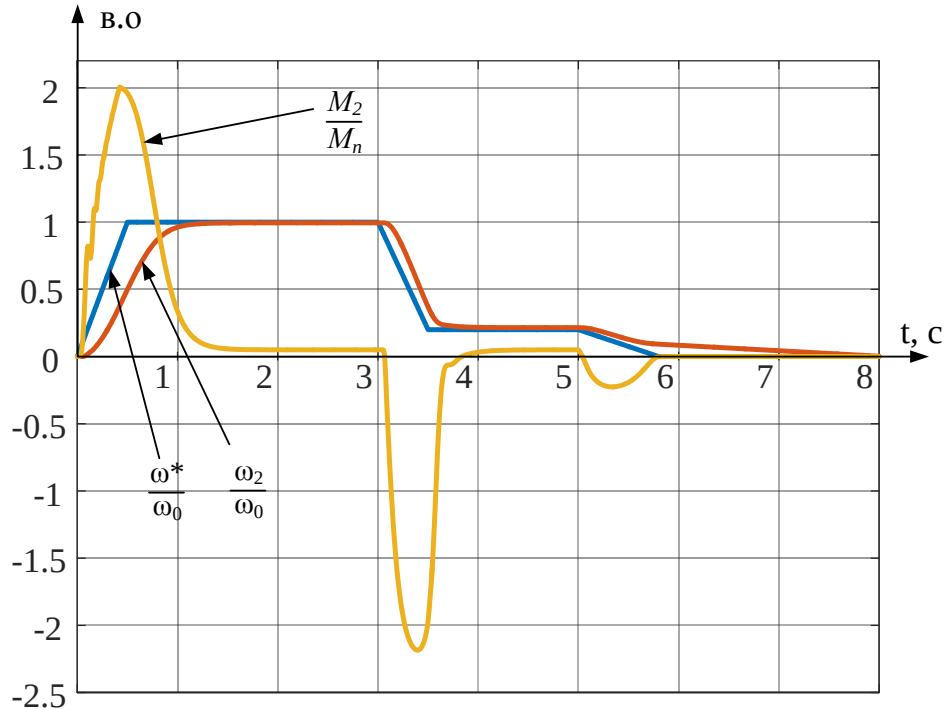


Рис 3.8 Графіки перехідних процесів другого двигуна при замкненій системі скалярного керування за швидкістю

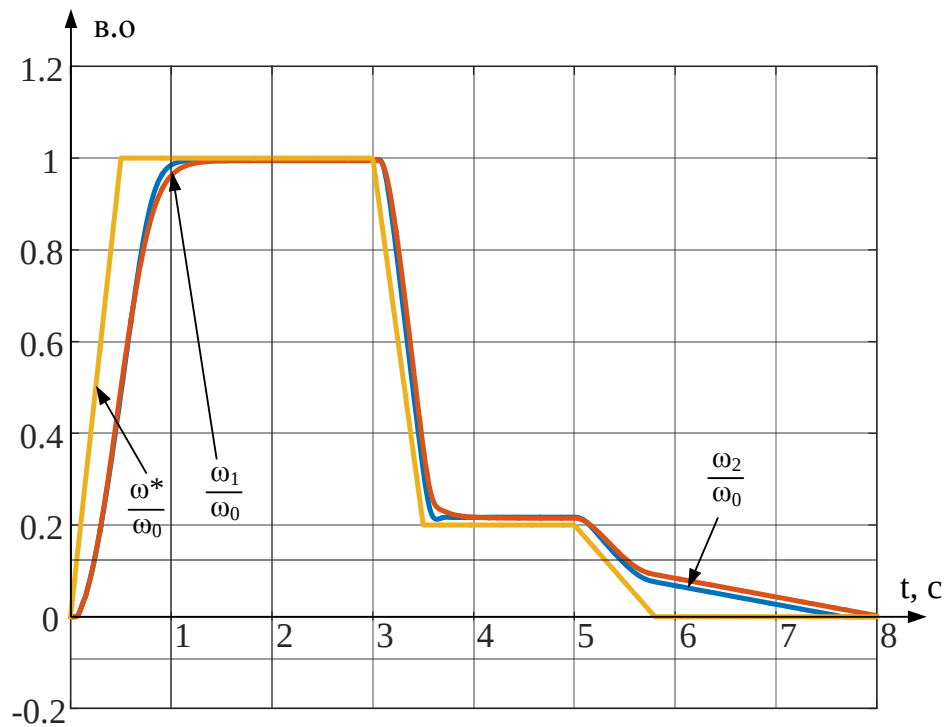


Рис. 3.9 Кутові швидкості двигунів при замкненій системі скалярного керування за швидкістю

3.1.3 Замкнена система скалярного керування за положенням

На рис. 3.10 Додаток Б.4 наведена структурна схема замкненої системи скалярного керування асинхронним двигуном за положенням. Графіки перехідних процесів отриманих шляхом математичного моделювання приведені на рис. 3.11-рис. 3.15

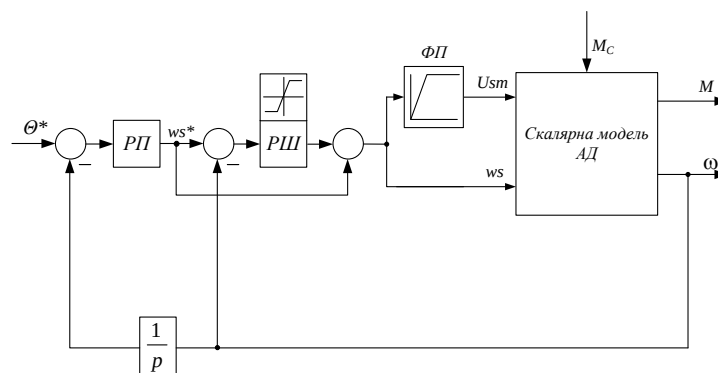


Рис. 3.10 Структурна схема замкненої системи скалярного керування за положенням

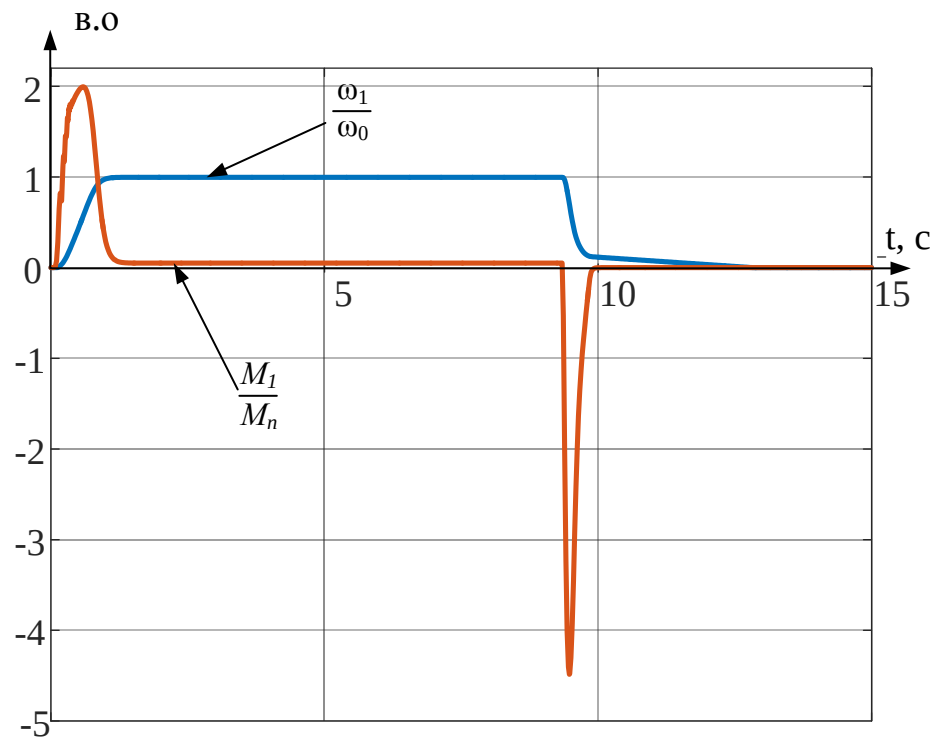


Рис. 3.11 Графіки перехідних процесів першого двигуна при замкненій системі скалярного керування за положенням

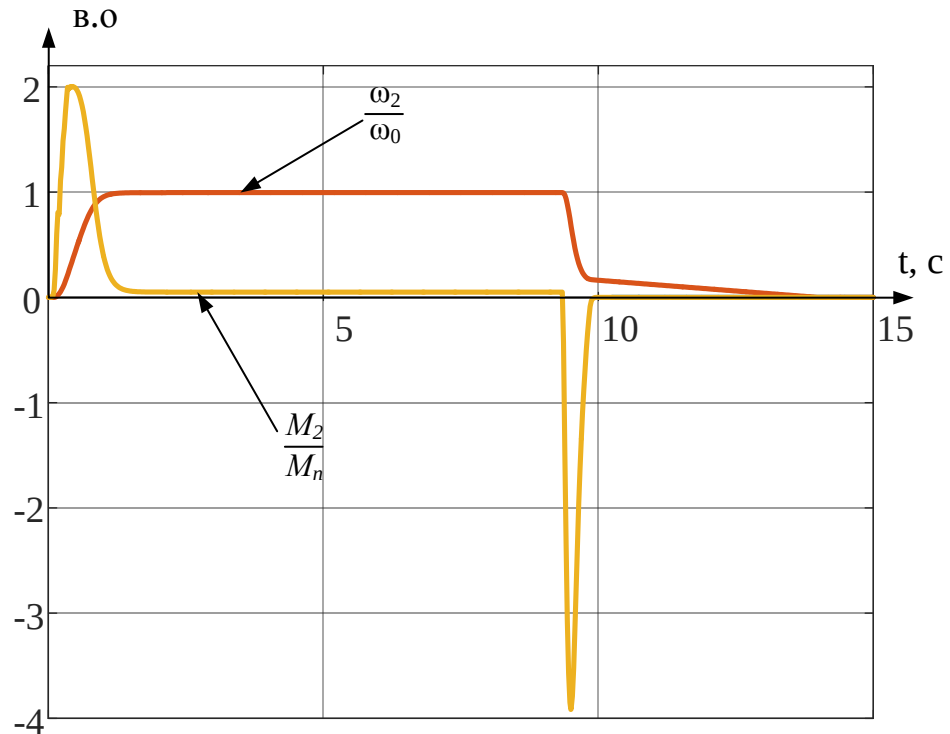


Рис. 3.12 Графіки перехідних процесів другого двигуна при замкненій системі скалярного керування за положенням

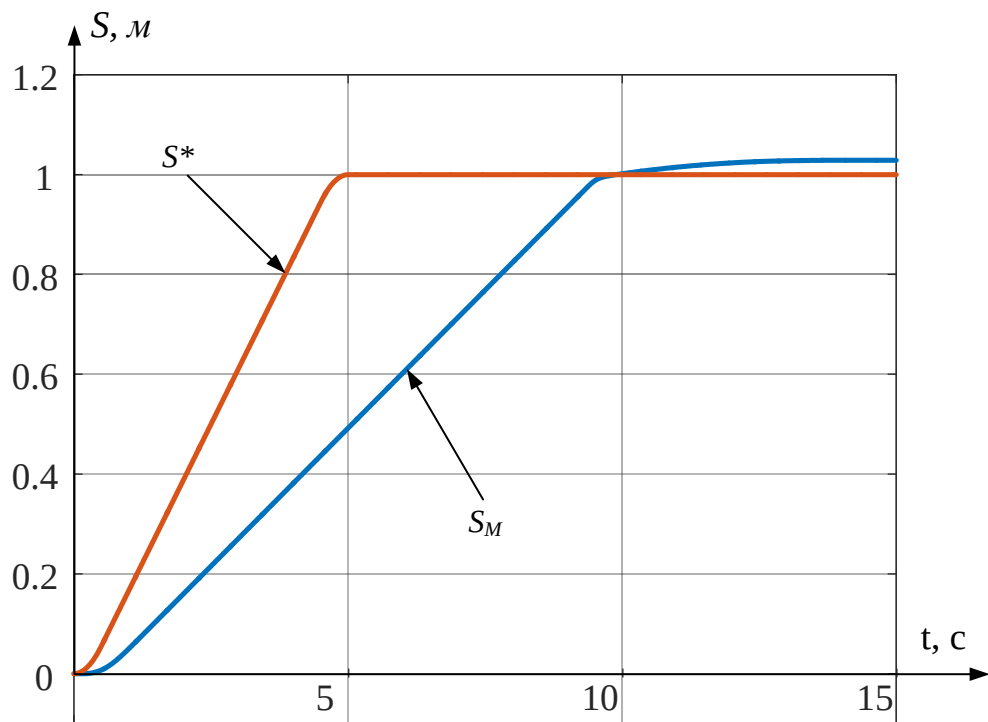


Рис 3.13 Переміщення крана при замкненій системі скалярного керування за положенням

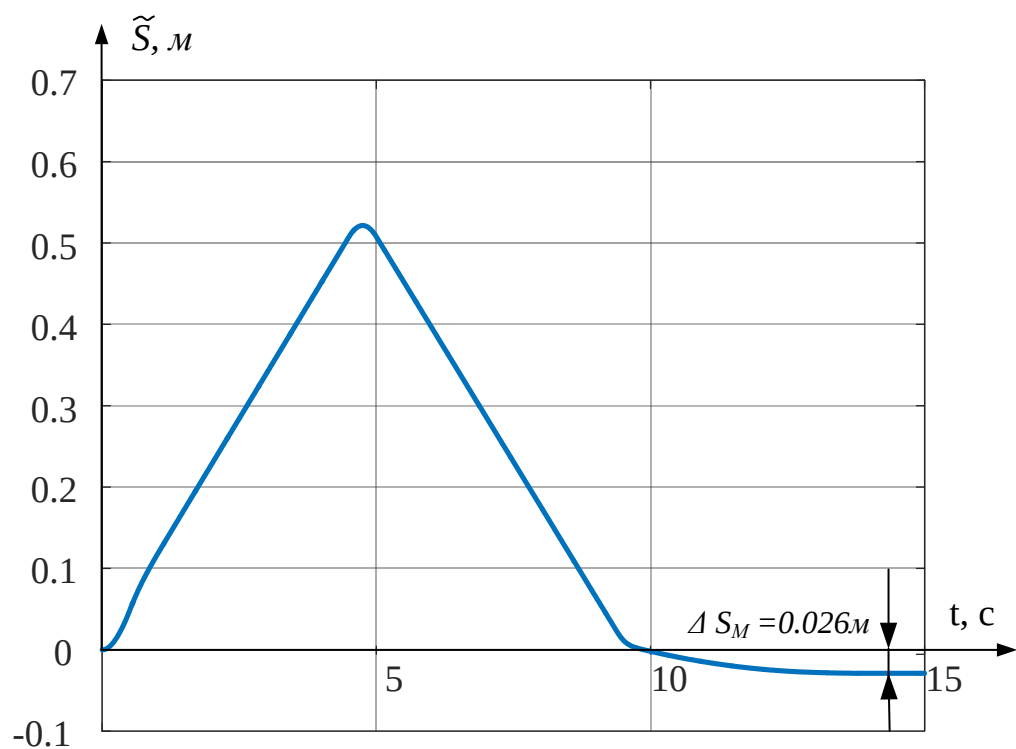


Рис. 3.14 Похибка переміщення крана при замкненій системі скалярного керування за положенням

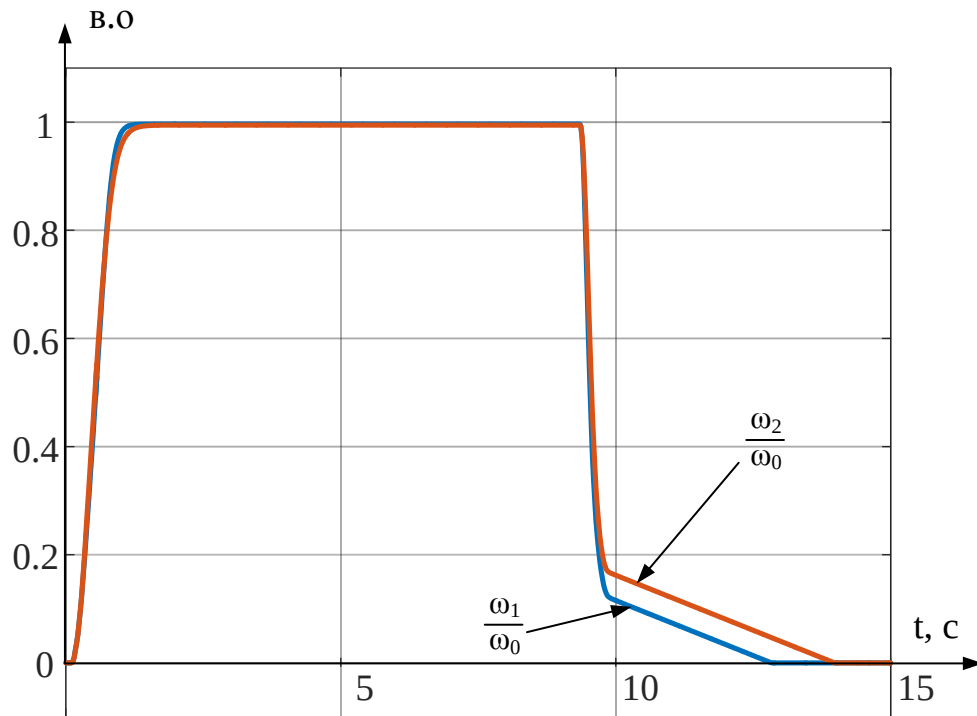


Рис. 3.15 Кутові швидкості двигунів при замкненій системі скалярного керування за швидкістю

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що у випадку використання системи скалярного керування спостерігається низька швидкодія систем, тобто перехідні процеси мають затягнутий характер, і як наслідок це призводить до перерегулювання за переміщенням, а саме при завданні переміщення моста крана на 1 м, його переміщення склало 1.28 м, що є неприпустимим згідно поставлених вимог до точності позиціонування. Також різниця швидкостей двигунів призводить до виникнення перекосу моста крана, оскільки двигуни працюють на різні пари коліс, які взаємопов'язані між собою не через спільний вал, а через несучу конструкцію моста крана. Похибка переміщення крана при скалярному керуванні дорівнює $\Delta S_M = 0.28$ м.

3.1.4 Стратегія керування «Master-Slave»

Як показано на рис. 3.16, рис. 3.17 [36], в цій стратегії, керування здійснюється лише одним двигуном Primary, використовуючи звичайний FOC, згаданий тут як

основна машина, а інший двигун Secondary підключається паралельно з головним. Суфікси «pri» і «sec» використовуються для величин, відповідних двигунів Primary і Secondary, відповідно. Вибір первинного двигуна залежить від величини потоку ротора, яка у свою чергу залежить від моменту навантаження на валу двигуна [36, 37]. Для двигуна, який легко навантажений, величина потоку ротора є більшою, ніж для сильно навантаженого двигуна, оскільки падіння напруги на роторі більше для двигуна, який більше навантажено. Якщо двигун менш навантажений, тобто він є основним двигуном, рух потоку регулюється і дорівнює номінальному значенню цього двигуна, уникаючи насичення. Система також замикається за струмами, отриманими від другого двигуна, для полегшення вибору головного двигуна Primary. Проте зворотний зв'язок з вторинним двигуном не використовується контролером для визначення еталонних змінних. Зворотні зв'язки по швидкості беруться з обох машин.

Оскільки обидва двигуни мають однакові значення параметрів та однаковий крутний момент навантаження, це призведе до того, що обидва двигуни будуть полеорієнтовані [37, 38]. Однак, якщо змінюється навантаження на вторинній машині, вона втрачає полеорієнтацію, і його динамічні характеристики погіршуються. Структурна схема короткозамкненого АД в ортогональній системі координат, орієнтованій за потокозчепленням ротора, наведена на рис. 3.17.

Математична модель стратегії керування «Master–Slave» в програмному середовищі Matlab, на основі якої було проведено дослідження електроприводу переміщення моста карну, наведено в Додатку В.1.

Результати моделювання системи «Mean control» наведені на рис.3.18 – рис. 3.22.

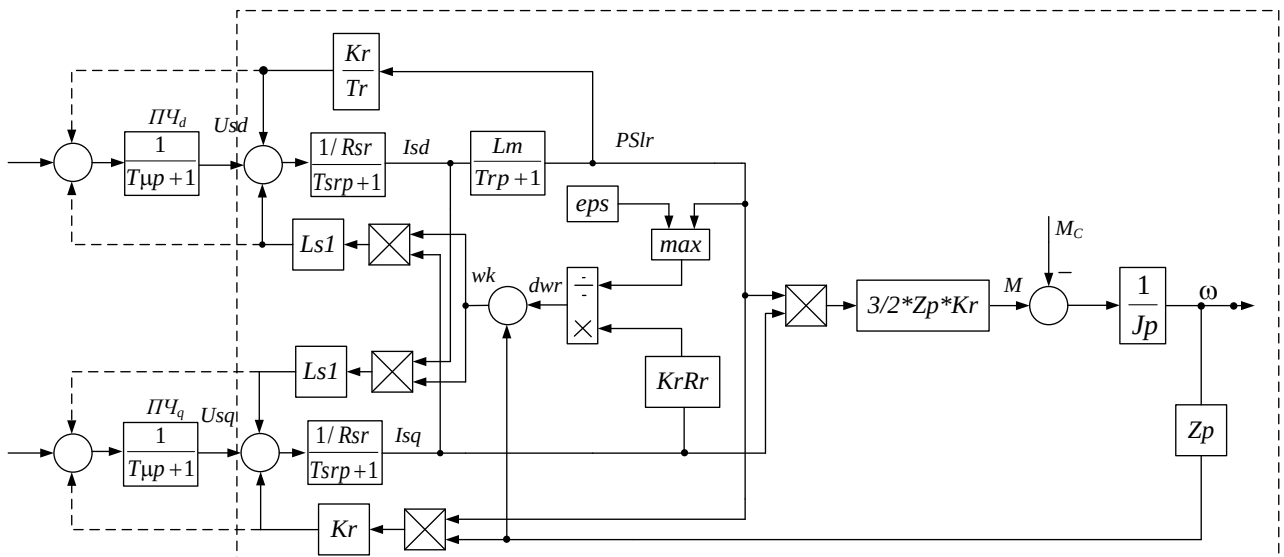


Рис. 3.16 Структурна схема короткозамкненого АД в ортогональній системі координат, орієнтованій за потокозчепленням ротора

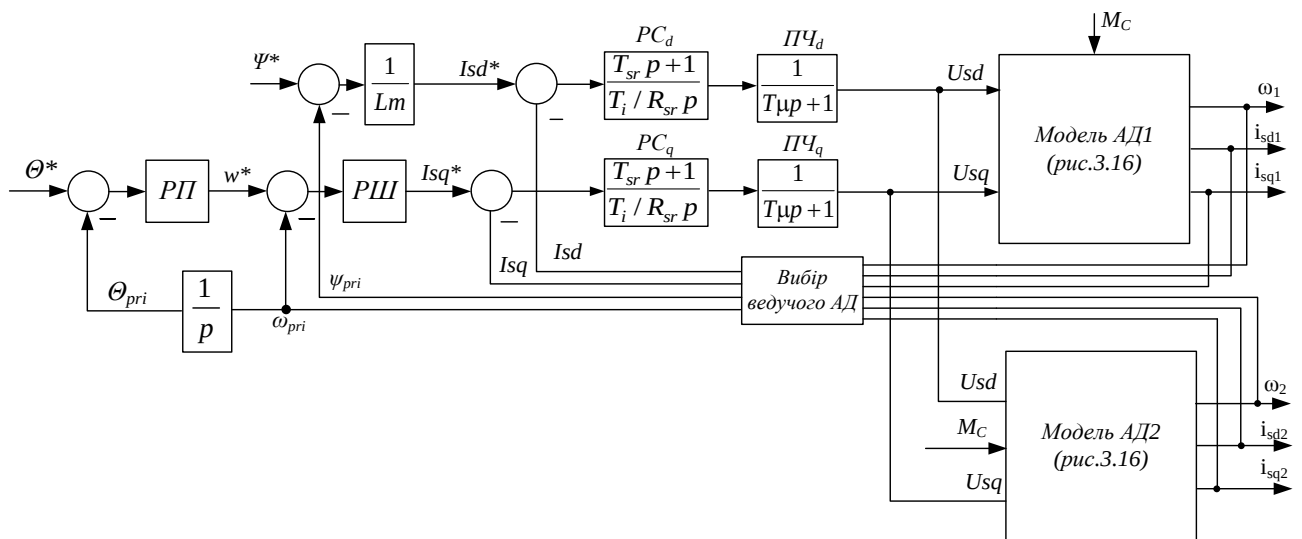


Рис. 3.17 Структурна схема керування «Master–Slave»

Результати моделювання системи «Master–Slave» наведені на рис.3.18 – рис. 3.22.

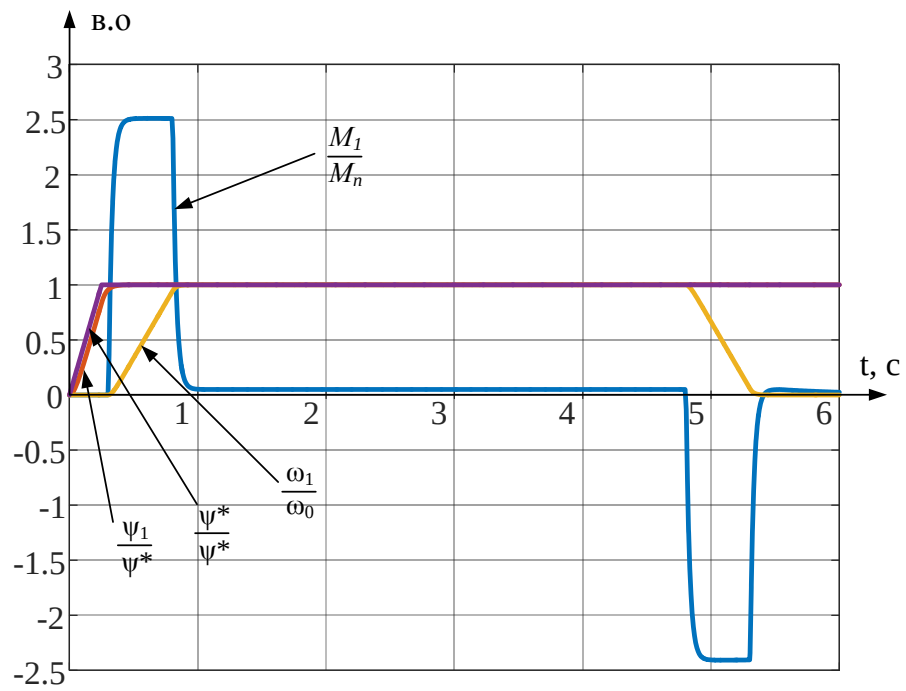


Рис. 3.18 Графіки перехідних процесів першого двигуна при стратегії «Master - Slave»

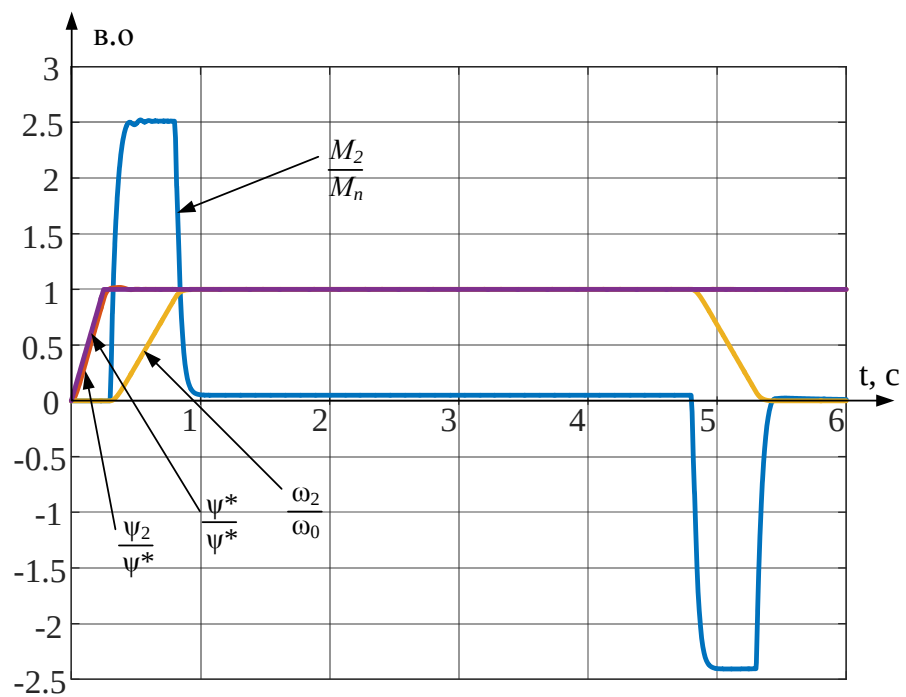


Рис. 3.19 Графіки перехідних процесів другого двигуна при стратегії «Master - Slave»

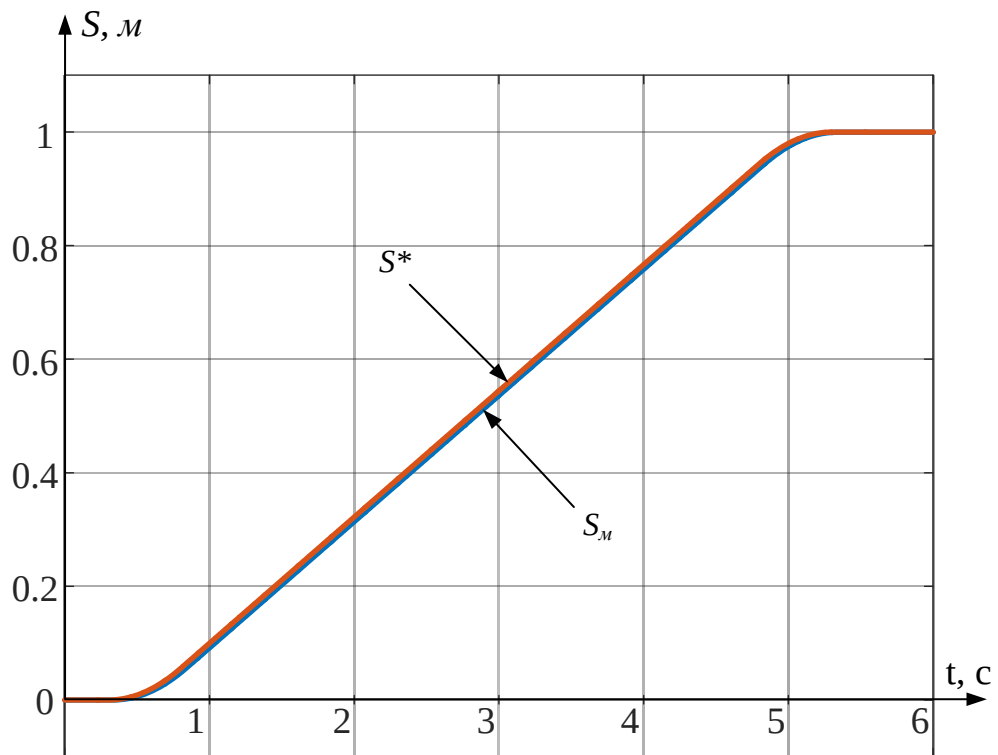


Рис 3.20 Переміщення крана при стратегії керування «Master - Slave»

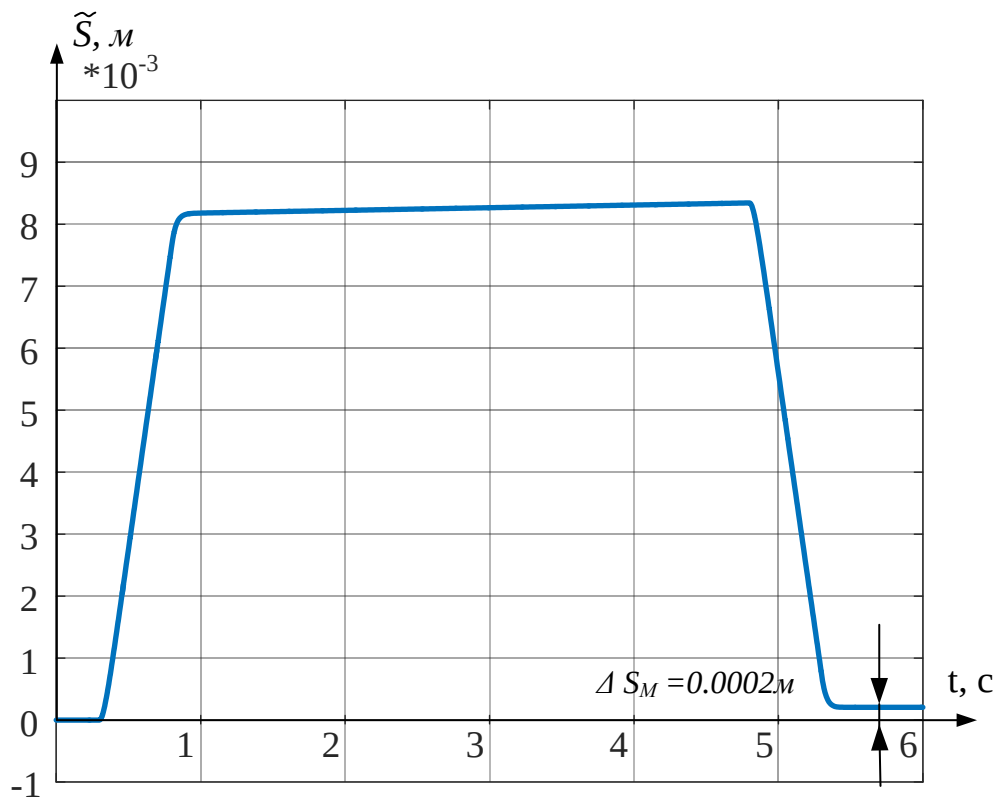


Рис. 3.21 Похибка переміщення крана при стратегії керування «Master - Slave»

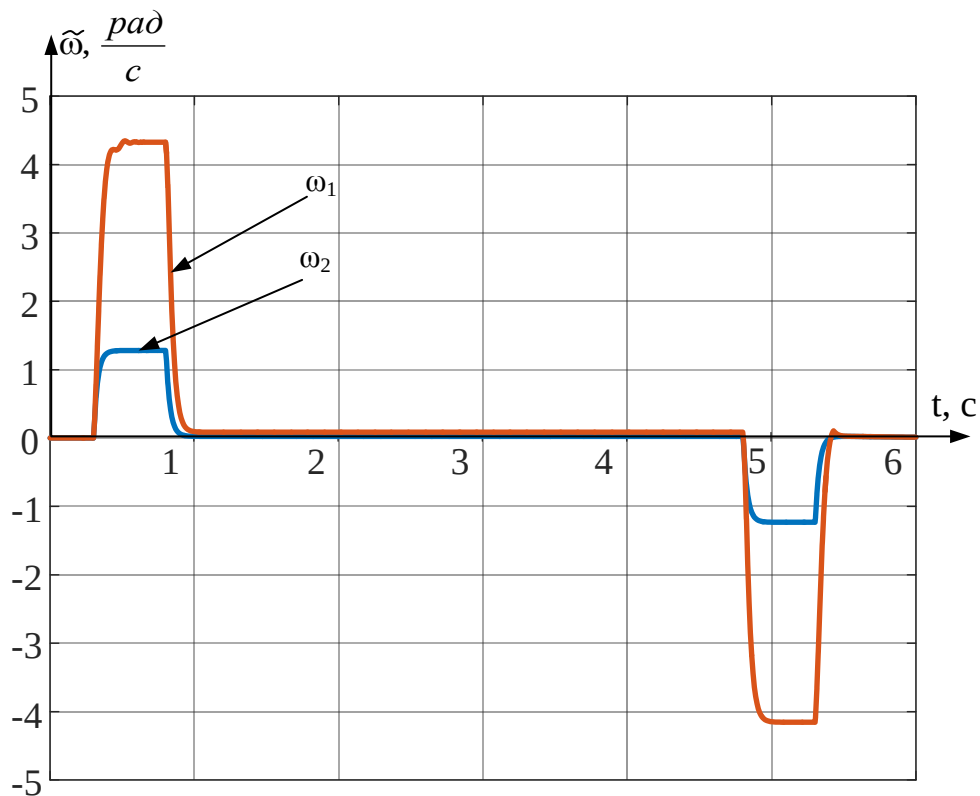


Рис 3.22 Похибки відпрацювання кутової швидкості двигунів при стратегії керування «Master - Slave»

3.1.5 Стратегія керування «Mean control»

Як показано на рис 3.23 [36] Додаток В.2, у цій стратегії обчислюється середнє значення струмів і швидкостей для обох двигунів та регулюється за класичними векторними алгоритмами, припускаючи, що струми і швидкості надходять від фіктивної середньої машини. Підпис AGG використовується для позначення середніх значень. Коли навантаження на обох двигунах відрізняються, керування середніми величинами може призвести до збільшення потоку ротора однієї машини (злегка навантаженої). Оскільки жоден з двигунів не контролюється безпосередньо, обидва двигуни знаходяться далеко від ідеального полеорієнтування [39, 40]. Це призводить до погіршення динамічних характеристик обох машин.

Результати моделювання системи «Mean control» наведені на рис.3.24 – рис. 3.28.

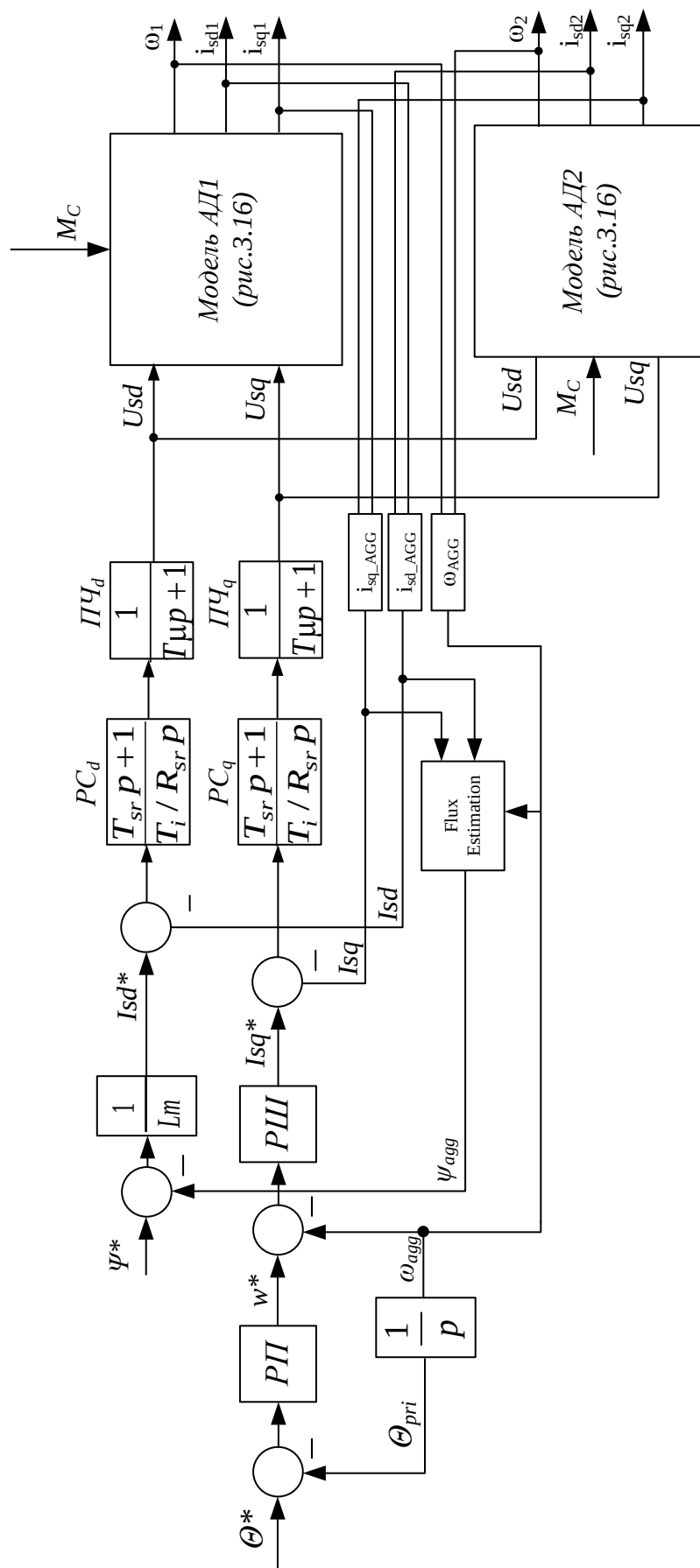


Рис. 3.23 Структурна схема керування «Mean control»

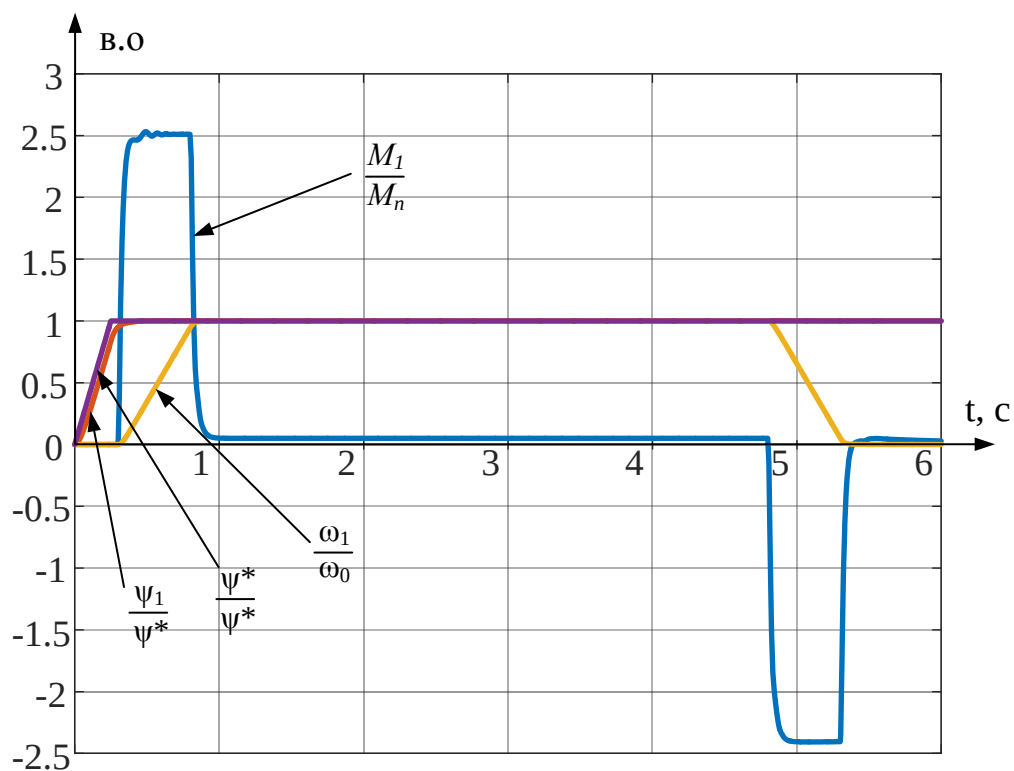


Рис. 3.24 Графіки перехідних процесів першого двигуна при стратегії керування «Mean control»

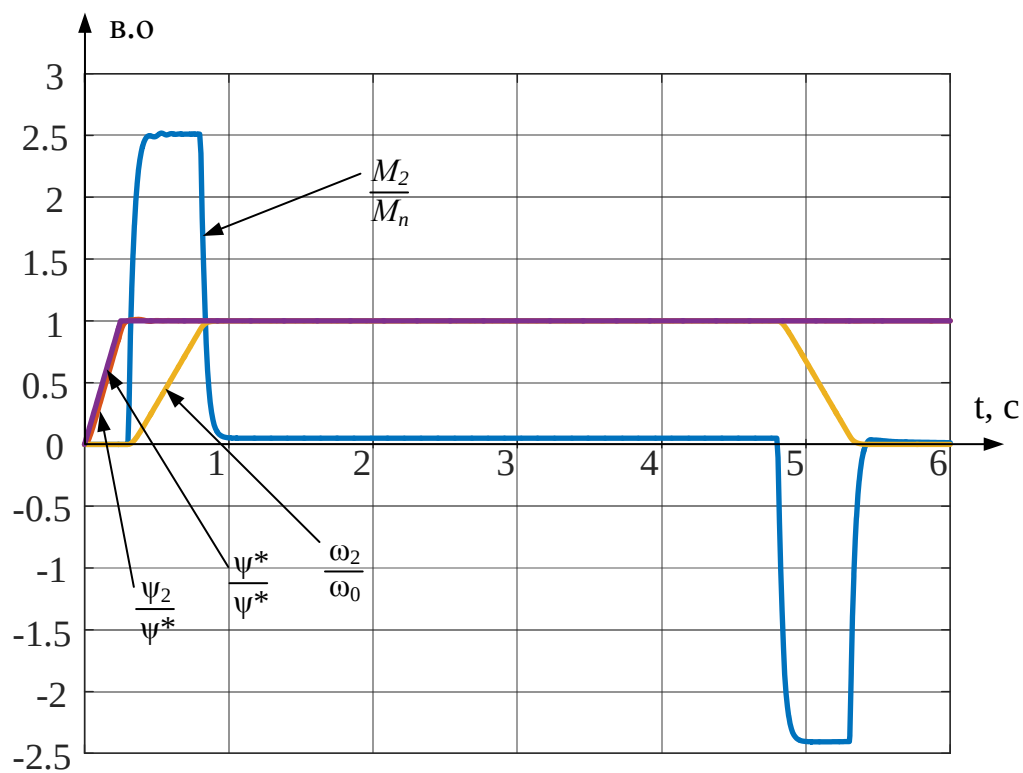


Рис. 3.25 Графіки перехідних процесів другого двигуна при стратегії керування «Mean control»

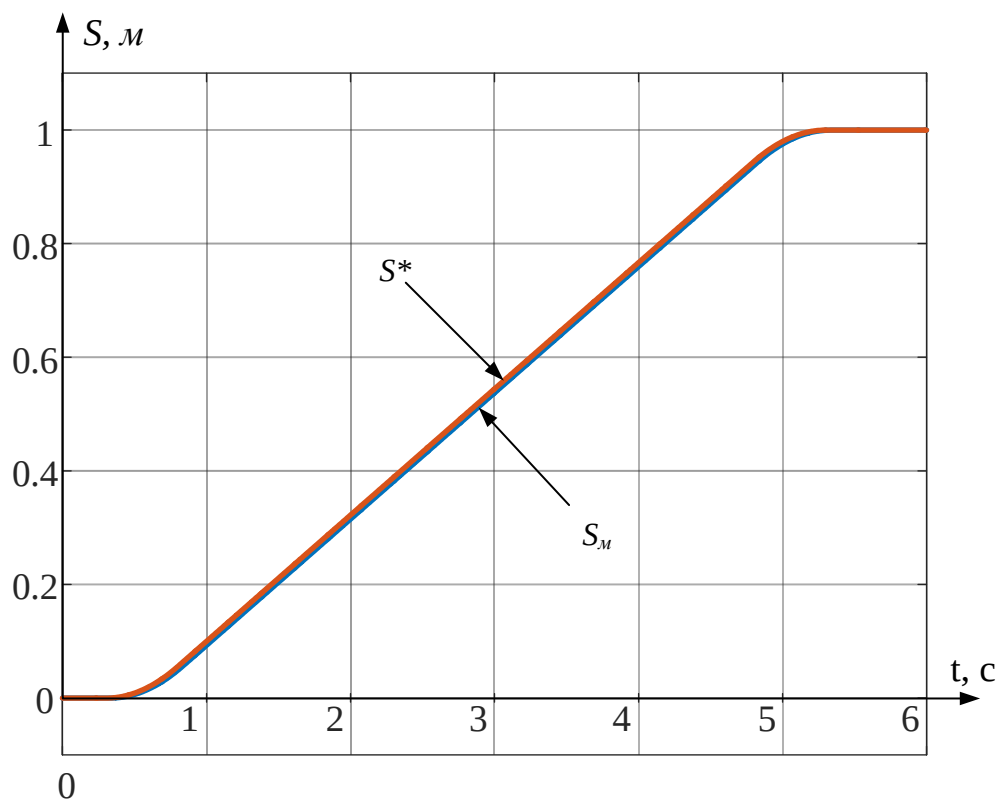


Рис. 3.26 Переміщення крана при стратегії керування «Mean control»

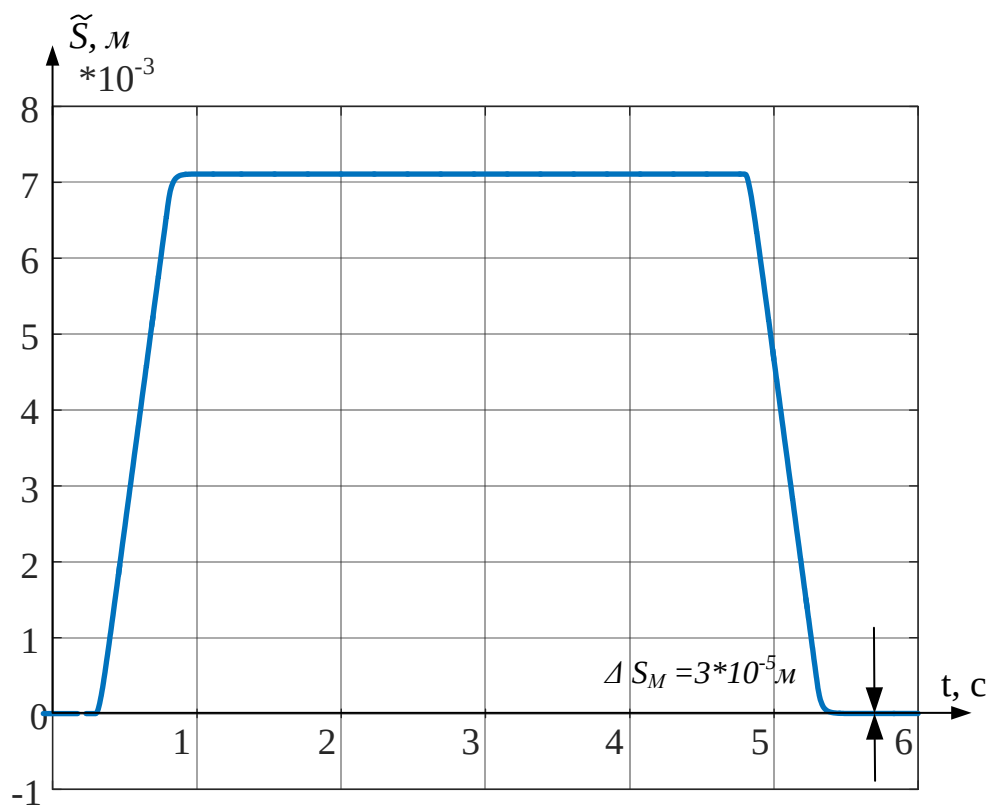


Рис. 3.27 Похибка переміщення крана при стратегії керування «Mean control»

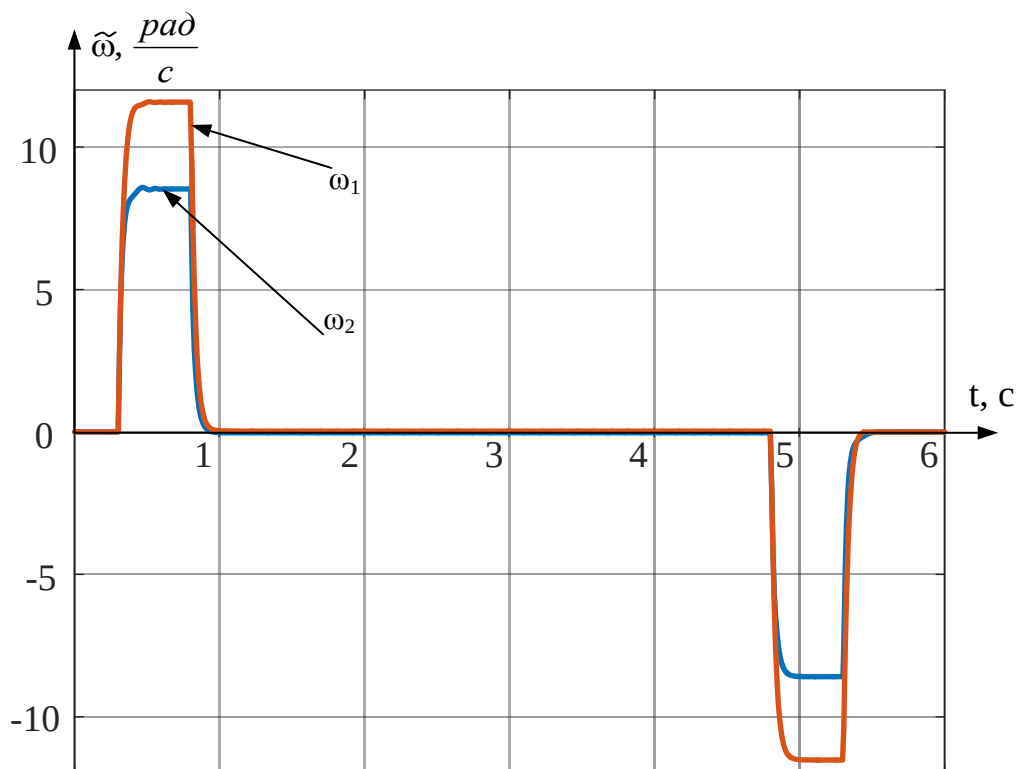


Рис. 3.28 Графіки перехідних процесів двигунів при стратегії керування «Mean control»

Кращі результати показали стратегії керування «Master-Slave» та «Mean control», які мають високу швидкодію систем і в результаті велику точність позиціонування моста карну, а саме при стратегії керування «Master-Slave» похибка склала 0.0002 м при допустимій 0.02м та при «Mean control» $3 \cdot 10^{-5}$ 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 перекис крана є відсутнім.

Похибки переміщення візка при стратегіях «Master-Slave» та «Mean control» зведені до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Похибки переміщення крана

Система керування	Величина похибки, м
Стратегія «Master-Slave»	$\Delta S_M = 0.0002$ м
Стратегія «Mean control»	$\Delta S_M = 3 \cdot 10^{-5}$ м

3.1.6 Замкнена система векторного керування при живленні двигунів від індивідуальних ПЧ

Система векторного керування АД дозволяє підтримувати момент на валу при швидкості, рівній нулю, та дозволяє використовувати його в системах керування положенням при активному навантаженні [41]. За рахунок керування поточним значенням узагальненого вектору струмів двигуна, з'являється можливість регулювати в свою чергу миттєві значення потокозчеплень і електромагнітного моменту асинхронного двигуна. Таке регулювання необхідне при створенні високоякісних систем автоматичного керування частотно-регульованого електроприводом.

Особливістю електроприводів горизонтального переміщення є те, що більшість з них реалізуються як дводвигунні приводи. В такому випадку електродвигуни можуть живитися від одного перетворювача частоти [42], що є найбільш економічним варіантом, так і від окремих перетворювачів, що забезпечує більш гнучке керування.

Потрібно забезпечувати високу точність позиціонування робочого органу, яка має бути в межах 0.02 м, тому постає необхідність також дослідити і системи керування двома двигунами від індивідуальних перетворювачів частоти, щоб, базуючись на отриманих результатах дослідження, провести порівняльний аналіз всіх можливих систем керування.

Структурна схема векторного керування при живленні двигунів від індивідуальних перетворювачів частоти представлена на рис. 3.29. Математична модель в програмному середовищі Matlab, на основі якої було проведено дослідження, наведено в Додатку В

Результати моделювання системи «Mean control» наведені на рис.3.30 – рис. 3.35.

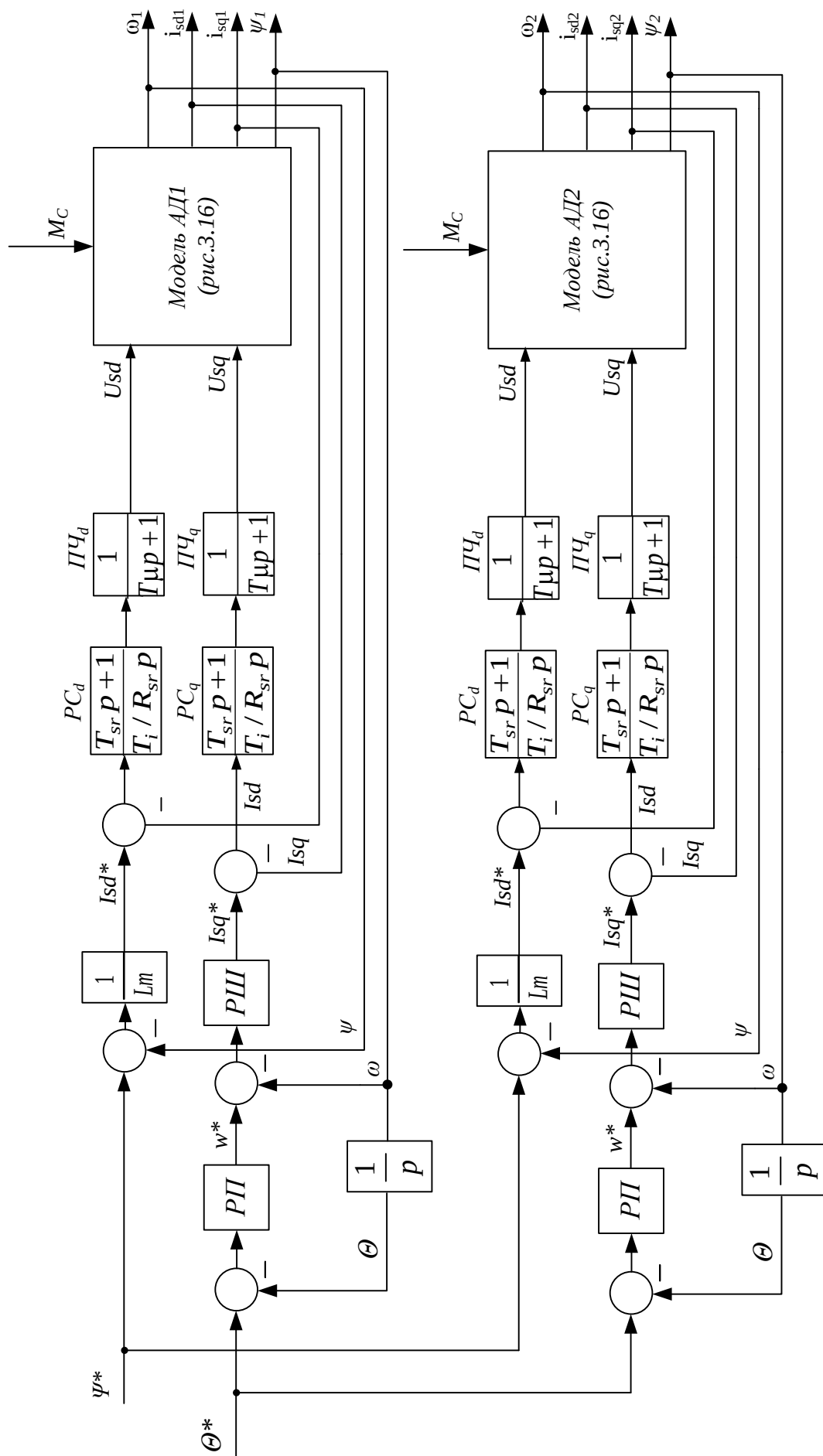


Рис. 3.29 Структурна схема векторного керування двома АД

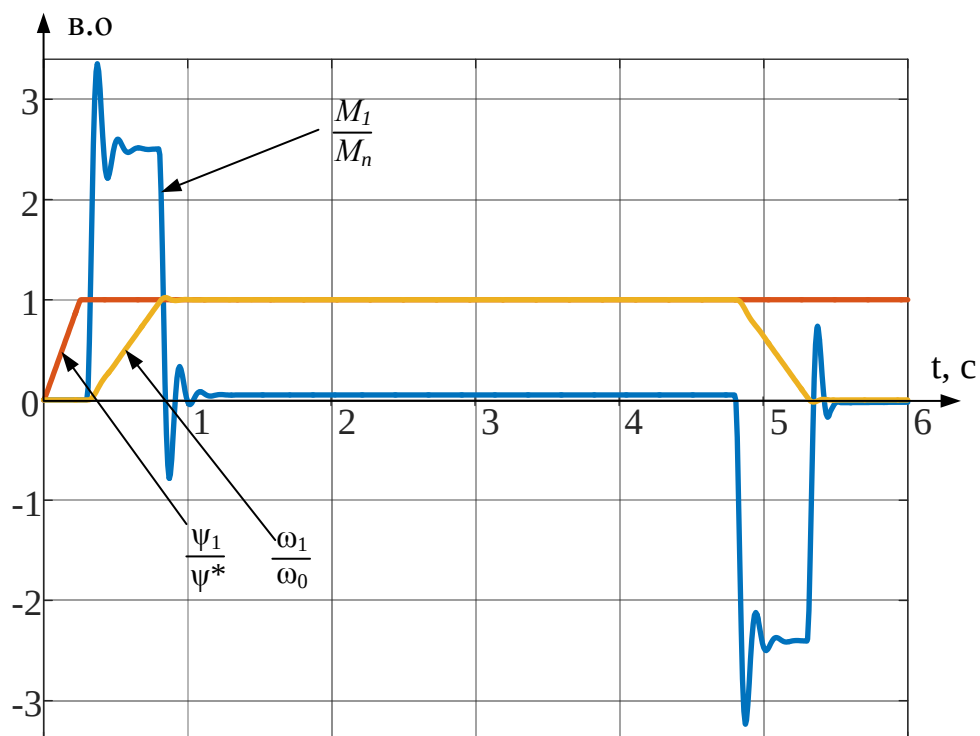


Рис. 3.30 Графіки перехідних процесів першого двигуна при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

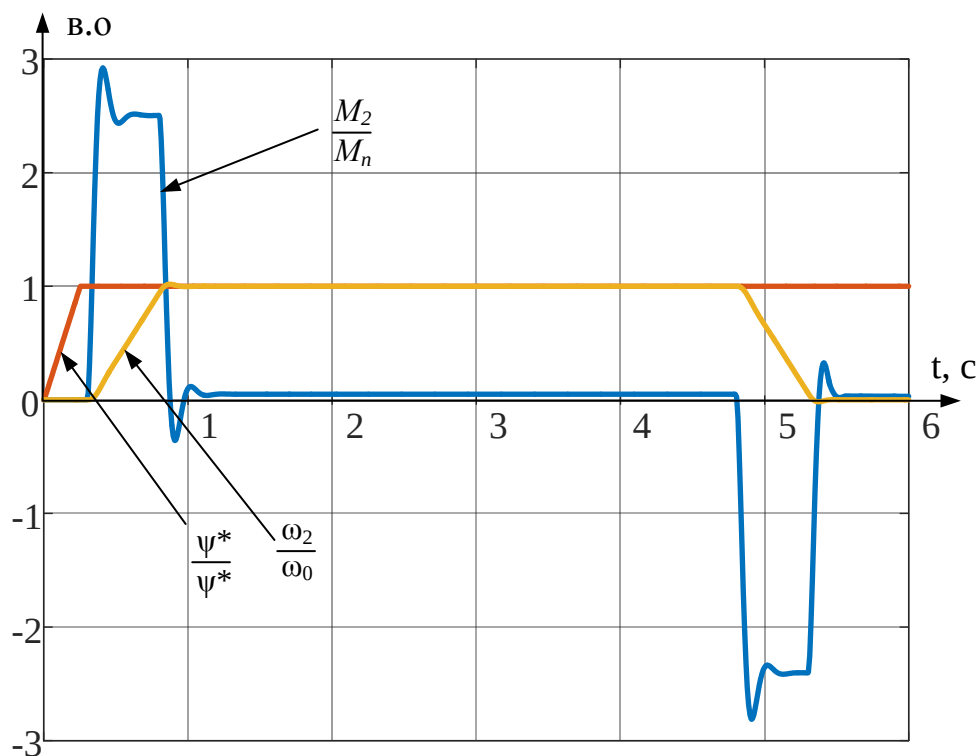


Рис. 3.31 Графіки перехідних процесів другого двигуна при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

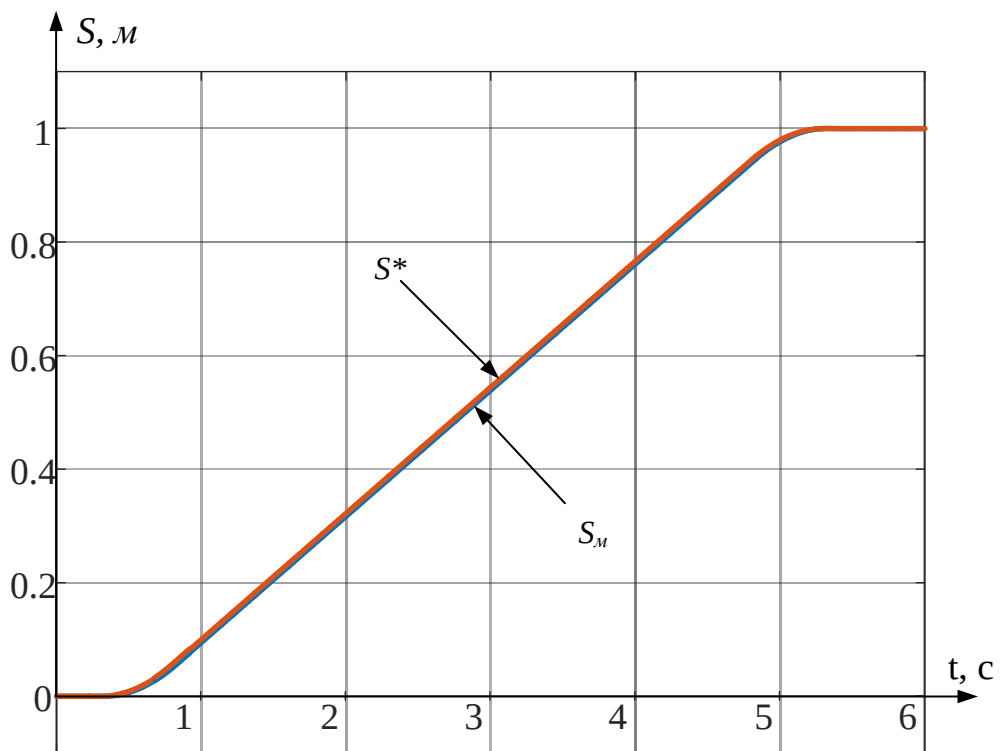


Рис. 3.32 Переміщення крана при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

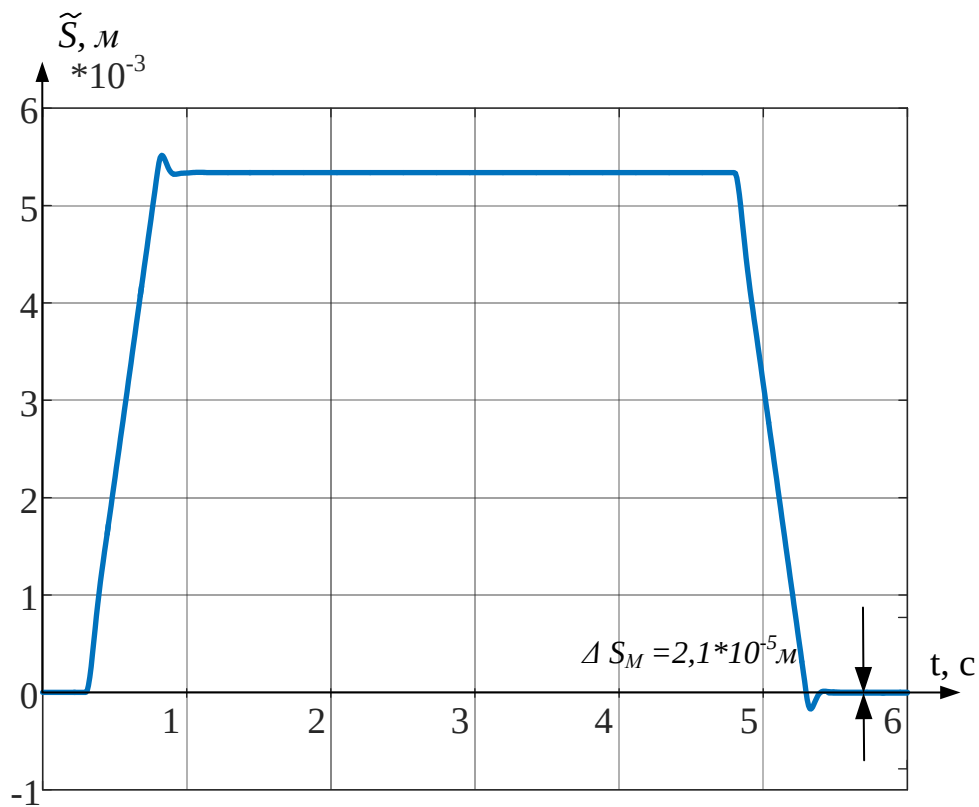


Рис 3.33 Похибка переміщення крана при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

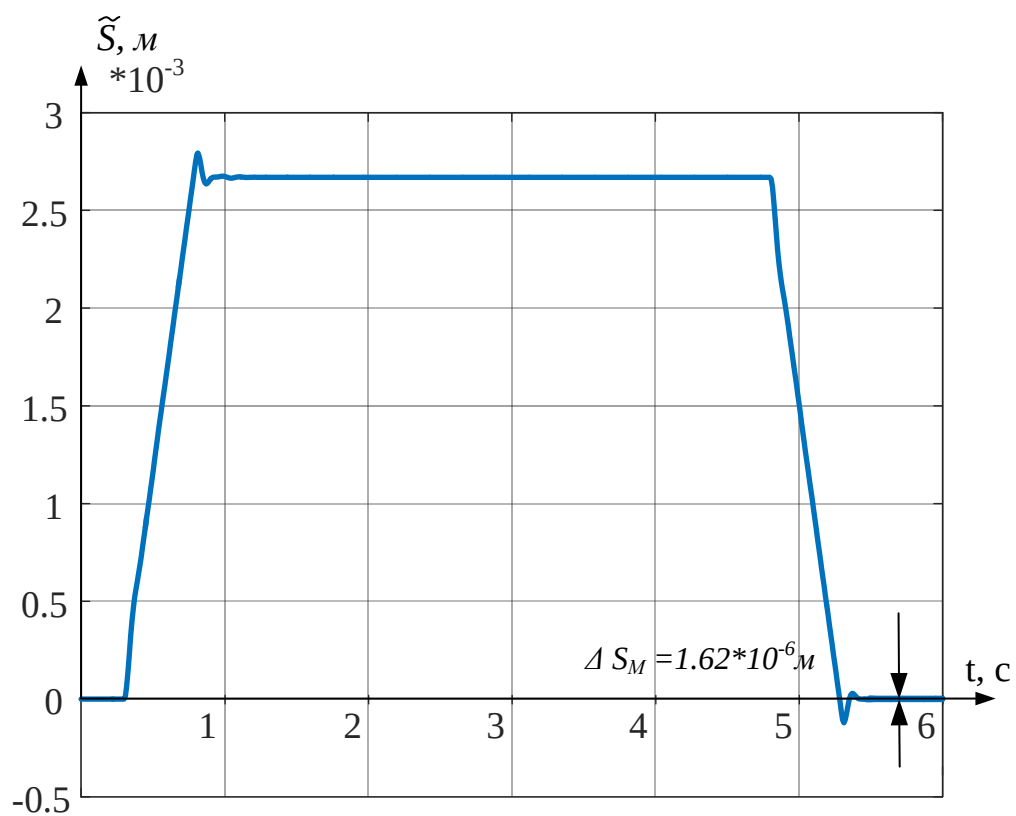


Рис. 3.34 Похибка переміщення крана при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ з компенсацією похибки відпрацювання

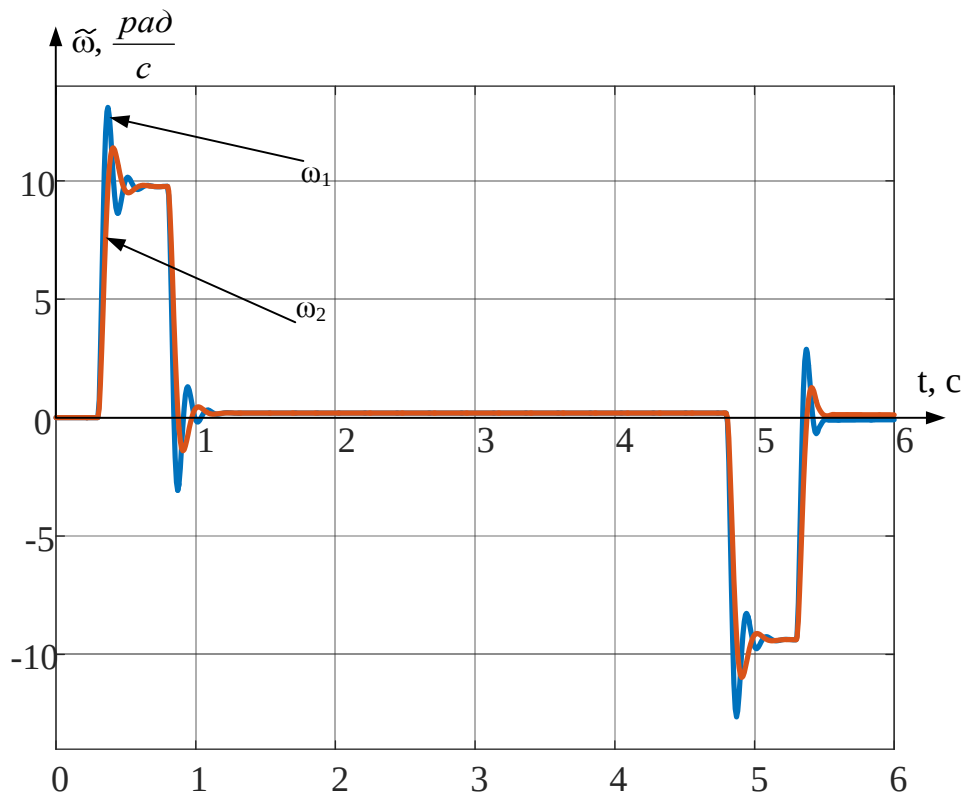


Рис. 3.35 Похибки відпрацювання кутової швидкості двигунів при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

Проаналізувавши результати математичного моделювання різних систем керування двома двигунами, можна зробити висновок, що у випадку використання системи скалярного керування спостерігається низька швидкодія систем, тобто перехідні процеси мають затягнутий характер, і як наслідок, це призводить до перерегулювання за переміщенням, а саме при завданні переміщення моста крана на 1 м, його переміщення склало 1.28 м, що є неприпустимим згідно поставлених вимог до точності позиціонування. Також різниця швидкостей двигунів призводить до виникнення перекосу моста крана, оскільки двигуни працюють на різні пари коліс, які взаємопов'язані між собою не через спільний вал а через несучу конструкцію моста крану.

Похибки переміщення крана при різних системах зведені до табл. 3.2

Таблиця 3.2

Похибки переміщення крана

Система керування	Величина похибки, м
Скалярна система керування	$\Delta S_M = 0.28$
Стратегія «Master-Slave»	$\Delta S_M = 0.0002 \text{ м}$
Стратегія «Mean control»	$\Delta S_M = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$
Система векторного керування без компенсації	$\Delta S_M = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$
Система векторного керування з компенсацією	$\Delta S_M = 1.62 \cdot 10^{-6}$

Кращі результати показали стратегії керування «Master-Slave» та «Mean control», які мають високу швидкодію систем і, в результаті, велику точність позиціонування моста крану, а саме, при стратегії керування «Master-Slave» похибка склала 0.0002 м при допустимій 0.02м та при «Mean control» $3 \cdot 10^{-5}$ м, що є 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 перекіс крана є відсутнім.

Найкращі ж результати отримані при використанні системи векторного керування та двох перетворювачів частоти, де похибка без компенсації склала $2,1 \cdot 10^{-5}$ м, з компенсацією $1,62 \cdot 10^{-6}$ м, що свідчить про надзвичайно велику точність позиціонування, а також з огляду на різницю швидкостей двигунів - відсутність перекосу моста крану.

3.1.7 Системи керування електроприводом візка

Основною вимогою до електроприводу переміщення візка крану є забезпечення високої точності позиціонування. Іншою проблемою при експлуатації приводу переміщення візка постає проблема забезпечення переміщення без пробуксовування пар коліс. Вирішення цієї проблеми дозволить знизити знос реборди коліс рейок, а також забезпечити відповідну точність позиціонування моста. В даній роботі всі ці проблеми розглянуто з початку для обраного обладнання та системи керування, а потім запропоновані більш сучасні, але й більш дорогі системи керування.

Згідно з технічним завданням керування даним електроприводом передбачається на основі живлення двох ЕД-ів від одного ПЧ з скалярним частотним керуванням.

Розімкнута система скалярного керування

Дослідження системи частотного керування здійснювалося при варіаціях активного опору ротора $2R_2$ одного з двигунів, оскільки при роботі двигунів параметри обмоток можуть змінюватися внаслідок нерівномірного навантаження на двигунах, а також в реальних не може існувати двох ідентичних двигунів з однаковими параметрами. Графіки перехідних процесів, отриманих шляхом математичного моделювання, приведено на рис. 3.36-рис. 3.38

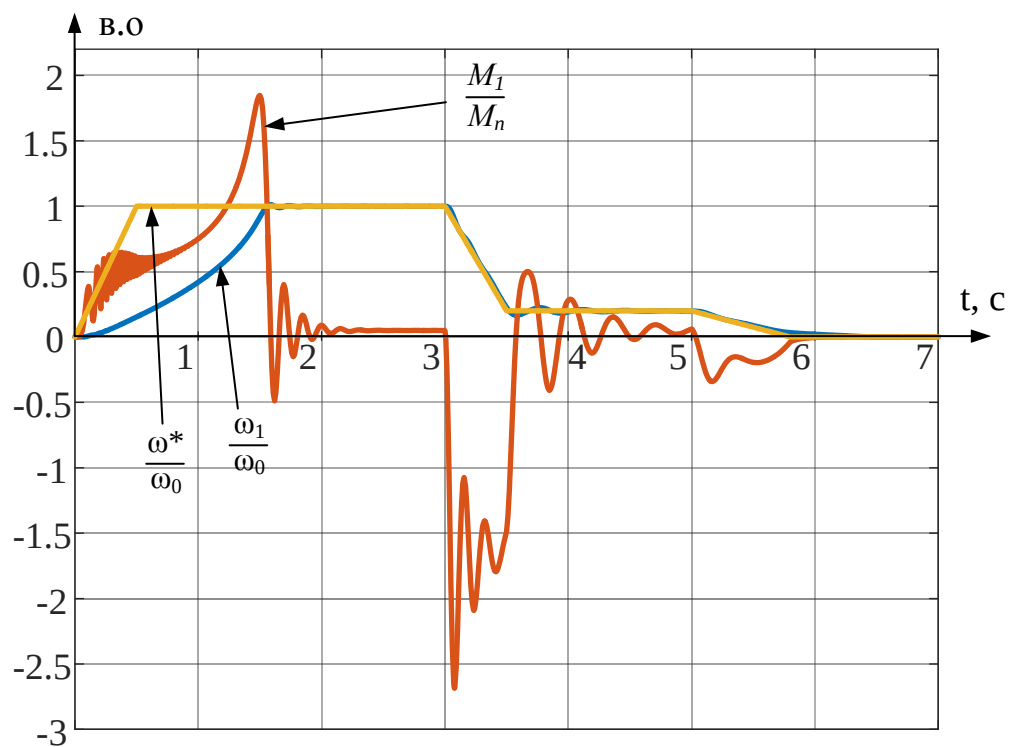


Рис. 3.36 Графіки перехідних процесів першого двигуна при розімкнутій системі скалярного керування

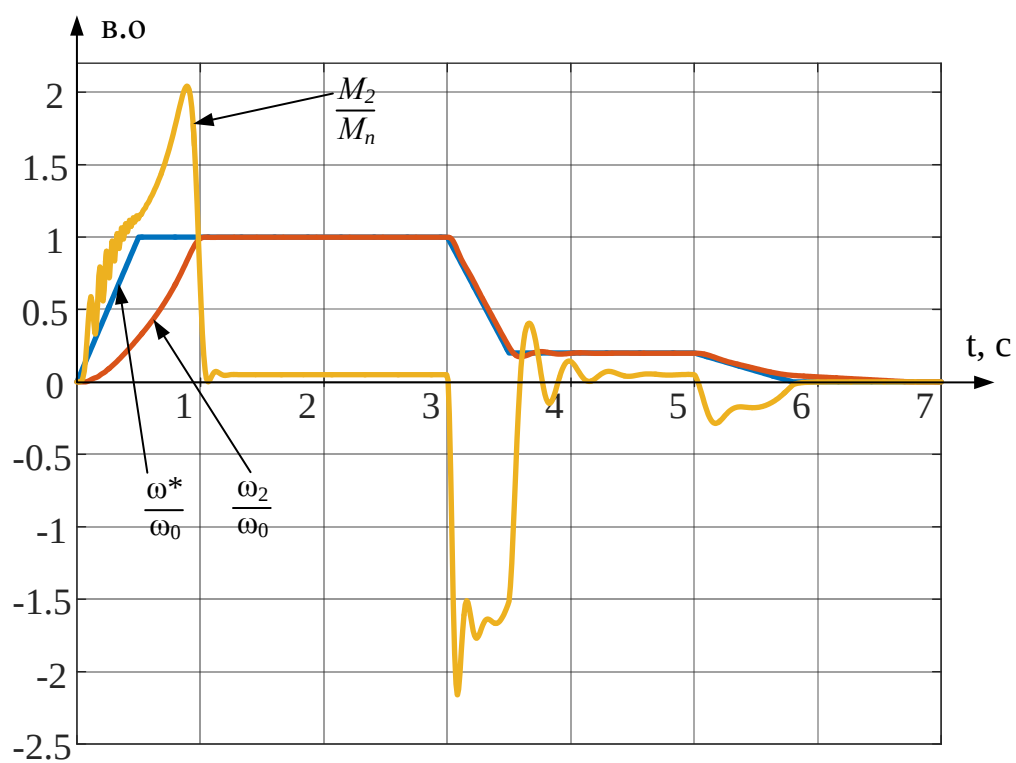


Рис. 3.37 Графіки перехідних процесів другого двигуна при розімкнутій системі скалярного керування

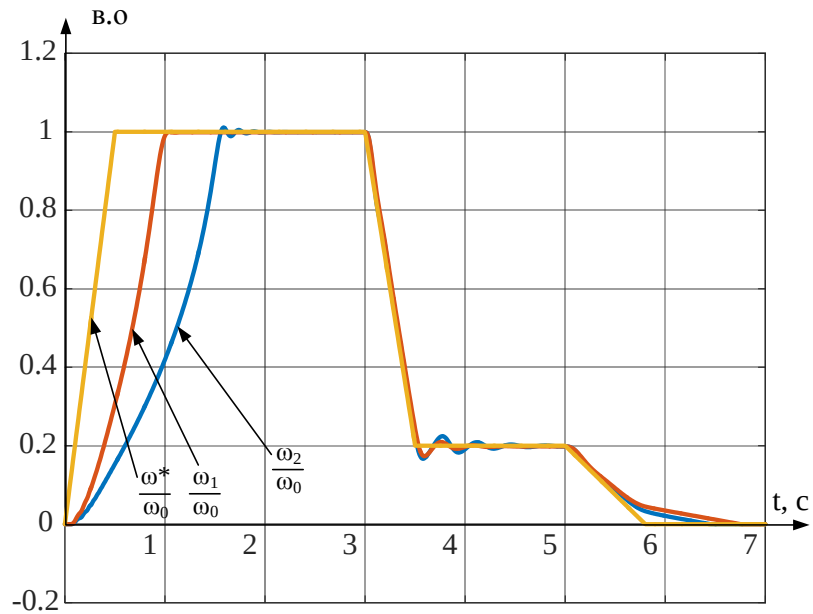


Рис. 3.38 Графіки перехідних процесів двигунів при розімкнутій системі скалярного керування

Система замкненого скалярного керування за швидкістю

На рис. 3.6 Додаток Б.2 наведена структурна схема замкненої системи скалярного керування асинхронним двигуном за швидкістю. Графіки перехідних процесів, отриманих шляхом математичного моделювання, приведено на рис. 3.39-рис. 3.41

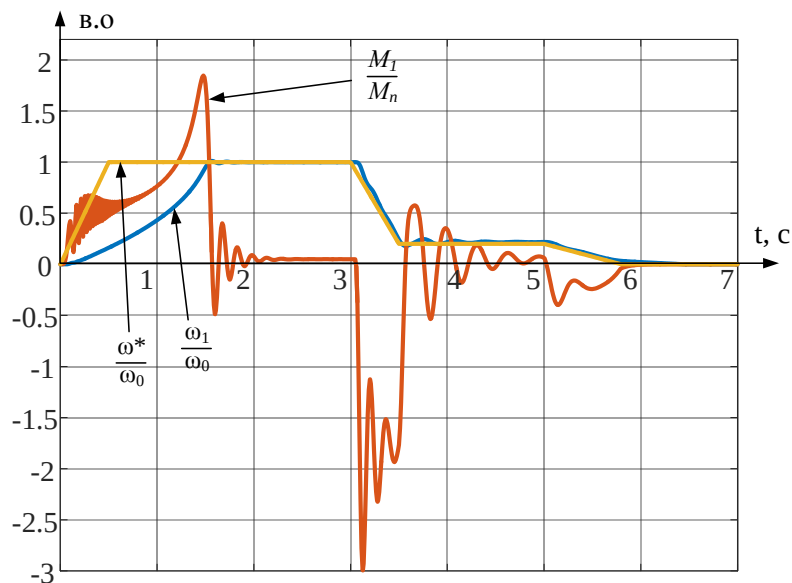


Рис. 3.39 Графіки перехідних процесів першого двигуна при замкненій системі скалярного керування за швидкістю

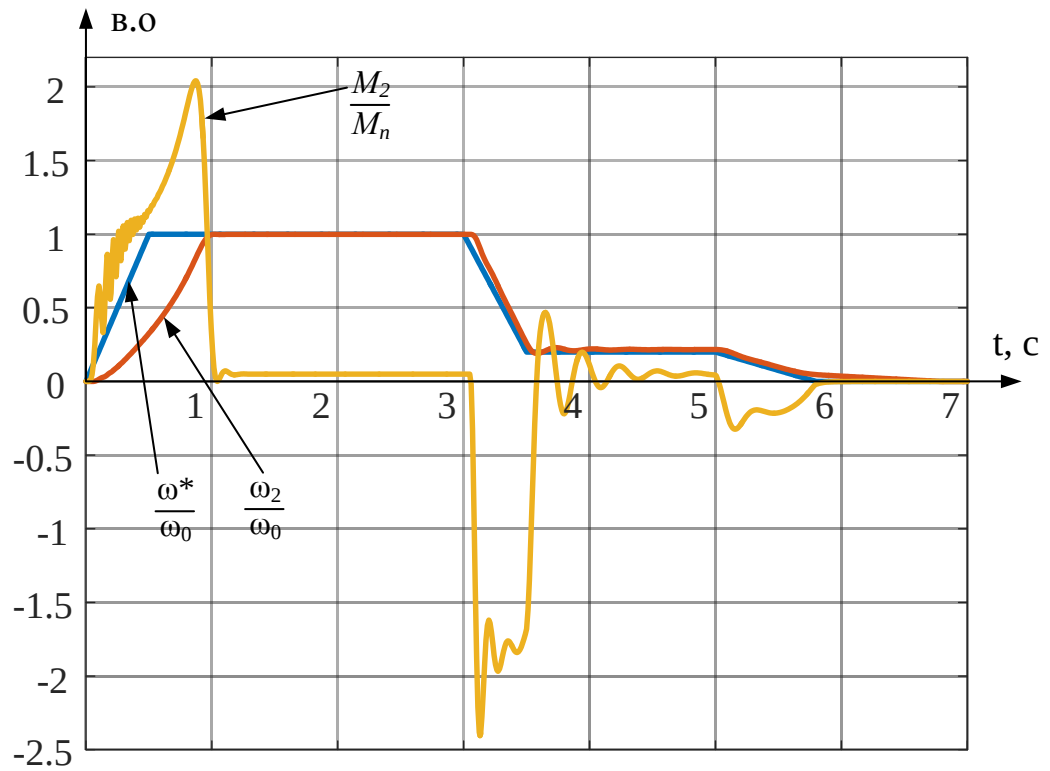


Рис. 3.40 Графіки перехідних процесів другого двигуна при замкненій системі скалярного керування за швидкістю

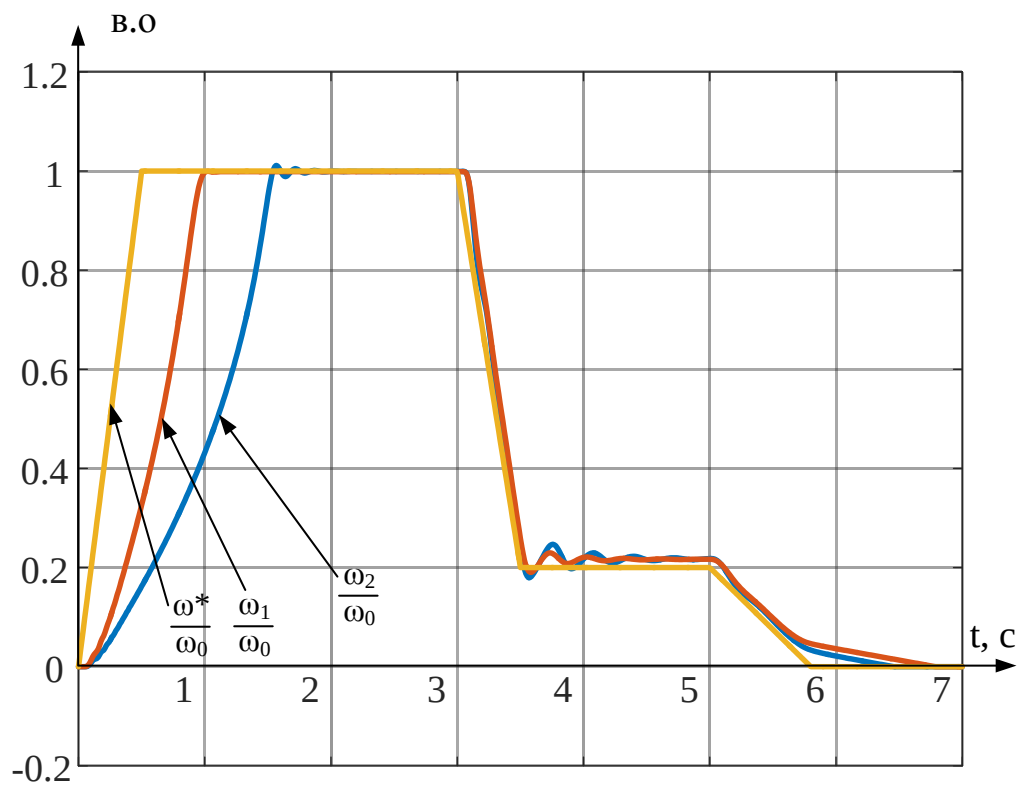


Рис. 3.41 Графіки перехідних процесів двигунів при замкненій системі скалярного керування за швидкістю

Замкнена система скалярного керування за положенням

На рис. 3.10 Додаток Б.3 наведена структурна схема замкненої системи скалярного керування асинхронним двигуном за положенням. Графіки перехідних процесів, отриманих шляхом математичного моделювання, приведено на рис. 3.42-рис. 3.46

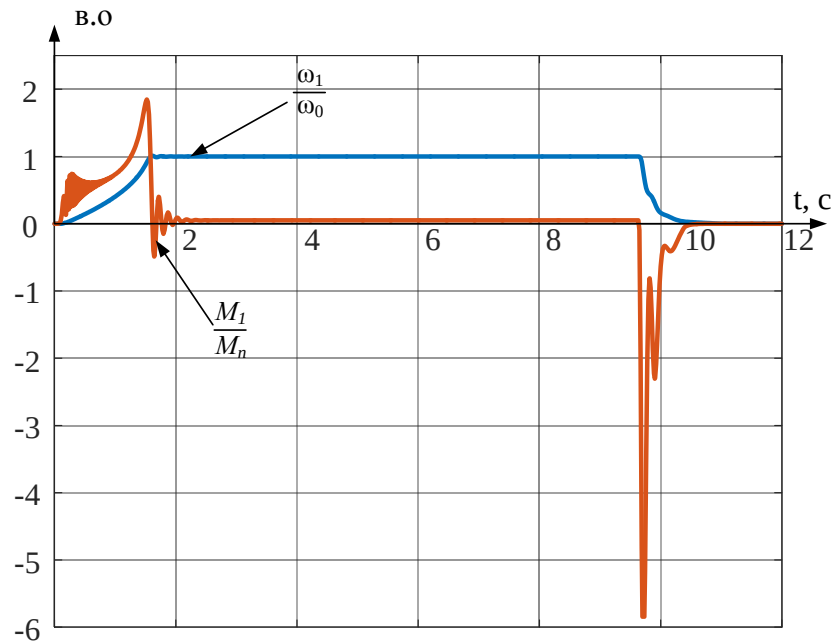


Рис. 3.42 Графіки перехідних процесів першого двигуна при замкненій системі скалярного керування за положенням

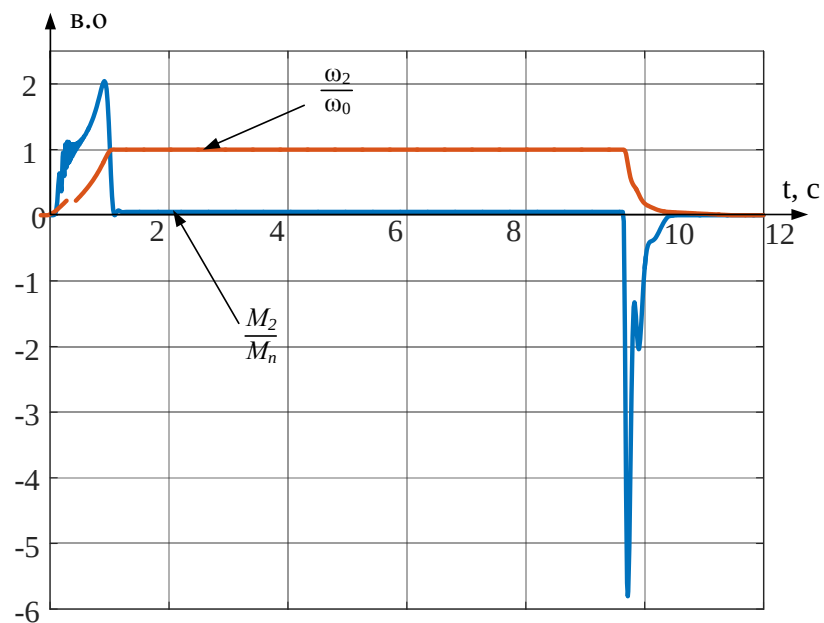


Рис. 3.43 Графіки перехідних процесів другого двигуна при замкненій системі скалярного керування за положенням

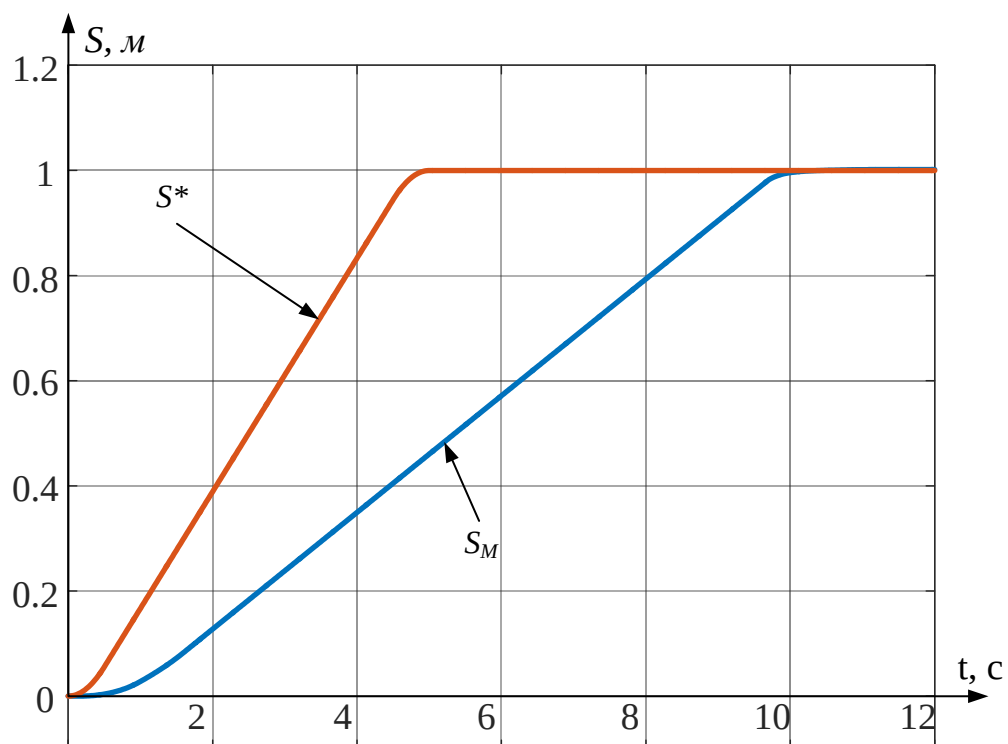


Рис. 3.44 Переміщення крана при замкненій системі скалярного керування за положенням

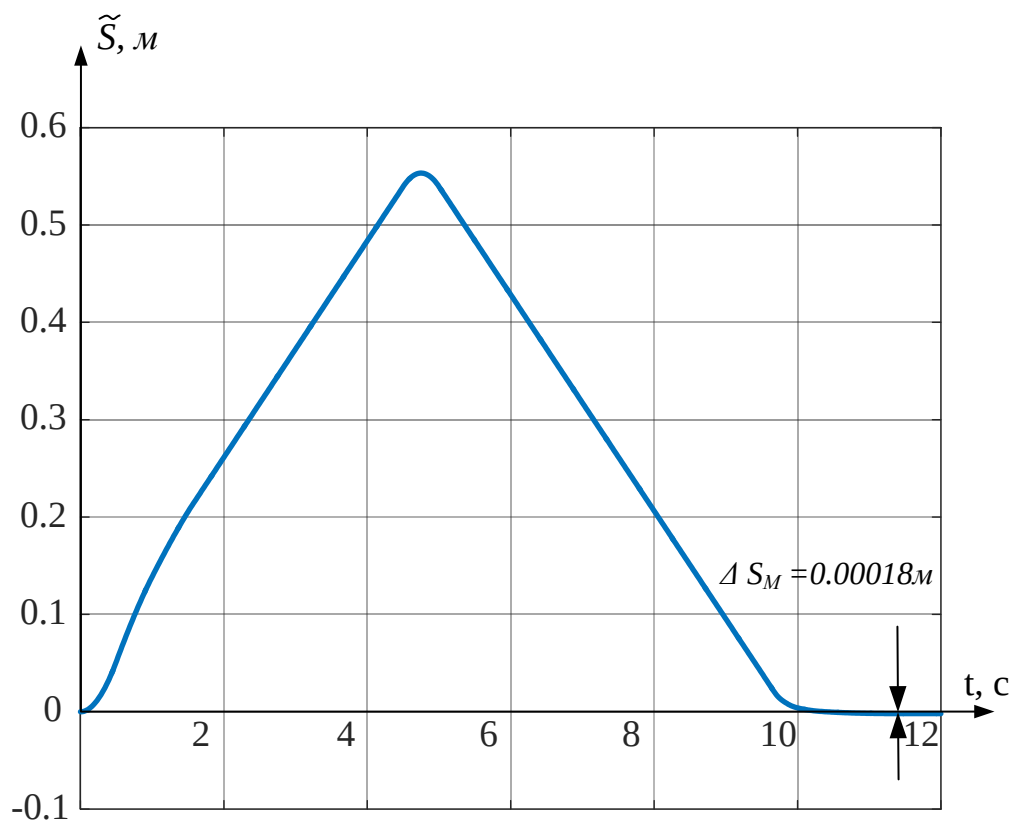


Рис. 3.45 Похибка переміщення крана при замкненій системі скалярного керування за положенням

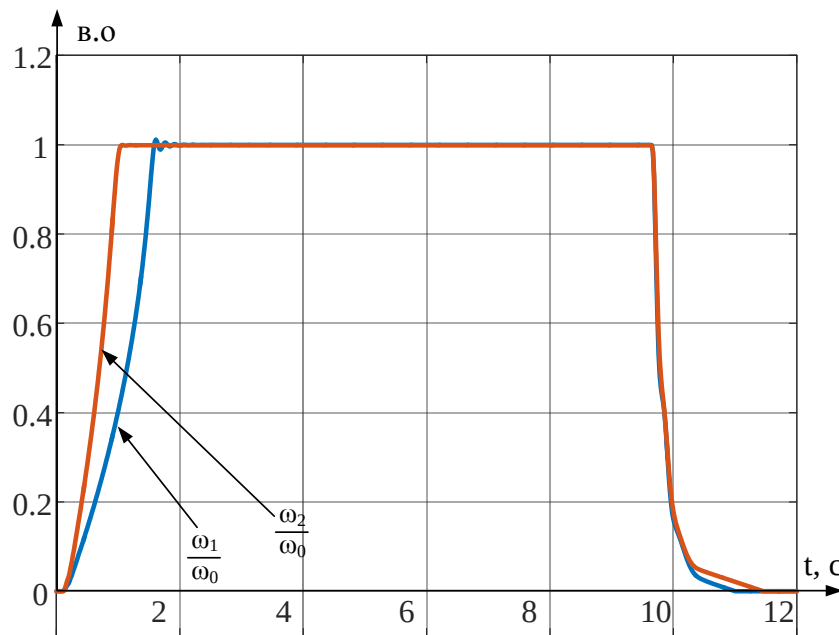


Рис. 3.46 Графіки перехідних процесів двигунів при замкненій системі скалярного керування за положенням

Проаналізувавши результати математичного моделювання різних систем керування двома двигунами, для механізму переміщення візка, можна зробити висновок, що у випадку використання системи скалярного керування спостерігається низька швидкодія систем, тобто перехідні процеси мають затягнутий характер, але в той же час точність позиціонування візка достатньо висока і лежить в межах допустимої похибки, а саме при завданні переміщення візка на 1 м, його переміщення склало 1.00018 м. Також при використанні системи скалярного керування, замкненої за положення, присутня різниця швидкостей двигунів при розгоні візка, що може призвести до короткочасного пробуксовування однієї з пар коліс.

Похибка переміщення крана при скалярному керуванні дорівнює $\Delta S_B = 0.00018$ м.

Стратегія керування «Master-Slave»

Результати моделювання системи «Master-Slave» для електроприводу механізму візка наведені на рис.3.47 – рис. 3.51.

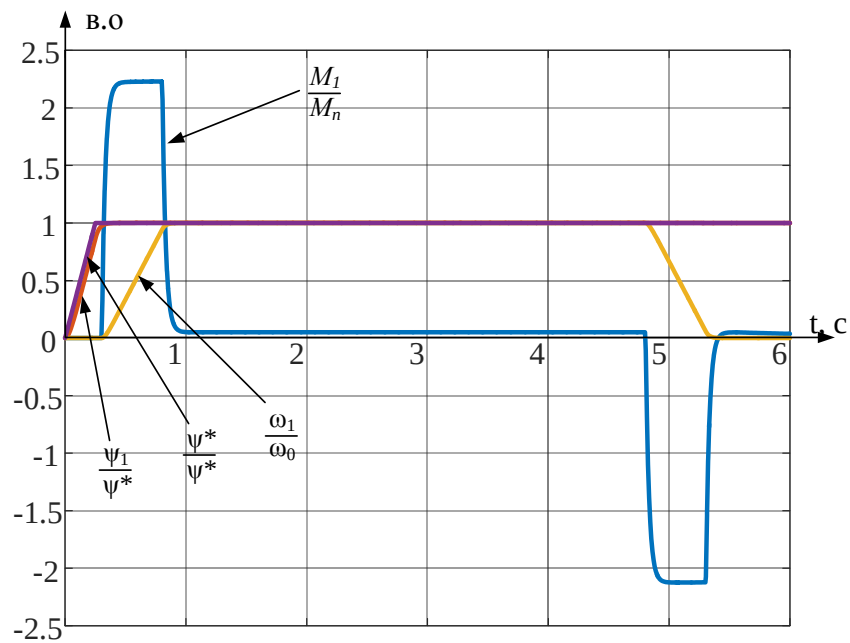


Рис. 3.47 Графіки перехідних процесів першого двигуна при стратегії
«Master – Slave»

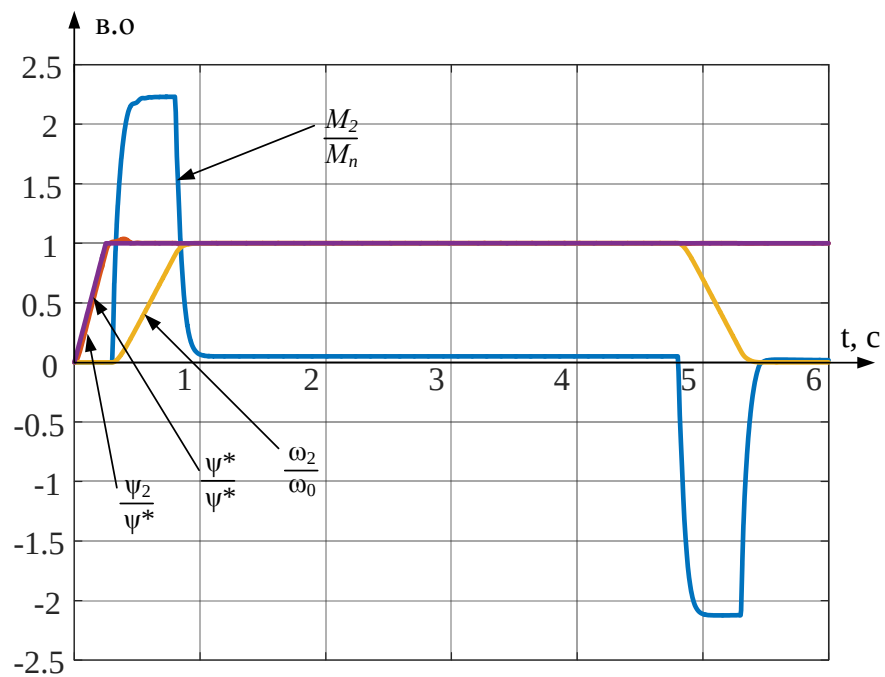


Рис. 3.48 Графіки перехідних процесів другого двигуна при стратегії
«Master – Slave»

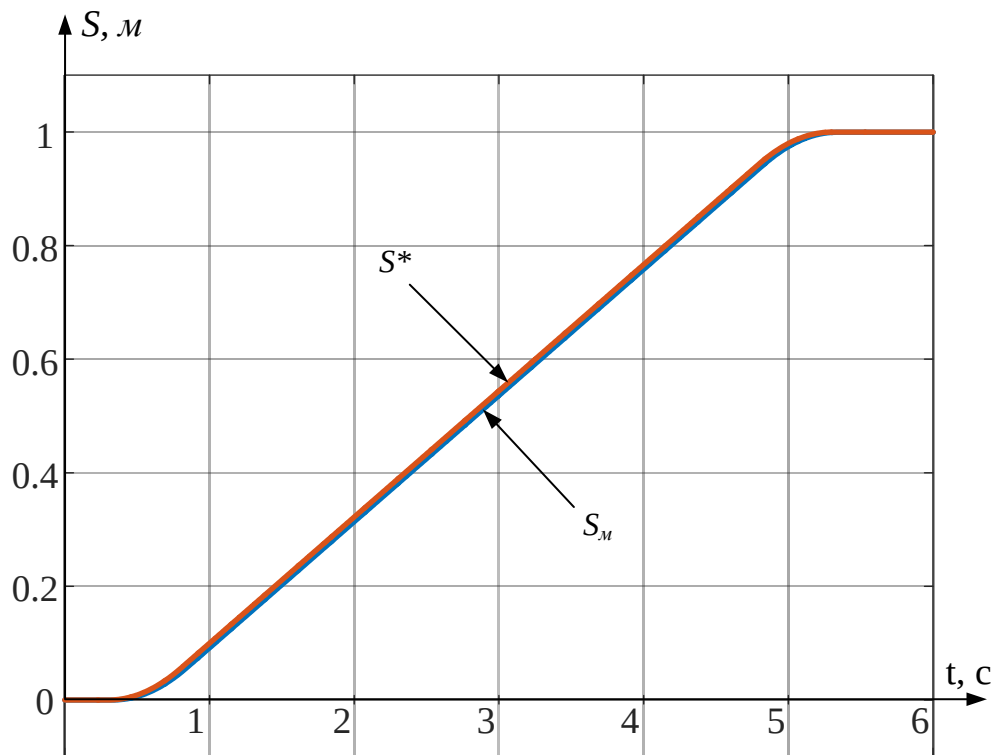


Рис. 3.49 Переміщення крана при «Master – Slave»

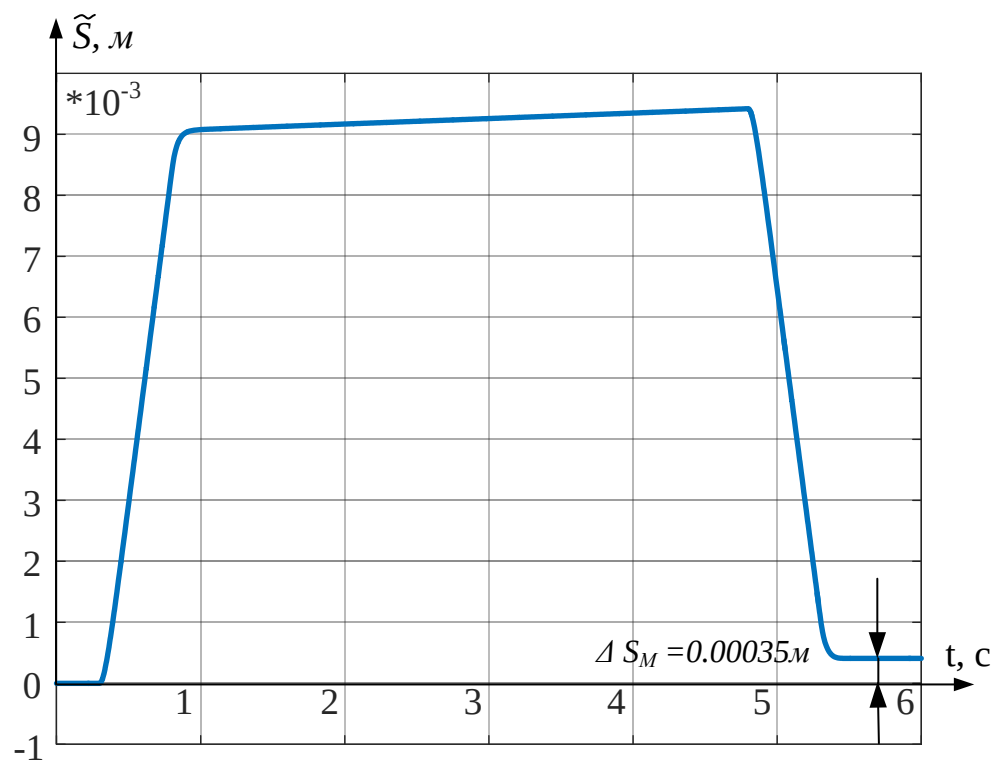


Рис. 3.50 Похибка переміщення крана при «Master – Slave»

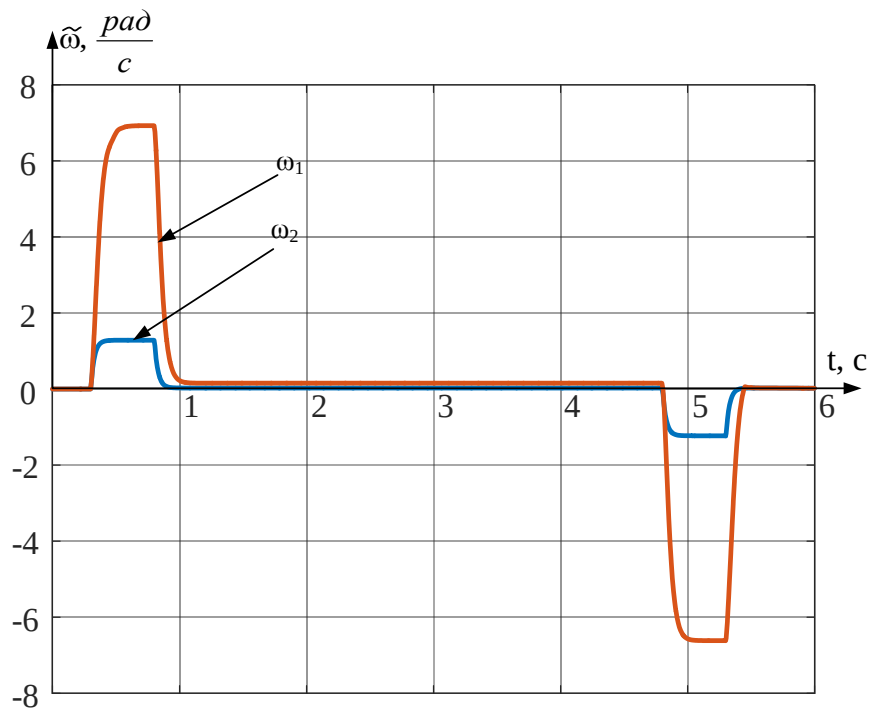


Рис. 3.51 Графіки перехідних процесів двигунів при «Master-Slave»

Стратегія керування «Mean control»

Результати моделювання системи «Mean control» наведені на рис.3.52 – рис. 3.56.

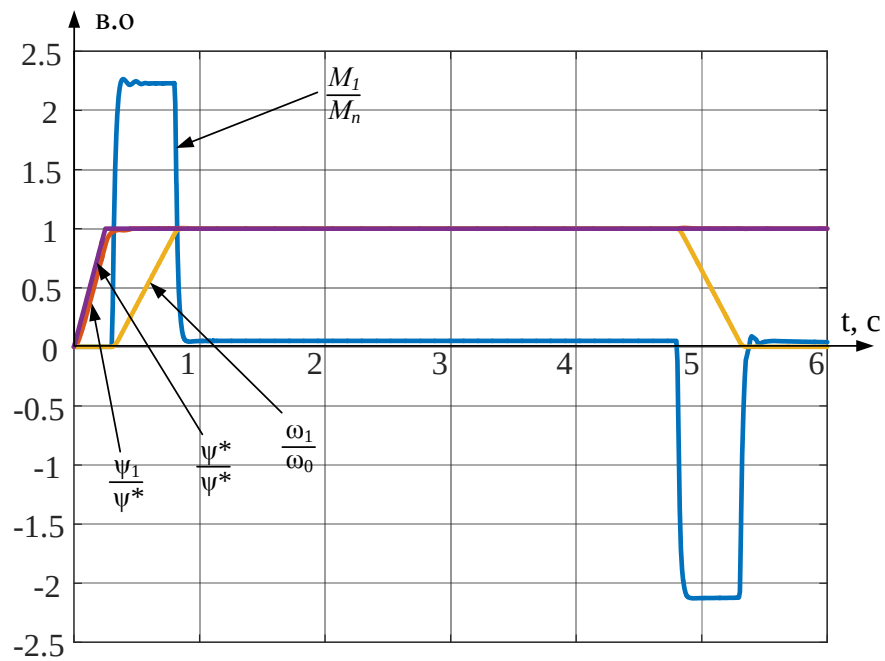


Рис. 3.52 Графіки перехідних процесів першого двигуна при стратегії «Mean control»

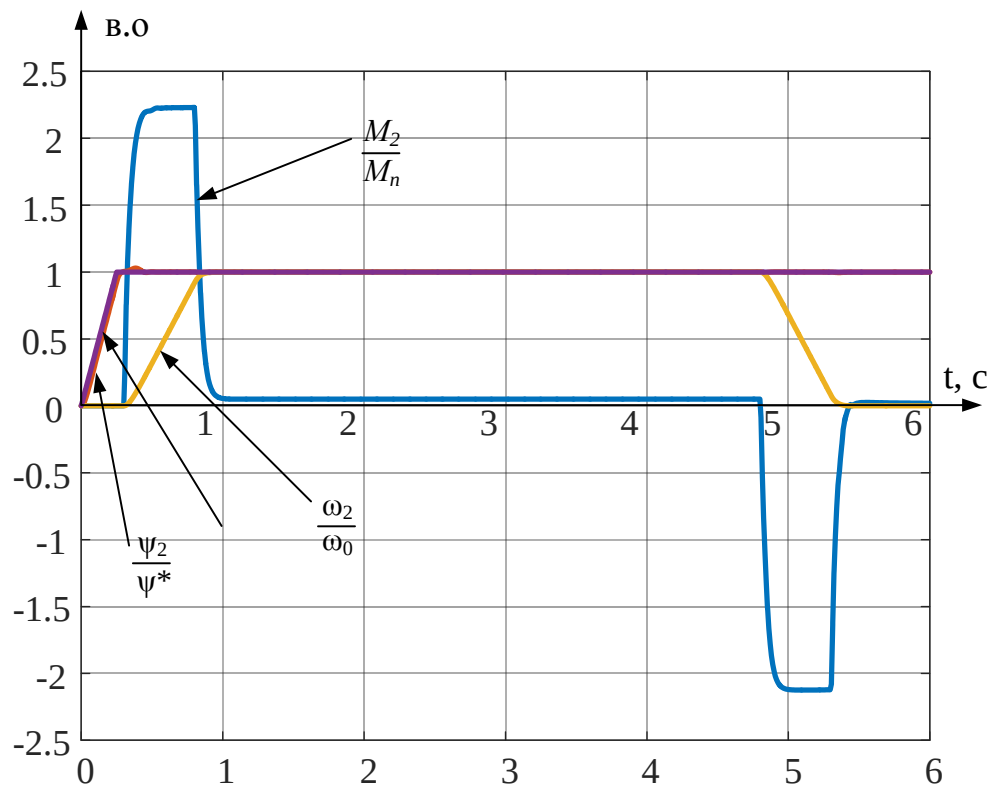


Рис. 3.53 Графіки перехідних процесів другого двигуна при стратегії
«Mean control»

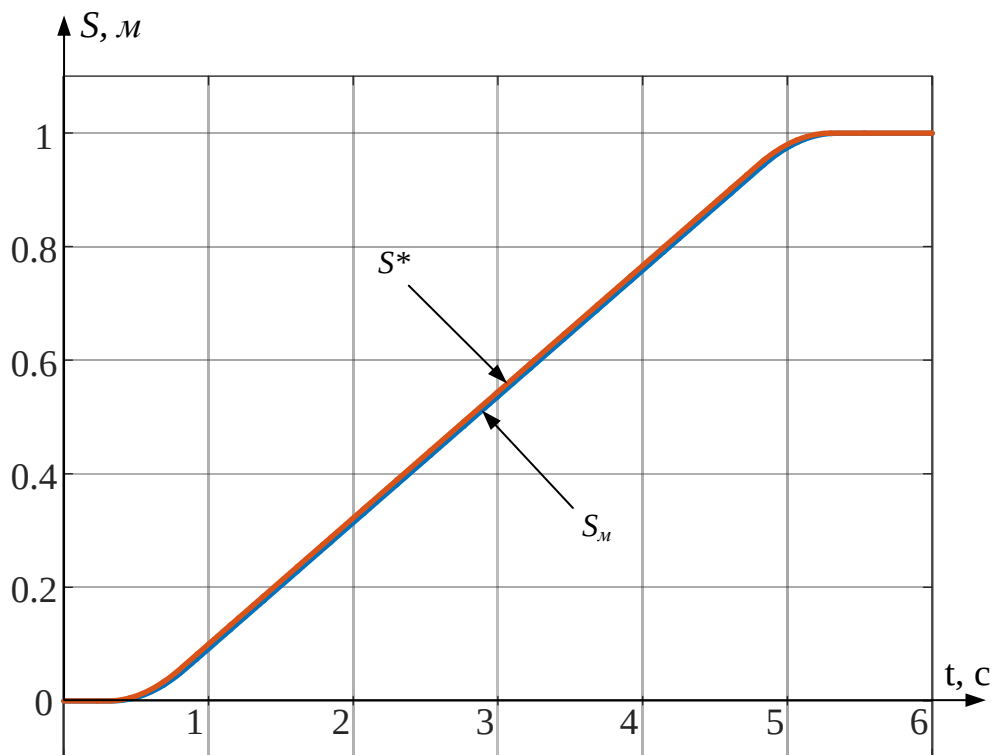


Рис. 3.54 Переміщення крана при «Mean control»

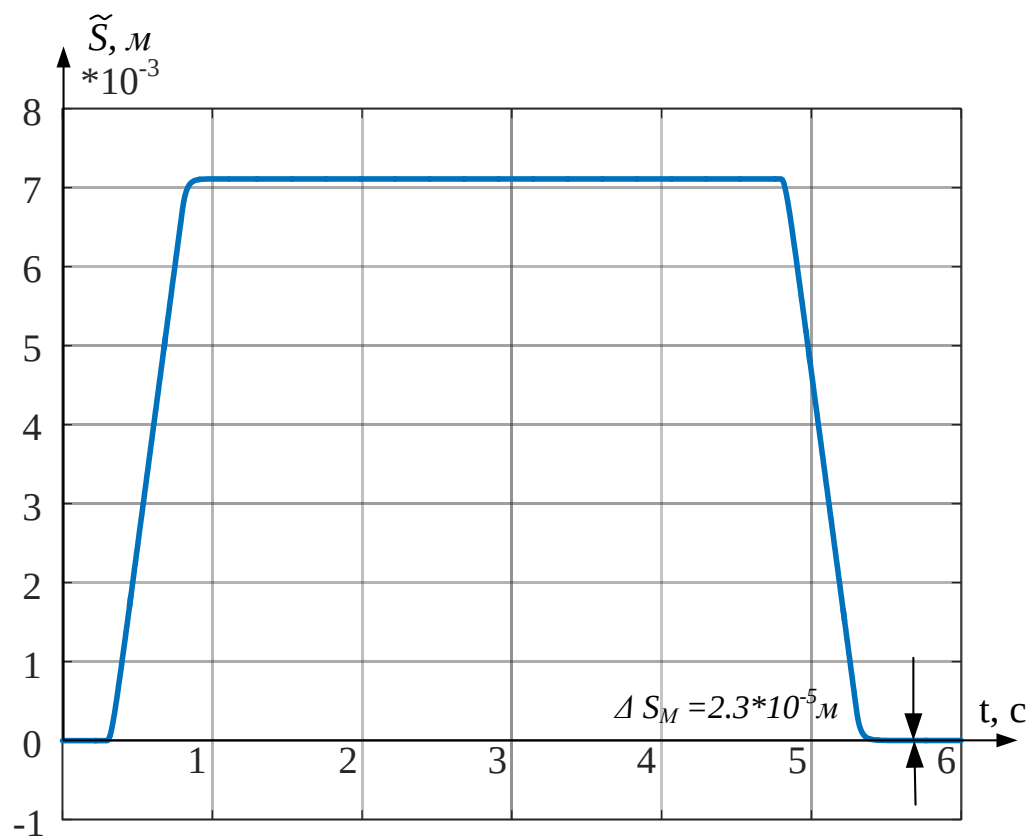


Рис. 3.55 Похибка переміщення крана при «Mean control»

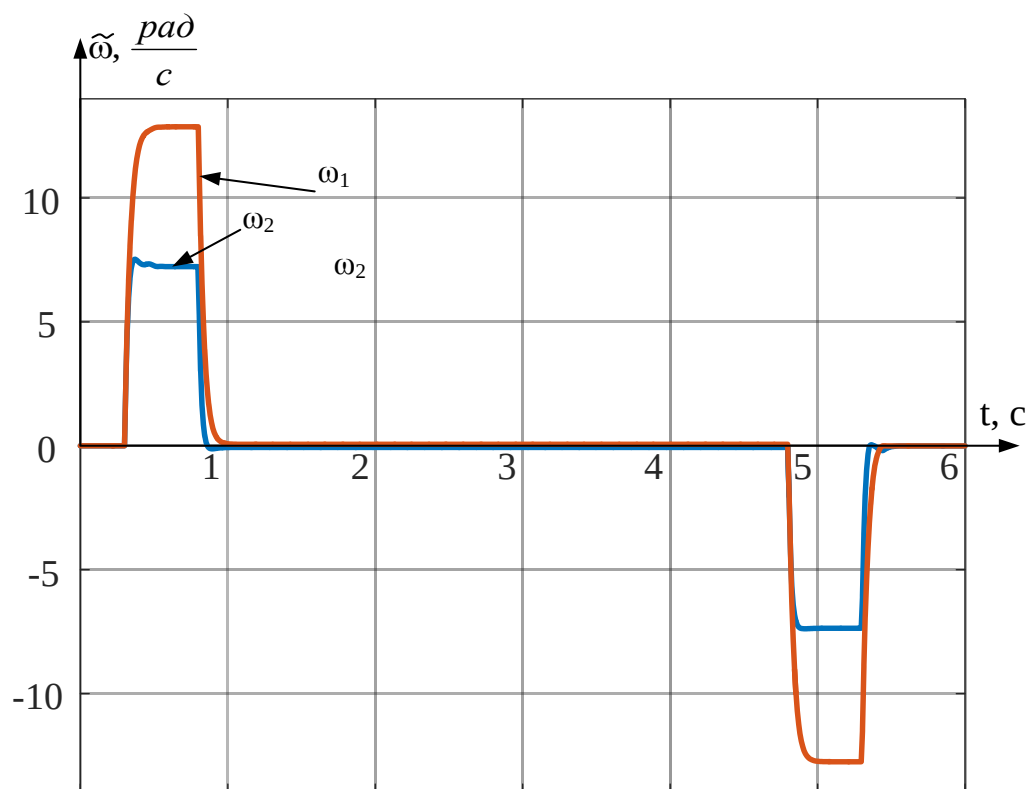


Рис. 3.56 Графіки перехідних процесів двигунів при «Mean control»

Похибки переміщення візка при стратегіях «Master-Slave» та «Mean control» зведені до табл. 3.5

Таблиця 3.3

Похибки переміщення візка

Система керування	Величина похибки, м
Стратегія «Master-Slave»	$\Delta S_B = 2.3 \cdot 10^{-5}$ м
Стратегія «Mean control»	$\Delta S_B = 2 \cdot 10^{-5}$ м

Кращі результати показали стратегії керування «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 склала $2.3 \cdot 10^{-5}$ м при допустимій 0.02м 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 є маловірогідним.

Замкнена система векторного керування при живленні двигунів від індивідуальних ПЧ

Особливістю електроприводів горизонтального переміщення є те, що більшість з них реалізуються як дводвигунні приводи. В такому випадку електродвигуни можуть живитися від одного перетворювача частоти [42], що є найбільш економічним варіантом, так і від окремих перетворювачів, що забезпечує більш гнучке керування. Структурна схема векторного керування при живленні двигунів від індивідуальних перетворювачів частоти представлена на рис. 3.29. Математична модель в програмному середовищі Matlab, на основі якої було проведено дослідження наведено в Додатку В.

Результати моделювання системи векторного керування при живленні двигунів від індивідуальних ПЧ наведені на рис.3.57 – рис. 3.62.

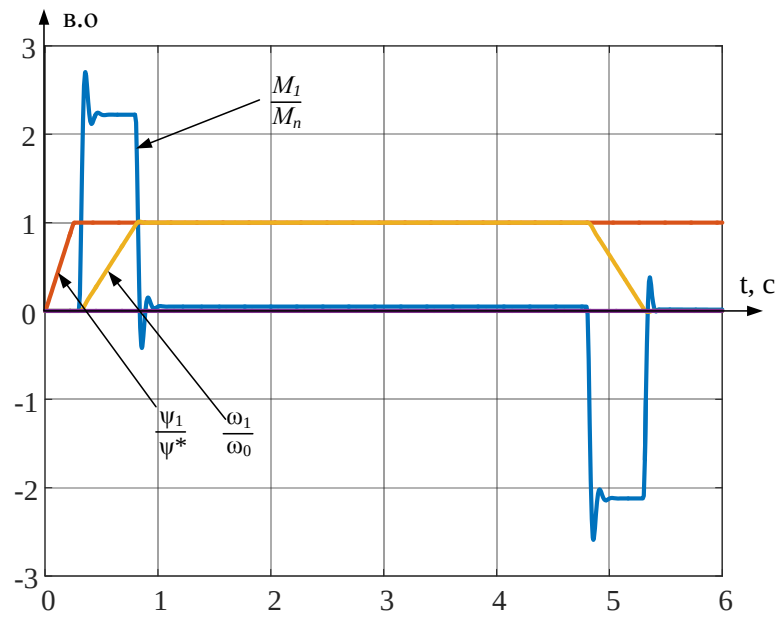


Рис. 3.57 Графіки перехідних процесів першого двигуна при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

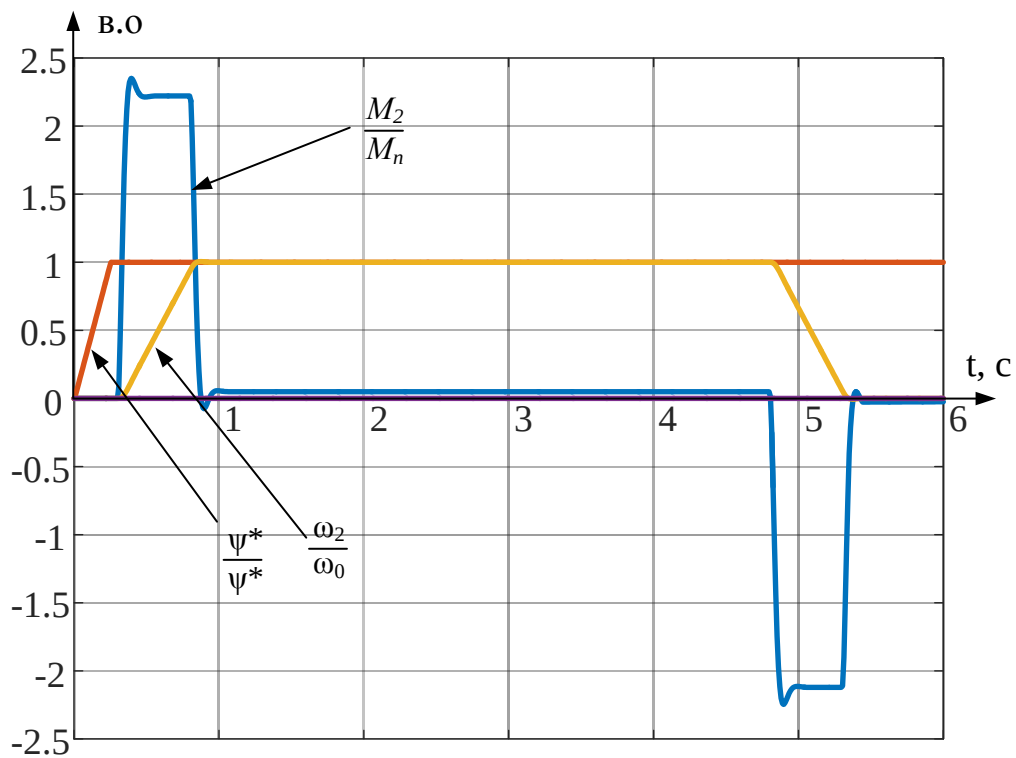


Рис.3.58 Графіки перехідних процесів другого двигуна при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

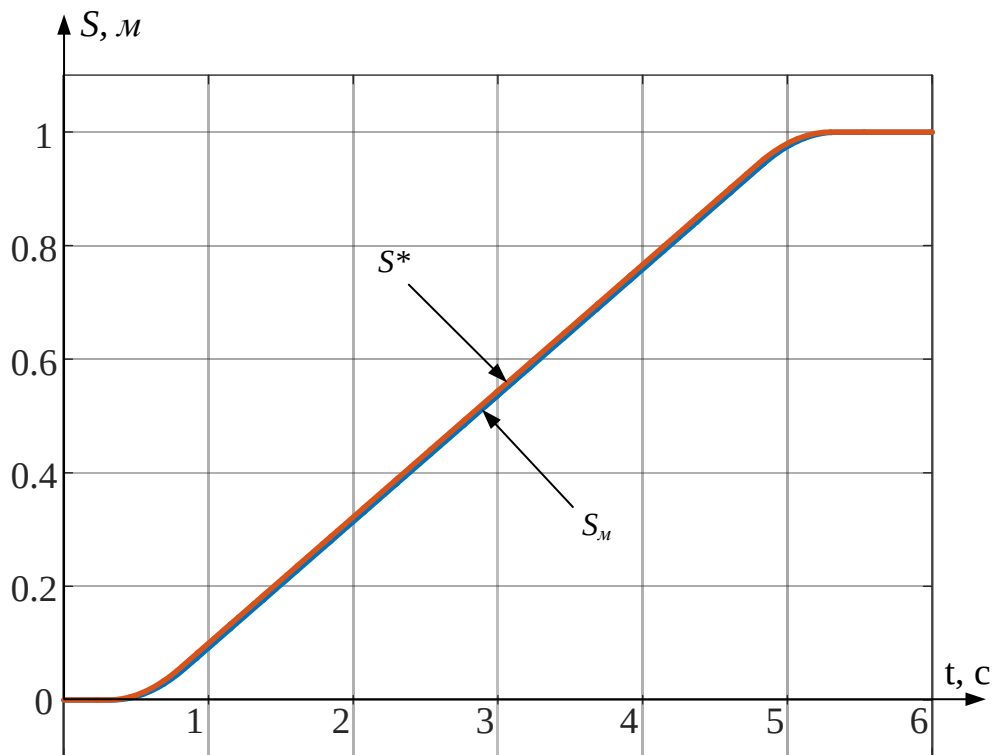


Рис. 3.59 Переміщення крана при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

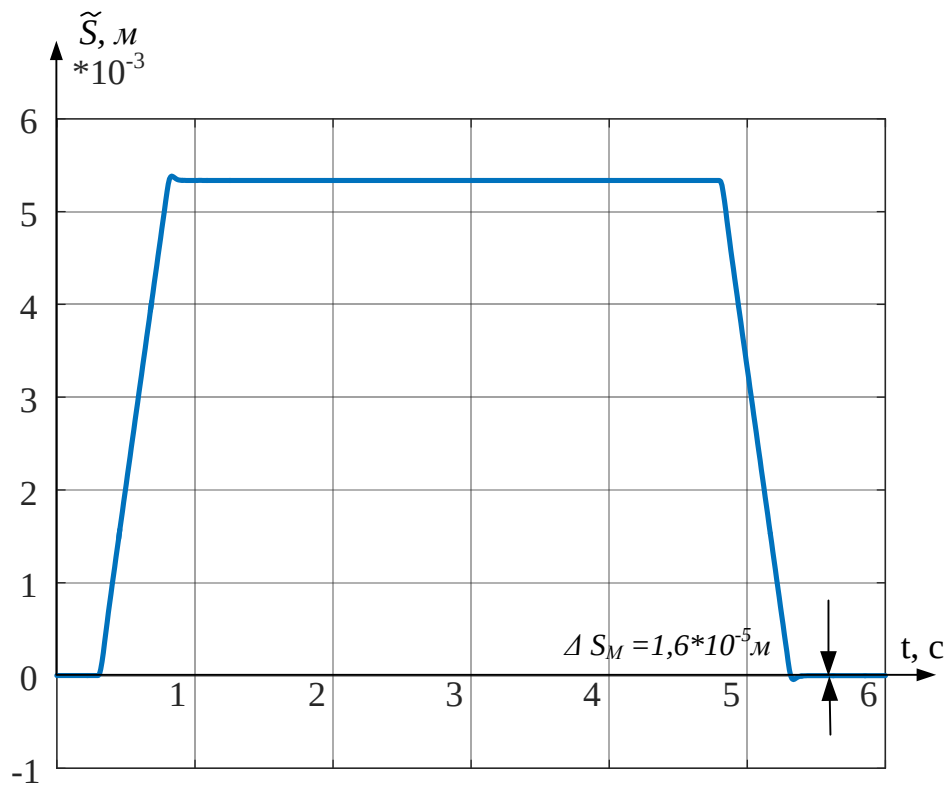


Рис. 3.60 Похибка переміщення крана при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

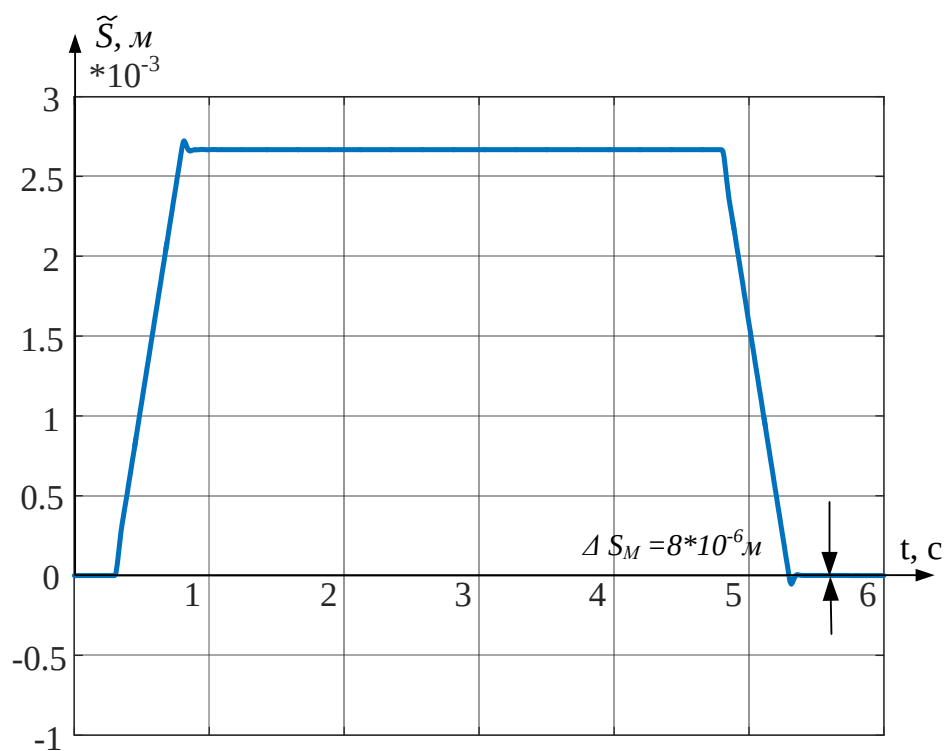


Рис. 3.61 Похибка переміщення крана при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ з компенсацією похибки

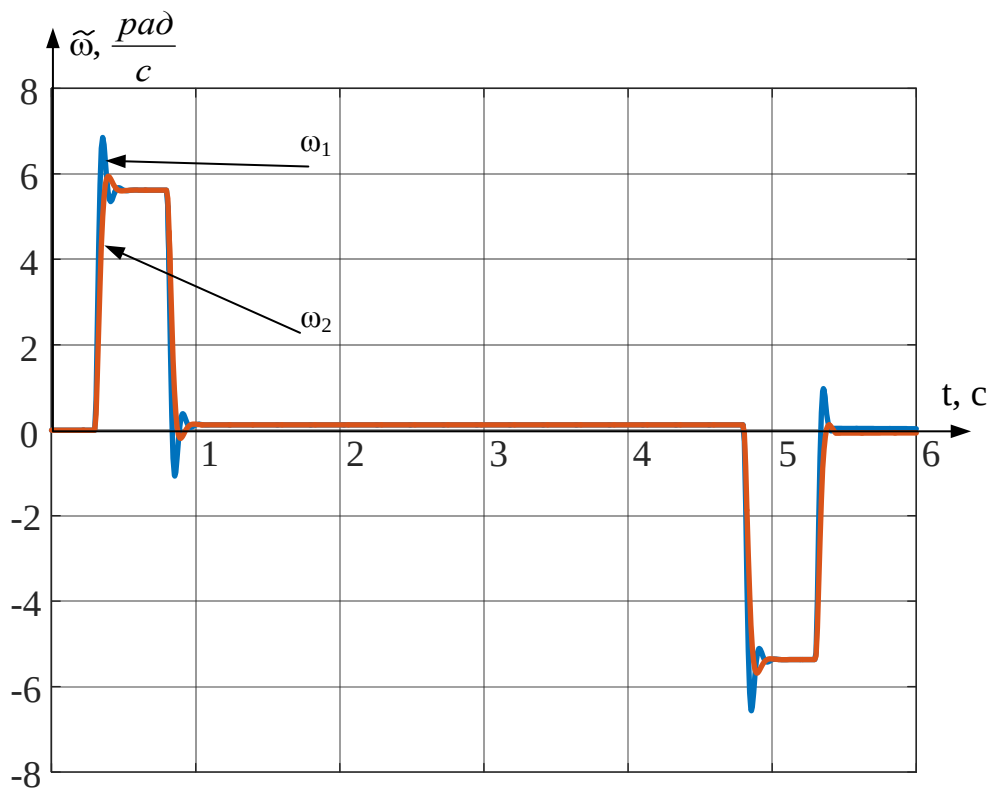


Рис. 3.62 Графіки перехідних процесів двигунів при векторному керуванні від індивідуальних ПЧ

3.2. Стратегії керування електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора

Дослідження системи керування електроприводом механізму підйому-спуску проведемо при використанні двох систем керування: система скалярного керування замкнена за положенням та система векторного керування замкненої за положенням. Для двох типів операцій проведено дослідження, а саме - при опусканні технічної корзини в ванну дезактивації металу та при підніманні її.

При операціях піднімання та опускання технічної корзини існує ризик розплескування дезактивуючого розчину за межі ванни, що є неприпустимим та небезпечним, тому необхідно забезпечити плавність опускання технічної корзини в ванну. Також необхідно враховувати те, що при опусканні корзини в рідину виникає виштовхуюча сила, що призводить до зміни навантаження. Характер навантаження, що прикладено до валу двигуна, наведено на рис. 3.63

На рис. 3.10 Додаток Г наведена структурна схема замкненої системи скалярного керування асинхронним двигуном за положенням. Графіки перехідних процесів, отриманих шляхом математичного моделювання, приведено на рис. 3.64 – рис. 3.66 (підйом) та рис.3.67 – рис. 3.69 (спуск).

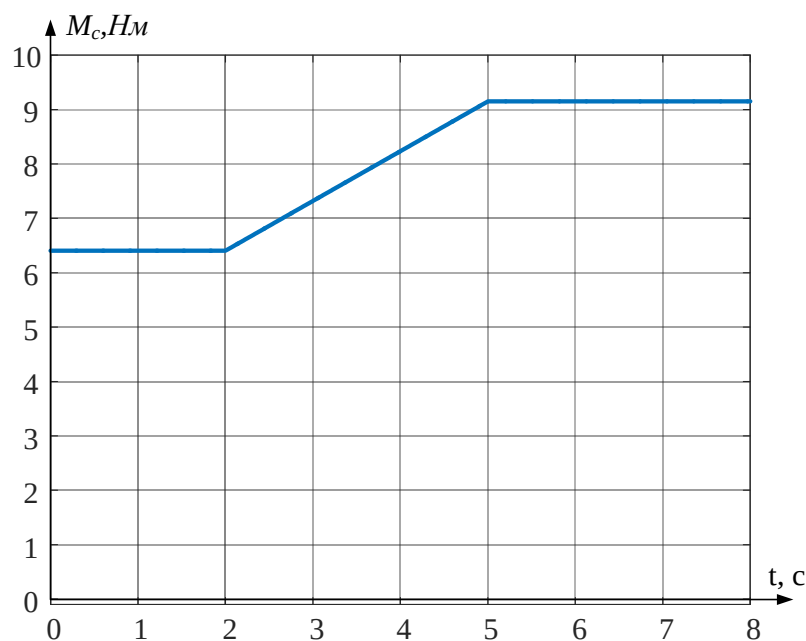


Рис. 3.63 Навантаження прикладене до валу двигуна

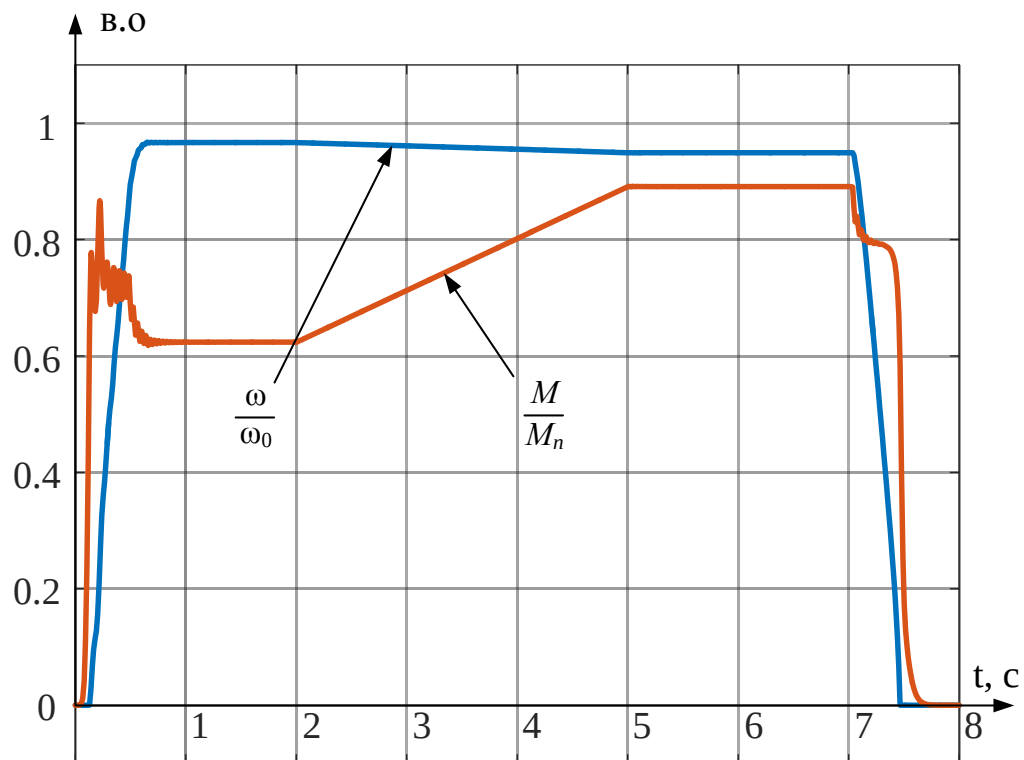


Рис. 3.64 Графіки перехідних процесів при скалярному керуванні замкненому за положенням (підйом)

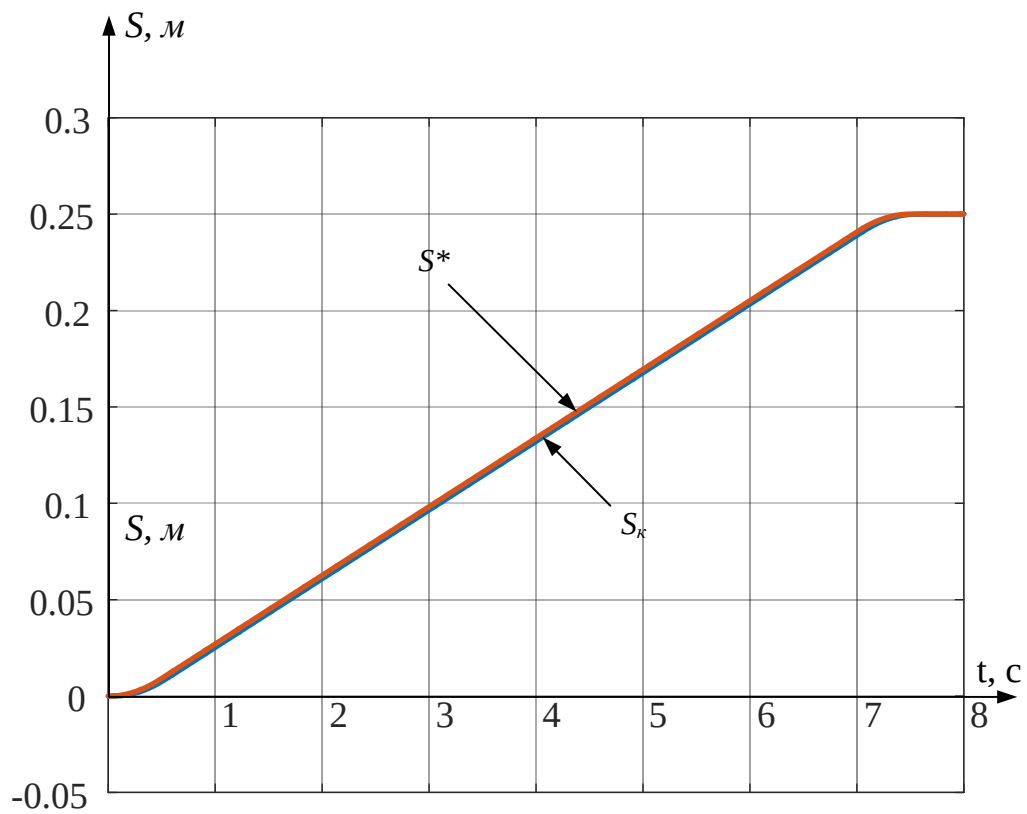


Рис. 3.65 Переміщення робочого органу (підйом)

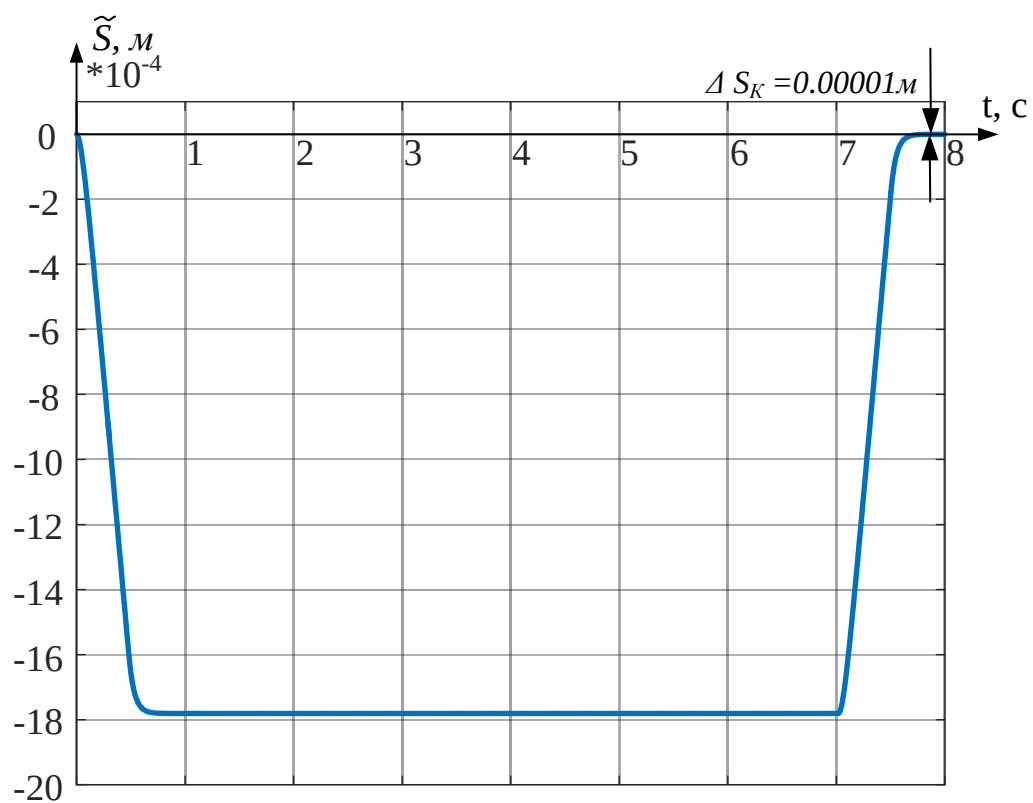


Рис. 3.66 Похибка відпрацювання переміщення робочого органу (підйом)

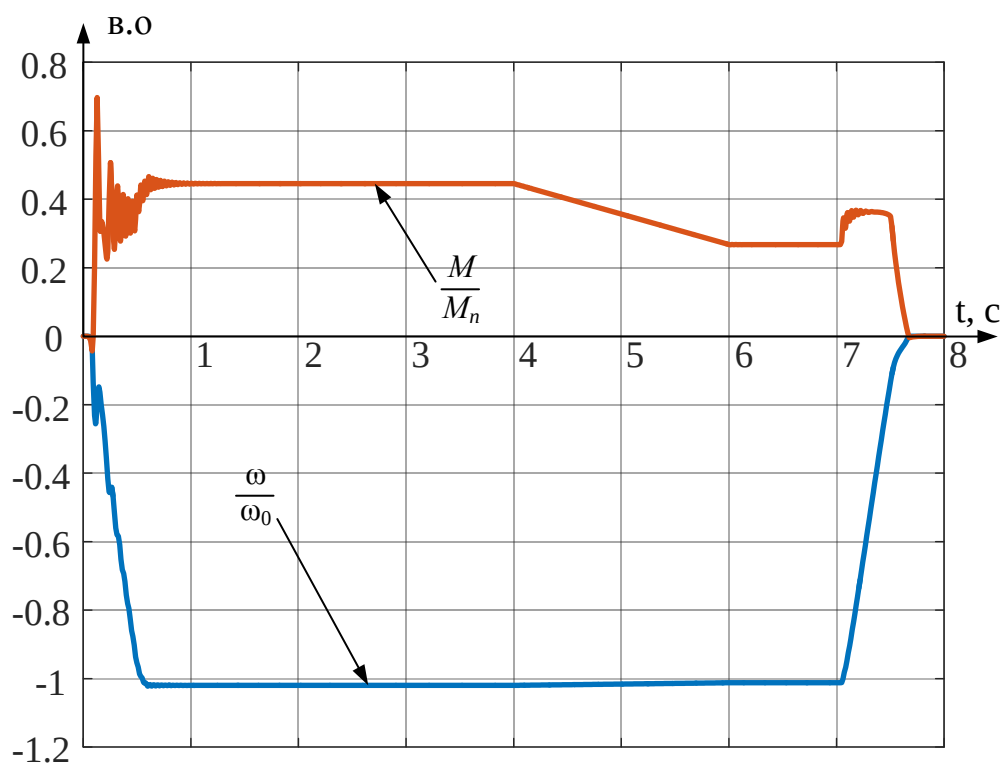


Рис. 3.67 Графіки перехідних процесів при скалярному керуванні замкненому за положенням (спуск)

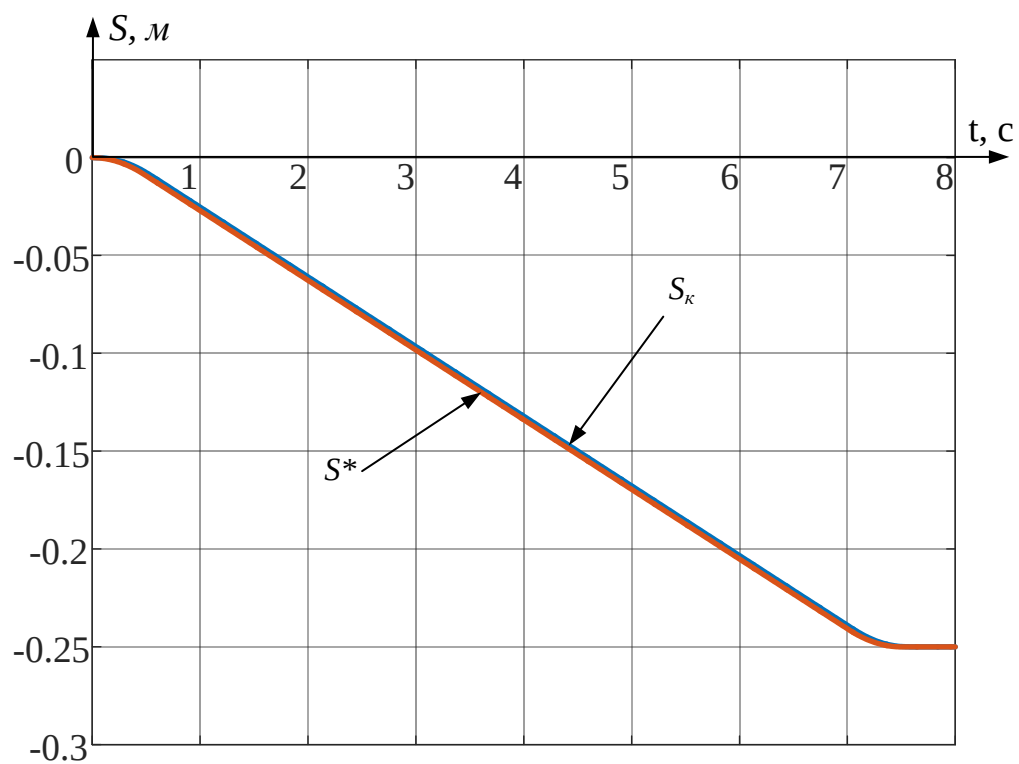


Рис. 3.68 Переміщення робочого органу (спуск)

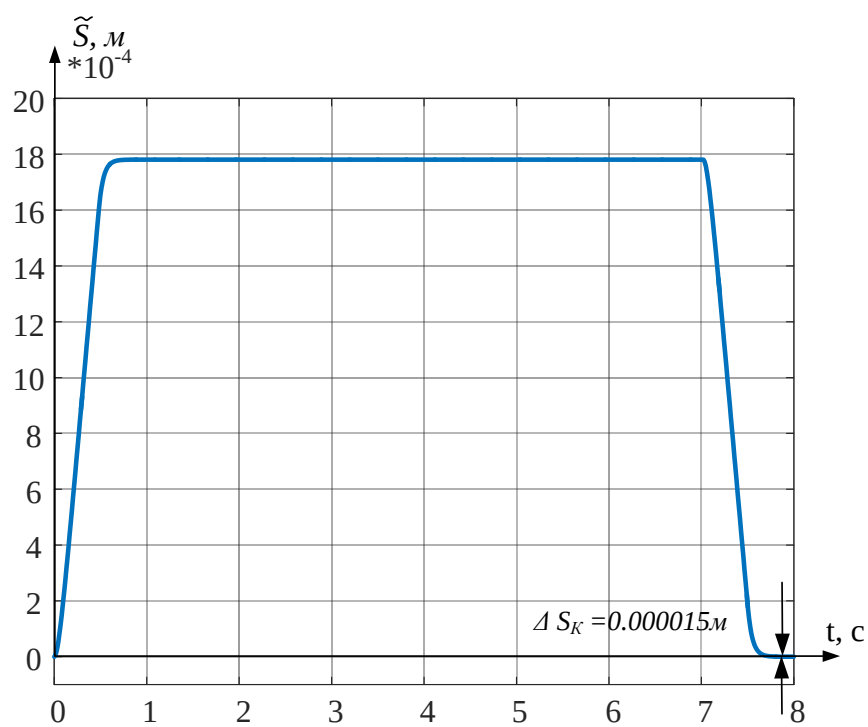


Рис. 3.69 Похибка відпрацювання переміщення робочого органу (спуск)

Структурна схема векторного керування представлена на рис. 3.29. Результати моделювання системи векторного керування наведені на рис. 3.70 – рис. 3.72 (спуск) та рис.3.73 – рис. 3.75 (підйом).

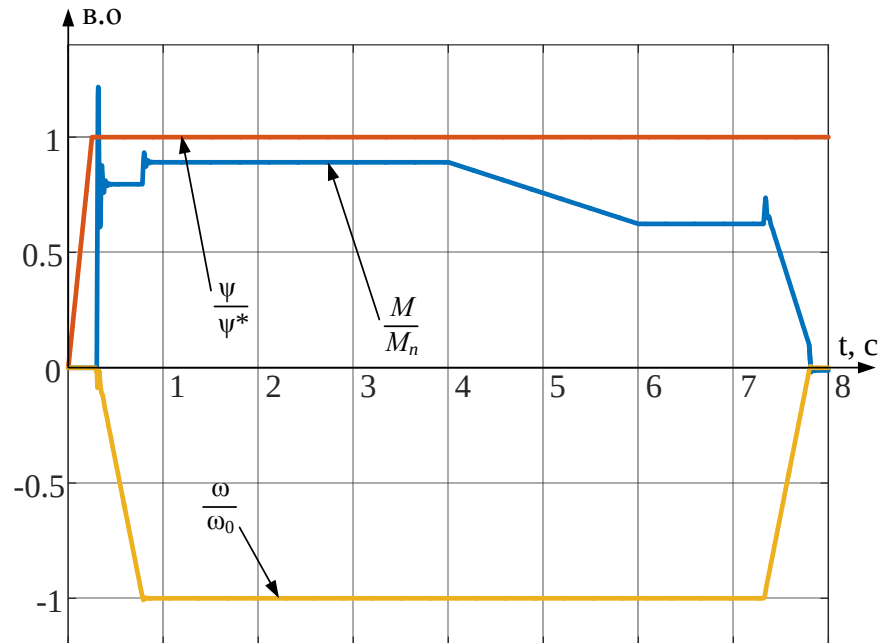


Рис. 3.70 Графіки перехідних процесів при векторному керуванні замкненому за положенням (спуск)

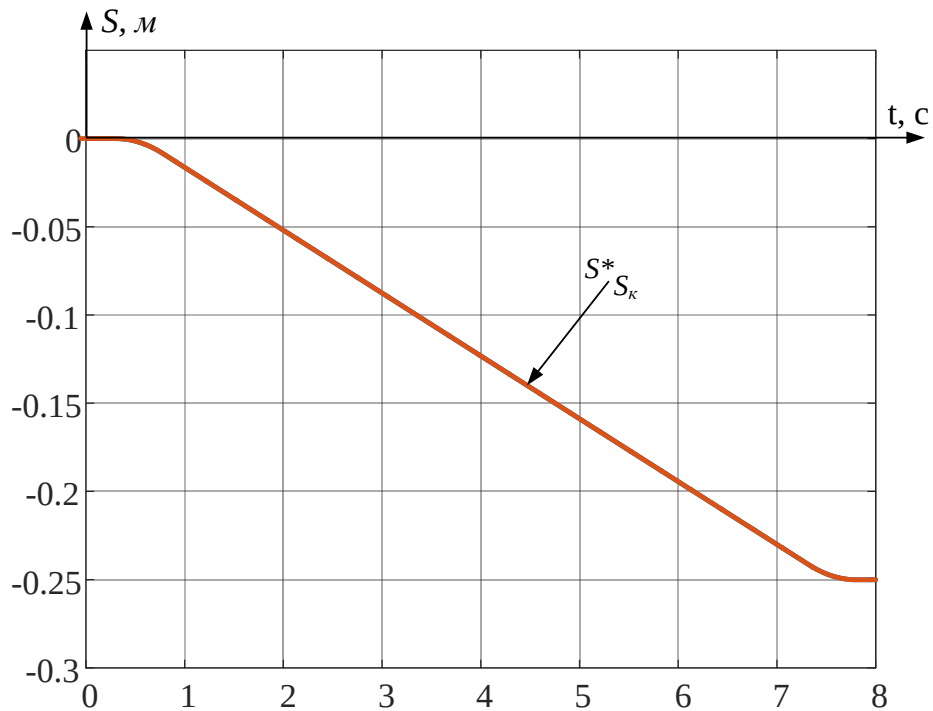


Рис. 3.71 Переміщення робочого органу (спуск)

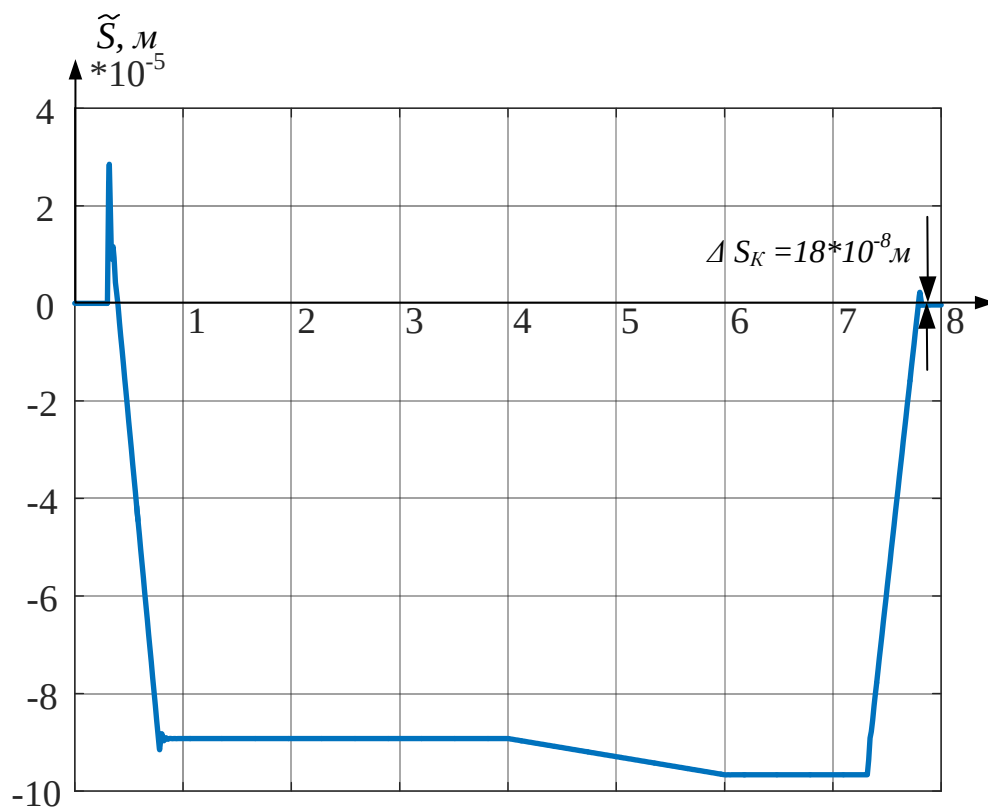


Рис. 3.72 Похибка відпрацювання переміщення робочого органу (спуск)

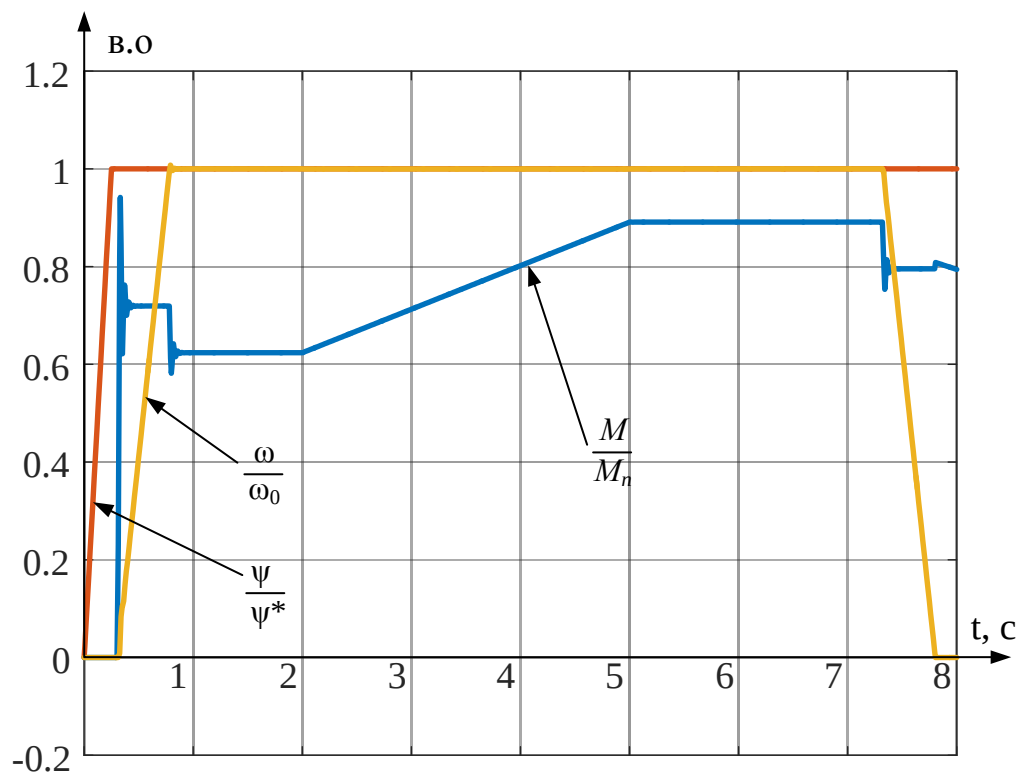


Рис. 3.73 Графіки перехідних процесів при векторному керуванні замкненому за положенням (підйом)

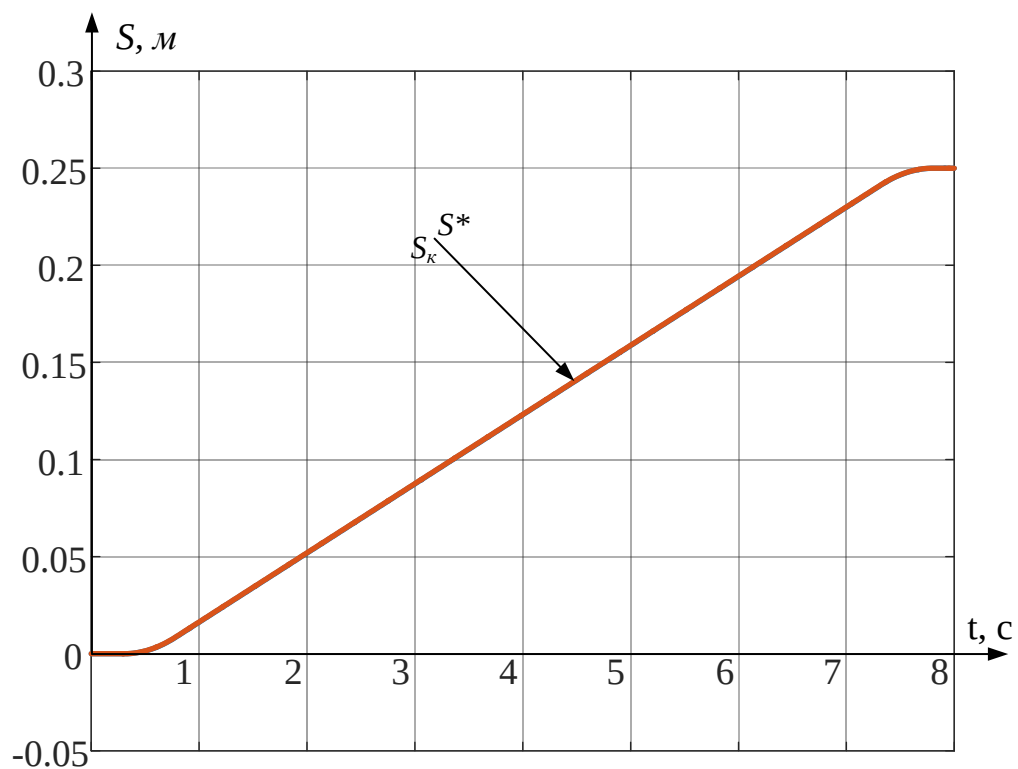


Рис. 3.74 Переміщення робочого органу (підйом)

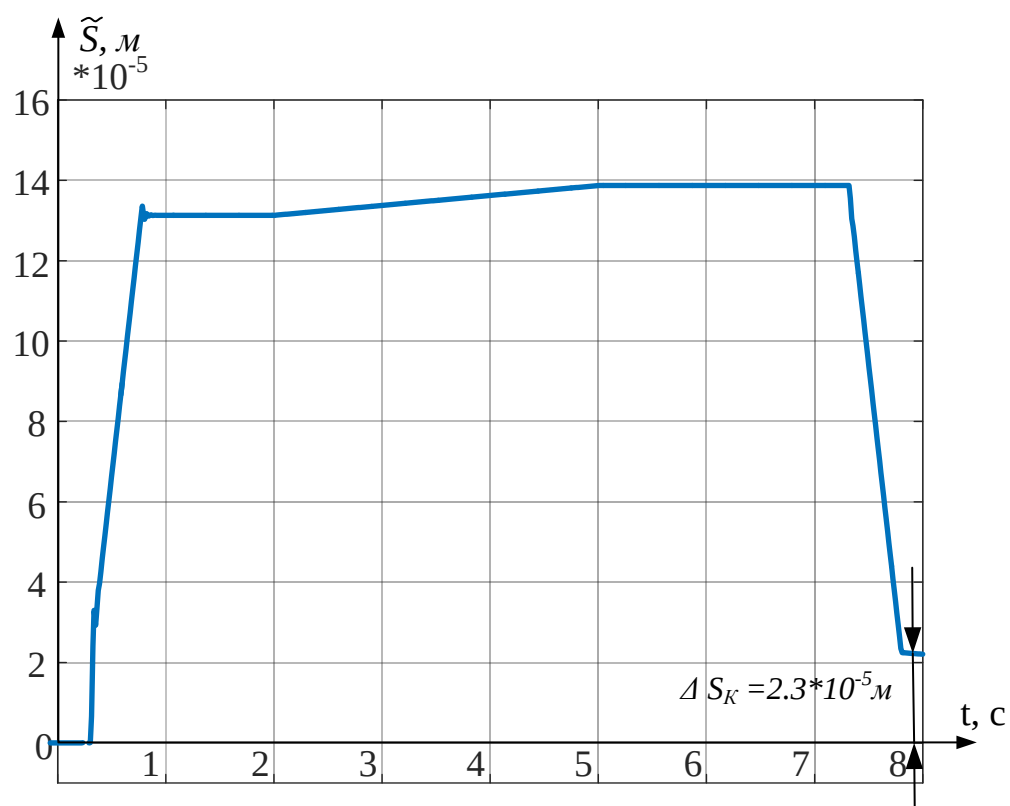


Рис. 3.75 Похибка відпрацювання переміщення робочого органу (підйом)

Як видно з отриманих результатів математичного моделювання, використання системи скалярного керування може задовольнити поставлені вимоги лише при операції піднімання технічної корзини, а при операції опускання електродвигун може витримати лише половину номінального навантаження, при навантаженні більше половини номінального система стає нестійкою. Ця проблема вирішується при використанні векторного керування, яке здатне забезпечити велику точність позиціонування, плавність опускання та піднімання технічної корзини, а також зберігати стійкість при номінальних навантаженнях.

3.3. Синтез системи керування позиційним електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора

Скористаємось моделлю вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, представленого в пункті 2.2, для синтезу системи керування.

Щоб система позиційного електроприводу відпрацьовувала без перерегулювання на великих, середніх та малих переміщеннях, в ній застосовують або нелінійний регулятор положення, або задаючий пристрій. Структурна схема одного з варіантів такого пристрою наведена на рис. 3.76, на якому позначені $\varphi_{зп}^*$, $\varphi_{зп}$ – завдання на усталене та поточне значення кутового положення, $\omega_{зп}^*$, $\omega_{зп}$ – завдання на усталене та поточне значення швидкості обертання двигуна, ε_0 – обмеження на прискорення.

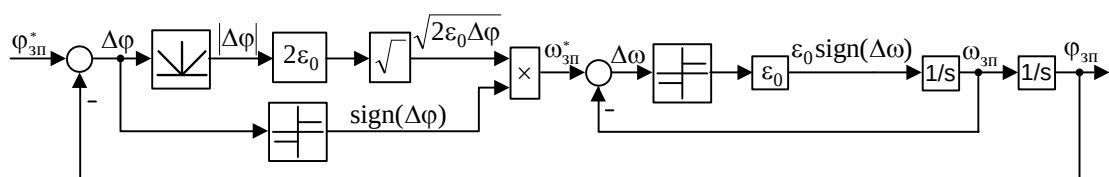


Рис. 3.76 Задаючий пристрій

Внутрішній контур задаючого пристрою (рис. 3.76) являє собою задатчик інтенсивності, призначенням якого є забезпечення зміни швидкості двигуна за лінійним законом. Принцип дії задаючого пристрою впливає з рівняння рівноприскореного руху. Відпрацювання заданого переміщення без перерегулювання

та дотягування досягається за рахунок правильного вибору моменту початку гальмування. В цей момент похибка положення $\Delta\varphi$ повинна бути такою, щоб при лінійному законі зміни швидкості положення механізму досягло заданого значення саме в ту мить, коли швидкість стане нульовою, тобто у момент початку гальмування повинно виконуватися рівняння $\Delta\varphi = \varphi_{зп}^* - \varphi_{зп} = \frac{\omega^2}{2\varepsilon_0}$, звідки отримуємо $\omega = \sqrt{2\varepsilon_0\Delta\varphi}$.

Враховуючи можливість зміни знаку розузгодження за положенням, остаточно маємо:

$$\omega_{зп}^* = \sqrt{2\varepsilon_0|\Delta\varphi|} \cdot \text{sign}(\Delta\varphi). \quad (3.1)$$

Перевага застосування задаючого пристрою полягає у спрощенні налаштування регуляторів та у можливості налаштування задатчика положення окремо від електроприводу. Враховуючи змінний характер моменту статичного опору та його активний характер, регулятор швидкості слід виконати пропорційно-інтегральним, а на його вході треба встановити фільтр у вигляді аперіодичної ланки. Перехідні процеси в такій системі показані на рис. 3.78. На рис. 3.79 наведено графік похибки позиціонування досліджуваних кранових механізмів, з якого видно, що динамічна похибка не перевищує 6 мм, а статична похибка відсутня. Шляхом математичного моделювання перевірено також працездатність системи при врахуванні нерівномірності розташування вантажу в кошику. Виявлено, що похибка позиціонування у випадку монотонної та повільної зміни Архімедового зусилля практично не відрізняється від похибки, зображеної на рис. 3.79.

Отже, система позиційного електроприводу відповідає усім вимогам, що ставляться до системи керування телескопічною колоною описаного вище краноманіпулятора. На інтервалі t_0-t_4 колона та кошик рухаються як єдине ціле; стикання кошика з дном ванни відбувається на нульовій швидкості, що запобігає розплескуванню дезактивуючого розчину; після паузи колона продовжує зниження на задану відстань, достатню для звільнення гачків.

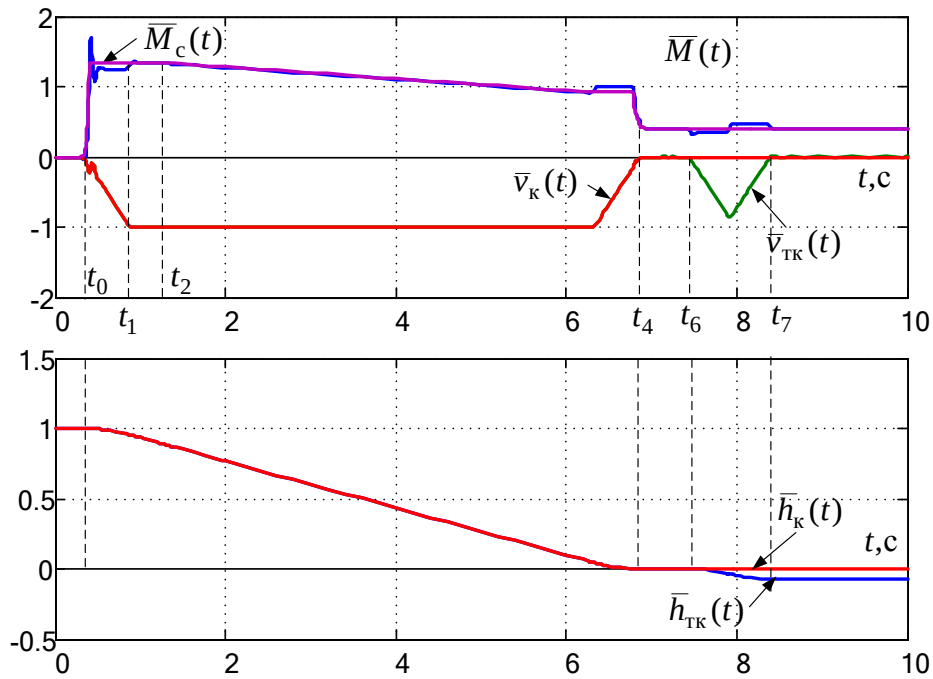


Рис. 3.78 Перехідні процеси

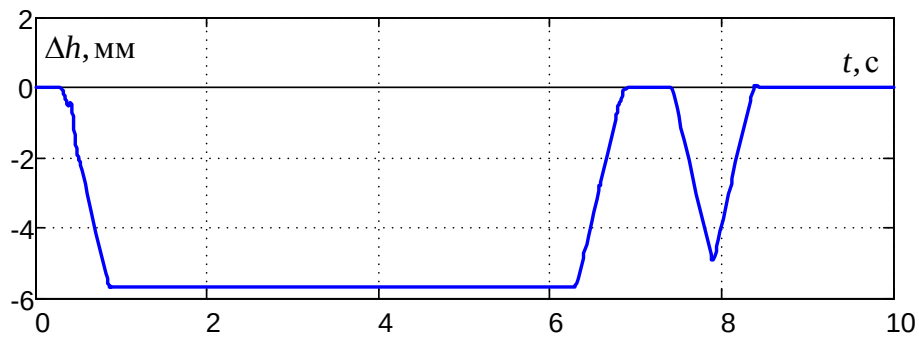


Рис. 3.79 Похибки відпрацювання

Висновки до розділу 3

1. При використанні системи скалярного керування спостерігається низька швидкодія систем, тобто перехідні процеси мають затягнутий характер, але в той же час точність позиціонування візка достатньо висока і лежить в межах допустимої похибки, а саме при завданні переміщення візка на 1 м, його переміщення склало 1.00018 м.

2. Отримані результати моделювання системи скалярного керування замкненої за положенням показали присутність різниці швидкостей двигунів при

розгоні візка, що може призвести до короткочасного пробуксовування однієї з пар коліс, що призводить до похибок переміщення.

Похибки переміщення візка при різних системах зведені до табл. 3.4

Таблиця 3.4

Похибки переміщення візка

Система керування	Величина похибки, м
Скалярна система керування	$\Delta S_B = 0.00018$
Стратегія «Master-Slave»	$\Delta S_B = 2.3 \cdot 10^{-5}$ м
Стратегія «Mean control»	$\Delta S_B = 2 \cdot 10^{-5}$ м
Система векторного керування без компенсації	$\Delta S_B = 1.6 \cdot 10^{-5}$ м
Система векторного керування з компенсацією	$\Delta S_B = 8 \cdot 10^{-6}$

3. Кращі результати для скалярної системи показали стратегії керування «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 склала $2.3 \cdot 10^{-5}$ м при допустимій 0.02м та при «Mean control» $2 \cdot 10^{-5}$ м, що є 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 є маловірогідним.

4. При використанні системи векторного керування та двох перетворювачів частоти отримано результати з похибками, при відсутності компенсації $1.6 \cdot 10^{-5}$ м, з компенсацією $8 \cdot 10^{-6}$ м, що свідчить про надзвичайно велику точність позиціонування, а також, з огляду на різницю швидкості двигунів, відсутність пробуксовування коліс.

5. З огляду на результати моделювання видно, що можливо досягти прийнятних результатів, для поставлених вимог за рахунок одного перетворювача частоти, але при цьому використовувати інші стратегії керування.

6. Розглянутий синтез задаючого пристрою дозволяє спростити налаштування регуляторів та дає можливості налаштування задатчика положення окремо від

електроприводу. Також виявлено, що нерівномірності розташування вантажу в кошику не впливають на якість керування системою.

7. Запропонований задаючий пристрій, пропорційно-інтегральним регулятором швидкості та лінійним пропорційним регулятором положення задовольняє вимогам технологічного процесу (а саме вимогам позиціонування) і може бути рекомендована для вантажопідйомних пристроїв кранів-маніпуляторів.

Посилання: [32-42] див. список використаних джерел стор. 160-165

РОЗДІЛ 4.

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА З ПОЗИЦІЮВАННЯМ ВАНТАЖУ

У розділі подані результати розробки автоматичної системи, один з компонентів котрого є кран-маніпулятор. На основі проведених випробувань зроблені висновки про використання системи автоматичного керування крана.

4.1. Автоматизована система керування електроприводами мостового крана-маніпулятора для установки дезактивації металів

Кран-маніпулятор працює в складі установки дезактивації металів (УДМ).

УДМ призначена для дезактивації поверхонь металів, від слабо фіксованих забруднень, окалини, нафтопродуктів і карбонатних відкладень до встановлених ОСПУ-2005 рівнів звільнення від регулюючого контролю, накопиченого металу та металу який надходить від всіх енергоблоків РАЕС.

УДМ дозволяє одержати високу якість очистки від слабо фіксованих радіоактивних забруднень, знизити дозові навантаження на персонал, мінімізувати кількість рідких відходів, що утворюються при дезактивації, знизити трудомісткість при проведенні робіт з дезактивації металу.

УДМ складається з наступних модулів: модуля електрохімічної дезактивації; модуля УЗД в кислому розчині; модуля проміжного ополіскування; модуля УЗД в лужному розчині; модуля ополіскування форсунками та сушіння; установки аерогідродинамічний обробки; модулів приготування і регенерації розчинів; модуля радіаційного контролю металу; модуля перевантаження металу з ТК в транспортний контейнер. А також, до складу УДМ входять ваги для зважування ТК з металом; КМ мостового типу; система автоматизованого керування технологічним процесом; КВП; система відеоспостереження.

Керування роботою УДМ може здійснюватися в автоматичному і ручному режимах.

Автоматичний режим роботи: є основним режимом роботи УДМ, і передбачає автоматичну роботу установки по заздалегідь заданому алгоритму, і з встановленими налаштуваннями технологічних параметрів за допомогою АРМ.

Ручний режим роботи: являється тестовим режимом роботи, і застосовується для окремого включення технологічних модулів та обладнання УДМ. Керування в ручному режимі може здійснюватися з АРМ або з переносної НМІ-панелі. Для керування краном-маніпулятором в ручному режимі використовується пульт дистанційного керування. В автоматичному режимі пульт дистанційного керування краном-маніпулятором не працює.

За допомогою навантажувача, транспортний контейнер з попередньо встановленою ТК (заповнений відсортованими і фрагментованими металевими відходами) переміщується з установки фрагментації та сортування на УДМ і встановлюється на місце прийому і видачі транспортного контейнера з ТК.

Персонал ділянки знімає кришку з транспортного контейнера і встановлює її на місце тимчасового зберігання. Після цього, за допомогою крана-маніпулятора, ТК з МРВ виймається з транспортного контейнера і підіймається на необхідну висоту. Далі персонал встановлює кришку на контейнер і викликає транспорт для передачі порожнього контейнера на установку фрагментації та сортування. При наявності на ділянці дезактивації ТК з радіоактивними відходами, які пройшли кілька разів повний цикл дезактивації, але не задовольняють нормам радіаційного контролю, як «чисті», таку корзину встановлюють в контейнер і відправляють на установку фрагментації та сортування для подальшої їх переробки. При наявності порожньої ТК на ділянці дезактивації, її встановлюють в транспортний контейнер і відправляють на установку фрагментації та сортування для завантаження нових партій МРВ для дезактивації.

Оператор УДМ обирає необхідний режим роботи, задає параметри технологічного процесу і включає лінію дезактивації в роботу. КМ переміщує ТК з МРВ на ваги, де відбувається зважування. Поточна вага буде відображатися на екрані АРМ у вікні «поточна вага». Оператор приймає рішення про продовження процесу

(натискає кнопку «продовжити процес» на екрані АРМ). Поточне значення ваги запам'ятовується у вікні «перед проц.». КМ підіймає ТК і переміщує до модуля МОФТС, опускає її і переходить до позиції очікування.

Після обробки в МОФТС оператор приймає рішення про продовження роботи і натискає кнопку «продовжити процес». КМ захватить ТК і перемістить до технологічного модуля. В залежності від обраних оператором процесів обробки КМ буде переміщати ТК з МРВ по цеху і опускати в ванни дезактивації.

Після підходу КМ з ТК до ванни, кришка ванни автоматично відкривається. КМ опускає ТК і підіймає захват на висоту переміщення по цеху. Кришка ванни закривається і запускається процес дезактивації. Після закінчення процесу дезактивації, модуль дезактивації відключається. Автоматично відкривається кришка ванни. КМ опускає захват і підіймає ТК на висоту очікування стікання розчину. Витримує ТК над ванною для забезпечення стоку дезактивуючий розчину. Для продовження процесу дезактивації оператор повинен натиснути кнопку «продовжити процес» на екрані АРМ. Процес очистки в модулях МЕД, МУЗД-КР, МУЗД-ЛР, МПО відбувається аналогічно.

Після проходження очистки в модулях, КМ знову перемістить ТК до МОФТС, опустить її і перейде до позиції очікування. Після повторної обробки в МОФТС, оператор приймає рішення про продовження роботи. КМ переходить з позиції очікування до МОФТС, забирає ТК, переміщує і ставить її на ваги для зважування. Після натиснення кнопки «продовжити процес» поточне значення ваги записується у вікно «після проц.» і КМ переміщує ТК до МПМ. Далі програмою здійснюється перевірка умов, що перекидач знаходиться у вихідному положенні і що захват відпущений. Якщо умови виконуються КМ ставить ТК на перекидач і підіймається на висоту переміщення по цеху. *Автоматичний режим роботи завершено.* Якщо хоча б одна з умов не виконується, оператор повинен за допомогою кнопок на екрані АРМ або пульта ручного керування, який знаходиться біля МПМ, повернути перекидач у вихідне положення і відпустити захват. Після цього натиснути кнопку «продовжити процес».

Розвантаження ТК відбувається в ручному режимі за допомогою кнопок на екрані АРМ або пульті керування. Очищені металеві відходи перевантажуються в контейнер, який заздалегідь повинен бути встановлений біля МПМ.

Очищені металеві відходи переміщують на позицію СРК де визначається рівень радіоактивного забруднення. При необхідності металеві відходи відправляють на ручну обробку в МАГДО або на повторний цикл дезактивації.

На рис. 4.1 показано схему розміщення обладнання УДМ в приміщенні, розміщення кнопок аварійної зупинки УДМ, а також точки підключення переносної НМІ-панелі.

МЕД призначений для видалення міцно-фіксованих радіоактивних забруднень. Модуль використовується, коли застосування методів хімічної дезактивації з ультразвукової дезактивацією виявляється недостатнім. У модулі електрохімічної дезактивації, поверхня МРВ піддається електрохімічному травленню під впливом постійного струму. Поверхня МРВ служить анодом і з неї видаляється поверхневий шар разом з радіоактивними забрудненнями. В якості електроліту можуть застосовуватися водні розчини Na_2SO_4 або NaCl з концентрацією 5-10%.

Модуль складається з ванни, допоміжної (буферної) ємності, системи труб і арматури, насоса, фільтрів грубого очищення першого і другого ступенів, випрямляча FLEXKRAFT[49]. Ванна обладнана переливною кишенею, системою вентиляції, кришкою з актуатором, тепло - і звукоізоляцією. У ванні встановлені електроди, струмопідвід для електродів, датчик верхнього рівня, кінцеві датчики положення кришки (відкрито-закрито).

Модуль виконаний у вигляді ванни і зовнішньої стінки відстань між якими заповнено теплоізоляцією. Кришка ванни має механічний привід з дистанційним керуванням. Переливна кишеня призначена для підтримки постійного рівня рідини у ванні і для зливу надлишку рідини при зануренні ТК з МРВ в ванну модуля. Допоміжна (буферна) ємність має патрубки прийому і видачі електроліту, датчик верхнього та нижнього рівня. Для перекачування розчину з буферної ємності використовується насос.

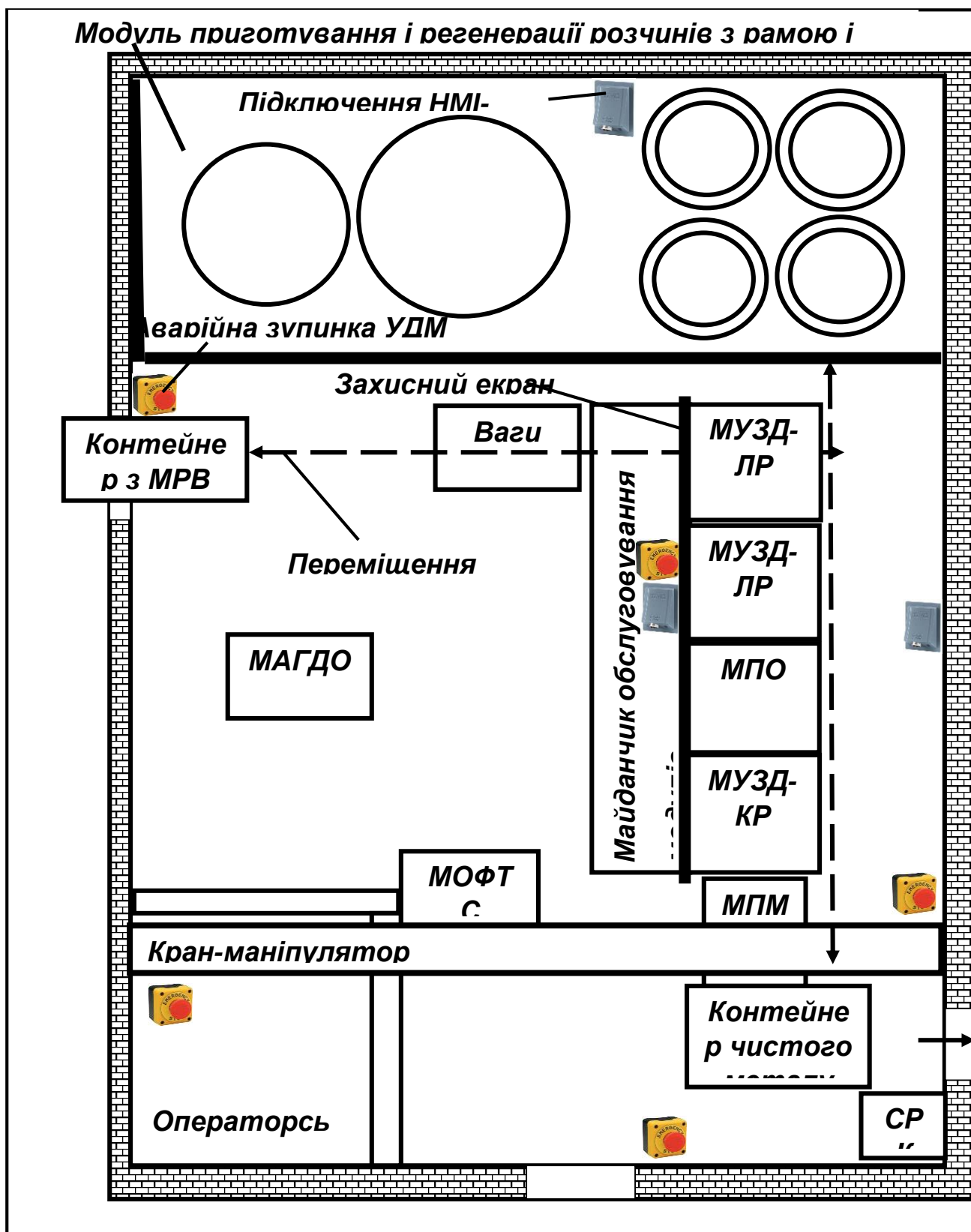


Рис. 4.1 Схема розміщення обладнання УДМ

Керуюча арматура має механічний і ручний привід. Керування модулем електрохімічної дезактивації в ручному або автоматичному режимі здійснюється

оператором з АРМ. Електроживлення модуля електрохімічної дезактивації здійснюється від ШУ ТМ. Короткі технічні характеристики: щільність постійного струму 10 - 20 А / дм²; встановлена потужність – не більше 40 кВт; обсяг електроліту у ванні – не більше 2,4 м³; маса МРО – не більше 400 кг.

В процесі електрохімічної дезактивації можливе виділення водню. Тому в системі вентиляції модуля встановлено датчик горючих газів ДТХ-127-5. Вторинний прилад датчика (Сигналізатор горючих газів і парів «ЩИТ-2») встановлено біля ШУ КМ. При перевищенні концентрації горючих газів (водню) пристрій «ЩИТ-2» через релейні виходи подає сигнали на ШУ ТМ. «ЩИТ-2» фіксує 2 рівні концентрації горючих газів. При перевищенні першого рівня він видає попереджувальний сигнал, (на екрані АРМ з'являється попередження «Увага водень!»). При перевищенні другого рівня «ЩИТ-2» дає сигнал на відключення живлення випрямляча FLEXKRAFT.

Модулі ультразвукової дезактивації в кислому, лужному розчинах і проміжного ополіскування.

Модуль ультразвукової дезактивації в кислому розчині призначений для дезактивації МРВ рідинним методом у водному 5-10% розчині HNO₃, при необхідній температурі (60°C), із застосуванням процесу дезактивації. Модуль УЗД в лужному розчині призначений для дезактивації у водному 5-10% розчині NaOH. Ультразвукові випромінювачі створюють в дезактивуючому розчині інтенсивне ультразвукове поле, яке призводить до виникнення кавітації і акустичних течій в об'ємі розчину і ефектів розтягування/стиснення поверхневих шарів металу і оксидних плівок. В результаті такого впливу і одночасного хімічного розчинення, поверхня МРВ ефективно очищається.

Модуль проміжного ополіскування призначений для інтенсивного ополіскування радіоактивних металевих відходів у воді, при певній температурі (60°C), із застосуванням УЗД, який повністю подібний процесу ультразвукової дезактивації в кислому і лужному розчинах.

Модуль ультразвукової дезактивації в кислому розчині складається з ванни, допоміжної (буферної) ємності, системи труб і арматури (див. Технологічну схему і

специфікацію установки дезактивації металу), фільтрів грубого очищення першого і другого ступенів.

Модуль ультразвукової дезактивації в лужному розчині складається з ванни, допоміжної (буферної) ємності, системи труб і арматури (див. Технологічну схему і специфікацію установки дезактивації металу, фільтрів грубого очищення першого і другого ступенів).

Модуль проміжного ополіскування складається з ванни, допоміжної (буферної) ємності, системи труб і арматури (див. Технологічну схему і специфікацію установки дезактивації металу), фільтрів грубого очищення першого і другого ступенів.

Ванни модулів обладнані переливною кишенею, системою вентиляції, кришкою, тепло – і звукоізоляцією. У ваннах встановлені ультразвукові випромінювачі (по 8 випромінювачів у ванні), система подачі дезактивууючого розчину, датчики верхнього рівня і температури дезактивууючого розчину, pH-метри, кінцеві датчики положення кришки (відкрито-закрито), рамка для встановлення ТК. Тени розташовані на зовнішній стінці ванни.

Кришка ванни має механічний привід з дистанційним керуванням. Переливна кишеня призначена для підтримки постійного рівня розчину у ванні і для зливу надлишку розчину при зануренні ТК з МРВ у ванну. Стоки з переливної кишені надходять у допоміжну ємність. Допоміжна (буферна) ємність має патрубки прийому і видачі дезактивууючого розчину, а також датчик нижнього рівня. Електроприводна арматура має механічний і ручний привід (див. Технологічну схему установки дезактивації металу).

Керування модулями ультразвукової дезактивації в кислому, лужному розчинах і проміжного ополіскування в ручному або автоматичному режимі здійснюється оператором з АРМ або з переносної НМІ-панелі. Електроживлення модулів здійснюється від шафи керування модулями. Електроживлення ультразвукових генераторів модулів здійснюється від шаф керування ультразвуковими генераторами. Короткі технічні характеристики: потужність ТЕНів

– 24 кВт; встановлена потужність – не більше 35 кВт; обсяг миючого розчину в ванні – не більше 2,0 м³; маса МРВ – не більше 400 кг.

МППР призначений для приготування нових і регенерації використовуваних розчинів, а також для нейтралізації відпрацьованих розчинів. Приготування нового (свіжого) розчину може проводитися в двох режимах: приготування розчину перед початком роботи (готується кількість розчину необхідна для заповнення ємностей); приготування розчину під час роботи. Регенерація (очищення) розчинів від механічних забруднень, нафтопродуктів і радіонуклідів проводиться в режимі циркуляції. Механічні забруднення повинні зливатися у вигляді шламу (вологістю 98-99%) в спеціальну каналізацію. Радіонукліди сорбуються мінеральним сорбентом.

Установка приготування та регенерації розчинів складається з чотирьох ємностей приготування свіжого розчину: HNO₃, NaOH; п'яти ємностей регенерації розчинів і води: Na₂SO₄, HNO₃, NaOH, H₂O і ємність нейтралізації відпрацьованих розчинів.

У ємностях приготування свіжих розчинів азотної кислоти HNO₃ та гідроксиду натрію NaOH встановлені поплавкові датчики рівня (Овен, ПДУ-У.1000), а також датчики нижнього рівня. У ємностях зберігання реагентів встановлені датчики нижнього та верхнього рівнів, в ємностях – ультразвукові датчики рівня (prosonic). У ємностях для регенованих рідин встановлені датчики нижнього та верхнього рівнів. Ємність для промивки дренажних насосів обладнана датчиками нижнього та верхнього рівнів, ємність нейтралізації відпрацьованих розчинів обладнана датчиками нижнього, середнього та верхнього рівнів, а також рН-метром.

ТК для транспортування металевих радіоактивних відходів являє собою зварену конструкцію з нержавіючої сталі, яка складається з труб квадратного перерізу пов'язаних між собою квадратним профілем. Зверху ТК відкрита, має чотири виступаючих на 100 мм кінця квадратних труб, в яких прорізані зверху чотири паза 60x30 мм для взаємодії з автоматичним захватом, маса корзини 120 кг.

Контейнер транспортний являє собою контейнер і кришку виконані з нержавіючої листової сталі, які з'єднуються, під час транспортування на ділянку дезактивації, болтами. Знизу контейнер має гнутий П-подібний профіль для

захоплення лапами навантажувача, а кришка має посилення з П-подібного профілю, в яких прорізані 4 паза 60x30 мм для взаємодії зі спеціалізованим автооператором, маса контейнера 261 кг. Контейнер для дезактивованих відходів являє собою зварну конструкцію з нержавіючої листової сталі, відкритий зверху, а знизу має гнутий П-подібний профіль для лап навантажувача, і з боків отвори для стропування, маса контейнера 315 кг.

МПМ представляє собою перекидач («кантователь») призначений для повороту на 180 градусів ТК з очищеними металевими відходами, і їх перевантаження в контейнер для чистого металу, рис. 4.2.

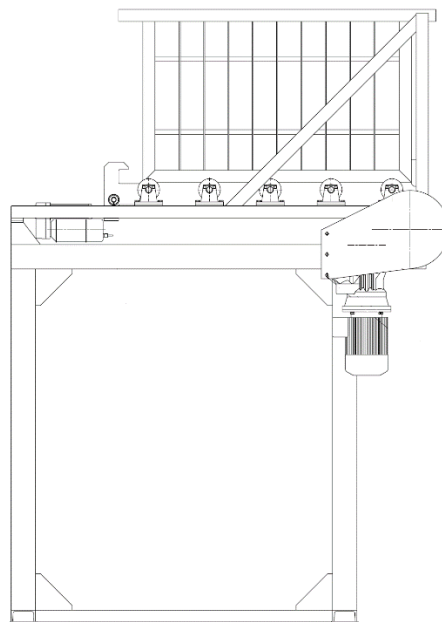


Рис. 4.2 Загальний вид МПМ

Конструктивно МПМ складається з нерухомої рами, яка кріпиться до підлоги анкерними болтами і поворотної рами з нержавіючого металу, на яку встановлюється ТК. На рухомій рамі змонтовані неприводний рольганг, по якому переміщується ТК і каретка з двома штовхачами (для кінцевих положень кошика), які приводяться в рух актуатором.

ТК опускається на рольганг рухомої рами (каретка при цьому знаходиться в крайньому положенні). Далі ТК з очищеними МРВ переміщається актуатором в місце

її фіксації Г-подібними захопленнями. Після фіксації ТК приводиться в дію мотор-редуктор, що обертає зубчасту передачу. Рама перекидача, разом з ТК, актуатором і рольгангом перекидається по осі зубчастого колеса. МРВ з кошика висипаються в контейнер для чистого металу. При обертанні редуктора в зворотному напрямку, рама з порожньою корзиною встановлюється в початкове положення. Каретка актуатора переміщує порожню корзину в початкове положення, звільняючи нижню її частину від рухомого і нерухомого Г-подібних захоплень.

Автоматизоване робоче місце є головним пунктом керування технологічним процесом УДМ. З автоматизованого робочого місця оператор може вести керування в автоматичному і ручному режимах.

Автоматизоване робоче місце являє собою робочу станцію (системний блок), монітор, клавіатуру, мишку. Також до складу входить повністю ідентична резервна робоча станція, яка призначена для заміни робочого системного блоку, при виході його з ладу.

Обмін інформацією між контролерами, АРМ і панеллю оператора здійснюється по мережі Industrial Ethernet, з протоколом PROFINET [50]. Організація мережі Industrial Ethernet здійснюється через мережеві комутатори (світчі), SCALANCE XB208 [51] фірми SIEMENS. Один комутатор встановлений в ШУ модулем приготування і регенерації розчинів. До нього підключені ПЛК шаф керування, головний ПЛК, АРМ, ПК верхнього рівня та другий комутатор. До другого комутатора підключені 3 з'єднувальні коробки для переносної НМІ-панелі. Одна з яких розміщена на захисному екрані, друга – біля МПО, третя – біля МПТРР (див. Рис. 4.1). На рис. 4.3 приведена функціональна схема автоматичного керування технологічним процесом УДМ.

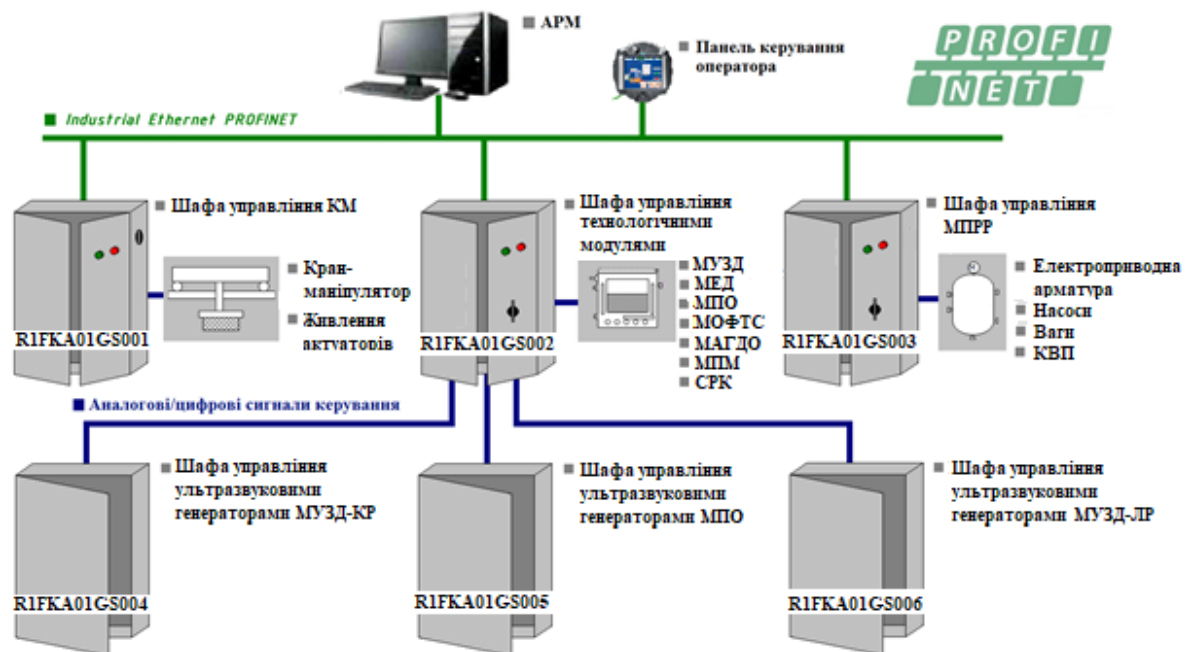


Рис. 4.3 Функціональна схема АСУ-ТП УДМ

Робочі станції (основна і резервна) організовані на базі персональних комп'ютерів Система людино-машинного інтерфейсу (HMI) SIMATIC WinCC Runtime Advanced V14 SP1 фірми SIEMENS [52], призначена для візуалізації і керування технологічним процесом;

Головна логіка роботи УДМ забезпечується програмованими логічними контролерами, які розташовані в шафах керування краном маніпулятором, технологічними модулями, МПРР. Головний ПЛК, з якого здійснюється керування технологічним процесом знаходиться в ШУ МПРР.

Система керування виконана на базі ПЛК SIEMENS SIMATIC S7-1200[53] і додаткових модулів:

- CPU1214C – центральний процесор;
- SM1221 – модуль дискретних входів;
- SM1222 – модуль дискретних виходів;
- SM1223 – модуль дискретних входів/виходів;
- SM1231 – модуль аналогових входів;
- SM1232 – модуль аналогових виходів;

- CM1241 – комунікаційний модуль RS 485[54], що забезпечує передачу даних між ПЛК і зовнішніми пристроями по протоколу Modbus.

Основна конструкція КМ являє собою двобалочний мостовий кран, на рамі якого розміщені вантажний візок і привід переміщення моста. Рама змонтована на чотирьох дворобордними колесах. Одна пара коліс є приводною. Механізм підйому вантажу – телескопічна колона. Телескопічна колона з вантажно-захоплюючим пристроєм, що обертається навколо своєї осі на 360° , дозволяє жорстко фіксувати ТК з МРВ. Габаритне креслення крана представлено на рис. 4.4

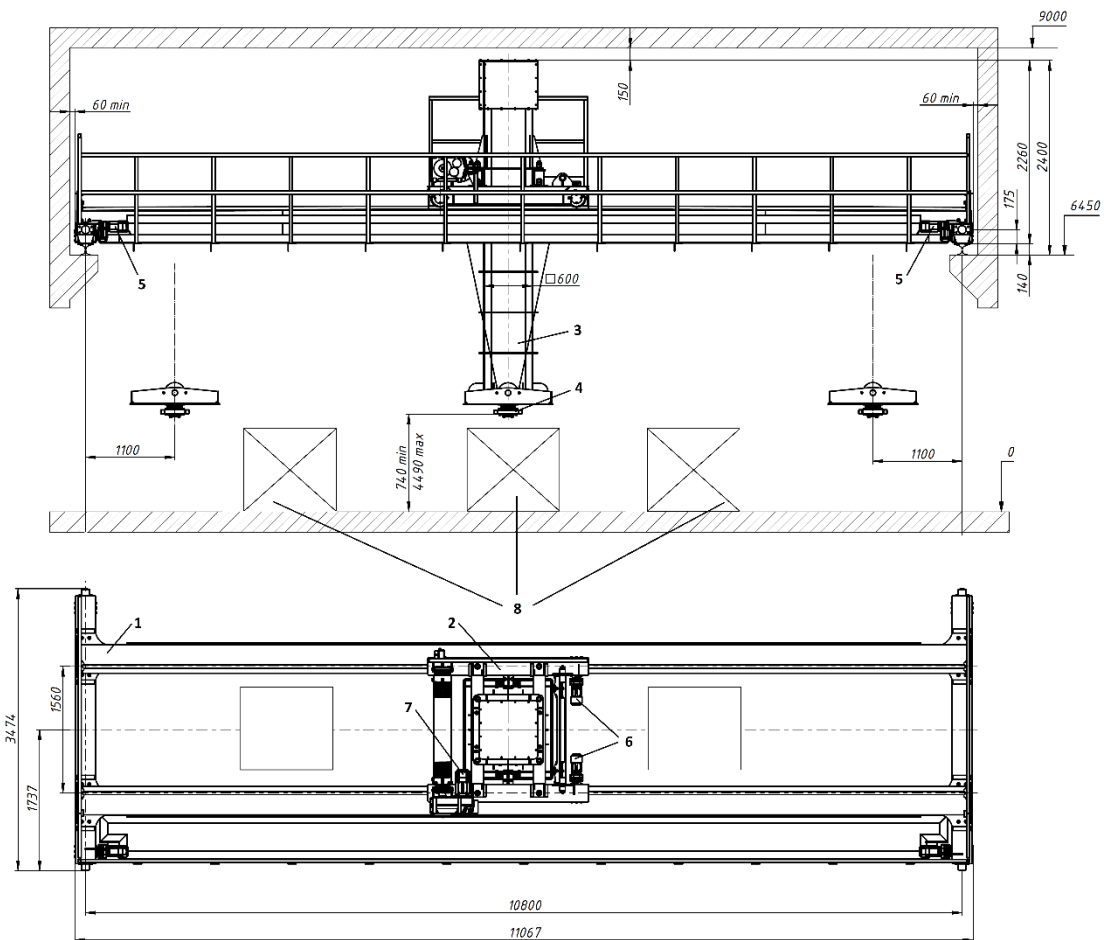


Рис. 4.4 Габаритне креслення крана-маніпулятора

1 – міст; 2 – візок; 3 – телескопічна колона; 4 – захват; 5 – електроприводи (ЕП) пересування моста; 6 – ЕП пересування візка; 7 – ЕП підйому колони; 8 – схематично вказані модулі дезактивації

Електромеханічна система крана-маніпулятора має наступні характеристики подані в таблиці 4.1.

Характеристики крана-маніпулятора

Вага вантажу	2т
Вага крана	6,1 т
Довжина прольоту	10,8 м
Висота підйому вантажу	6 м
Швидкість переміщення візка крана	2 м/хв
Швидкість переміщення крана	12 м/хв
Потужність двигуна переміщення крана	0,75 кВт
Потужність двигуна переміщення візка	0,25 кВт
Потужність двигуна піднімального пристрою	1,75 кВт
Точність позиціонування	0,02 м

Мост і візок приводять в рух по два електродвигуна з редукторами. Підйом і опускання колони виконує електропривод підйому/опускання. Контроль положення моста, візка і колони здійснюється за допомогою вимірювальної системи компанії Kubler[55], яка представляє собою основу з встановленим на ній абсолютним енкодером зі шківом і натяжним колесом, Рис. 4.5. Для передачі руху використовується зубчатий легкоходовий ремінь, який натягнутий вздовж ходу моста, візка та колони КМ.



Рис. 4.5 Загальний вид системи вимірювання положення

Електроприводи механізмів представляють собою асинхронні електродвигуни з редукторами, які живляться від частотних перетворювачів. Огляд частотних перетворювачів приведений в Додатку Ж. Частотні перетворювачі, знаходяться в ШУ краном-маніпулятором, забезпечують відпрацювання заданого сигналу керування, виконання операції із заданою швидкістю та прискоренням, обробку сигналів з енкодерів і подальшу передачу інформації по протоколу Modbus RTU[56] на ПЛК. Функціональна схема АСУ краном-маніпулятором представлена на рис. 4.6.

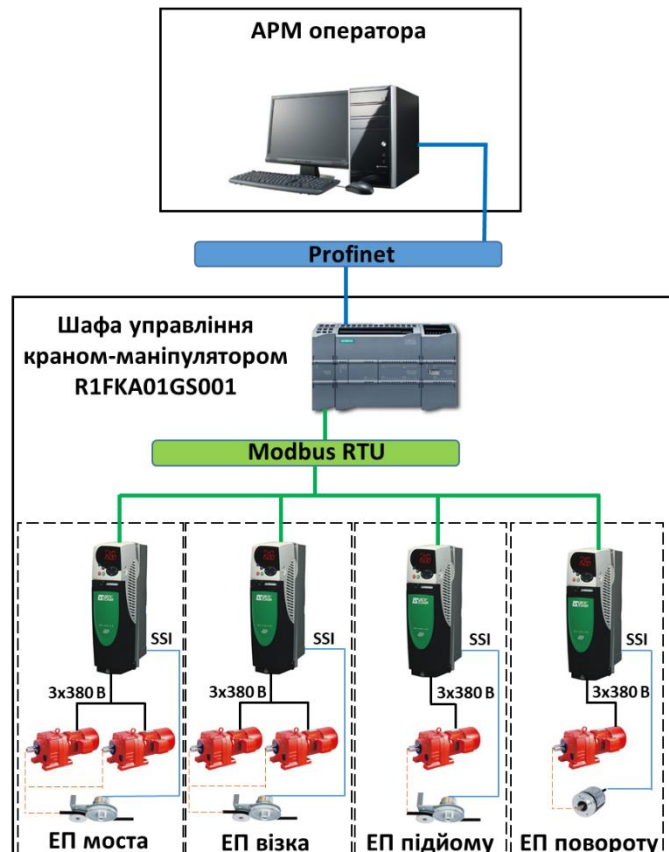


Рис. 4.6 Функціональна схема АСУ краном-маніпулятором

Для фіксації ТК з МРВ на колоні КМ встановлено захват, Рис. 4.7. Він являє собою металеву конструкцію з встановленими на ній чотирма фіксаторами, які приводяться в рух актуаторами. Для контролю положень на кожному фіксаторі встановлені по 2 індуктивних кінцевих датчика.

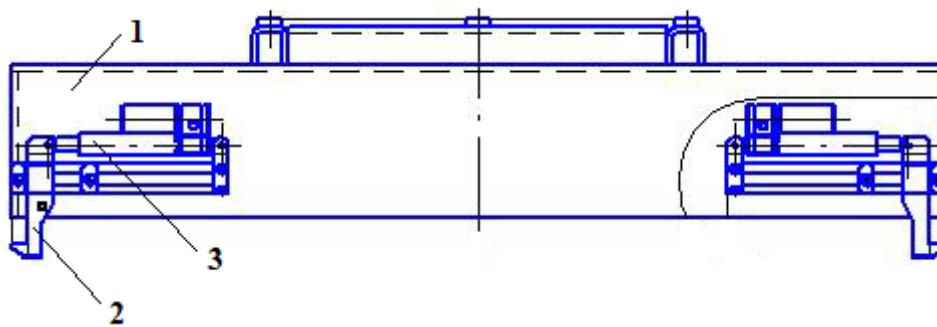


Рис. 4.7 Загальний вид захвату КМ

1 – металева рама захвату; 2 – фіксатори; 3 – актуатори;

Компоненти контрольно вимірювальних приладів включають в себе: датчики температури, датчики рівня, рН-метри, ваги, енкодери.

Для контролю температури в модулях МУЗД-КР, МУЗД-ЛР, МПО встановлені термоперетворювачі опору (ТЕРА ТСМ1-3). Вони підключені до індикаторів (МИКРА ИЗ), які встановлені на захисному екрані. Індикатори, разом з випрямлячем (FLEXKRAFT) для електрохімії, об'єднанні в мережу RS485. Обмін даних з ПЛК відбувається по протоколу Modbus RTU. На випрямляч FLEXKRAFT з АРМ передаються значення заданої напруги та струму, і отримуються фактичні значення напруги та струму.

Задання потужності ультразвукових генераторів відбувається через струмову петлю 4-20мА, 4мА відповідає 40% потужності УЗГ, 20мА – 100%.

На рис. 4.8 представлено функціональну схему передачі даних між КВП і ПЛК в шафі керування технологічними модулями.

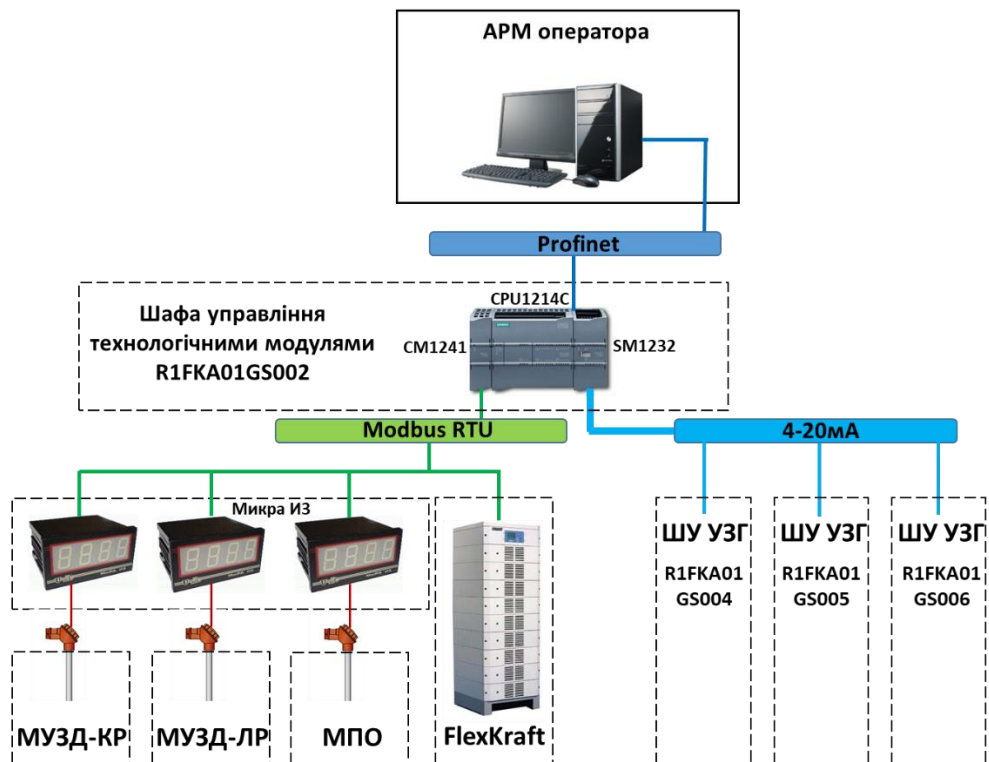


Рис. 4.8 Функціональна схема передачі даних між КВП і ПЛК (ШУ ТМ)

Для вимірювання кислотності (pH) в модулях МУЗД-КР, МУЗД-ЛР, МПО встановлені рН-метри. Вторинні прилади (індикатори) рН-метрів встановлені на захисному екрані. Крім того, рівень рН вимірюється в ємності нейтралізації відпрацьованих розчинів. Вторинний прилад встановлений в монтажній коробці біля ємності. Значення рН передаються до ПЛК через струмову петлю: 4-20 мА, 4мА – відповідає мінімальному значенню рН, 20мА – максимальному.

Для зважування ТК з МРВ використовуються промислові платформні ваги РВ торгової марки «Днепровес»[57] з інтерфейсом RS 232[58]. Для перетворення інтерфейсу RS 232 в RS 485 використовується промисловий перетворювач сигналів ADAM 4520[59]. Нас рис. 4.9 представлено функціональну схему передачі даних між КВП і ПЛК в ШУ МПРР.

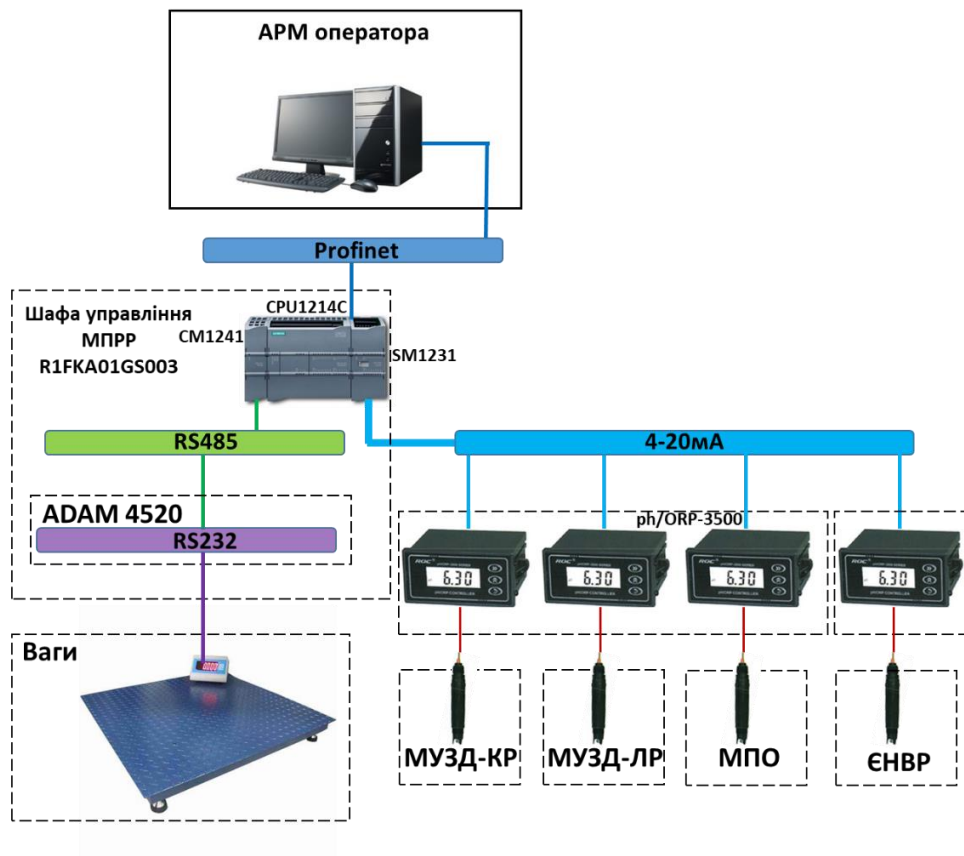


Рис. 4.9 Функціональна схема передачі даних між КВП і ПЛК (ШУ МПРР)

На Рис. 4.10 представлений цех по дезактивації металів.

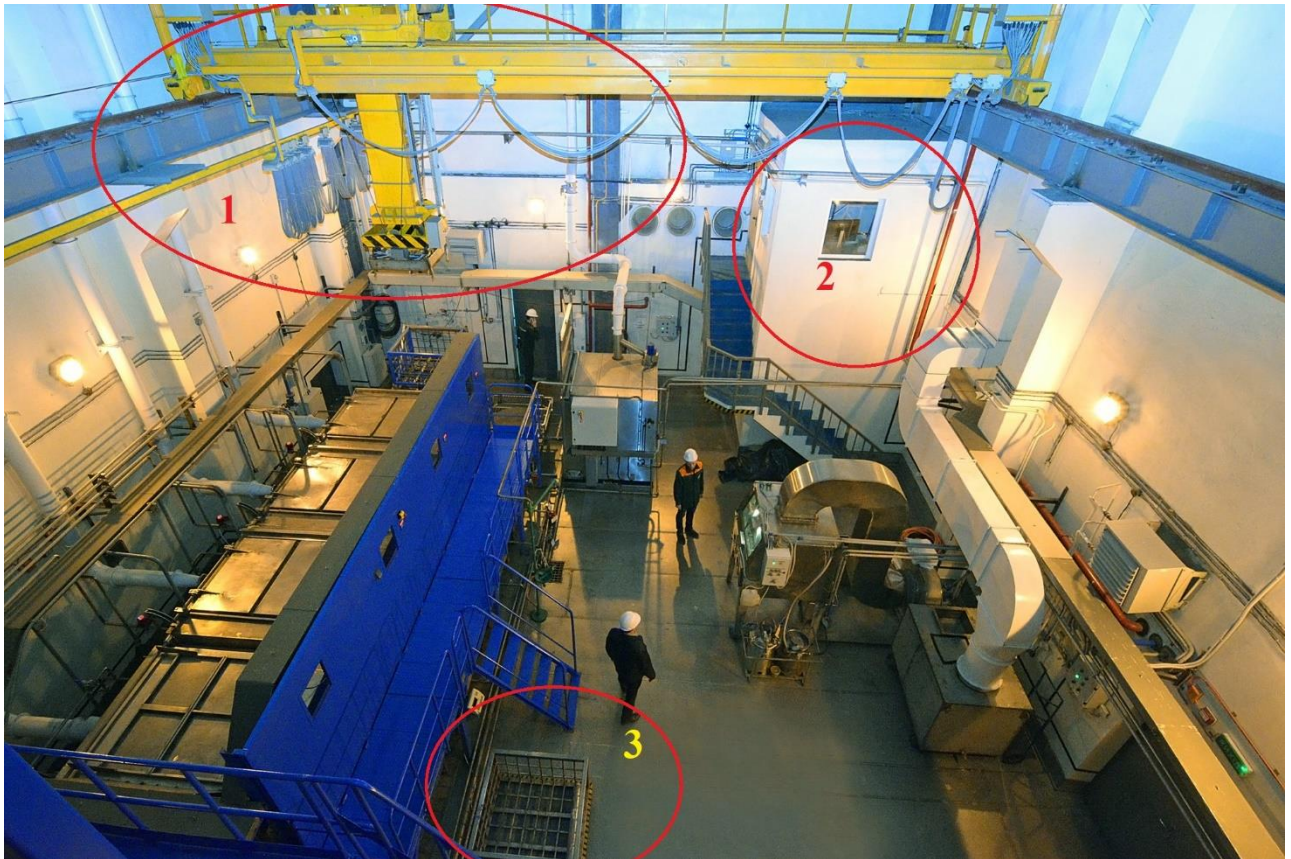


Рис. 4.10 Цех установки дезактивації металів

1 – КМ; 2 – місце розташування оператора АСУ-ТП; 3 – стіл прийому-видачі МРВ з корзиною

4.2. Опис системи керування УДМ

Система керування представлена в вигляді трьох взаємозв'язаних блоків на рис. 4.11, що являє собою трирівнева АСК-ТП.



Рис. 4.11. Система керування

Вона складається з устаткування УДМ (давачі, ПЛК), рівня вводу-виводу (польовий), який передає інформацію на головний ПЛК з програмою дезактивації.

Головний ПЛК (рівень автоматичного керування) керує устаткуванням, а також отримує данні керування з АРМ оператора (верхній/операторський рівень). Також данні з устаткування відображаються на АРМ оператора. Дані між блоками передаються, як було вище зазначено, через Profinet.

На головний ПЛК покладена функціональність з перевірки справності устаткувань, виконання головного алгоритму дезактивації, обробки помилок системи. Алгоритм роботи представлено на рис. 4.12.

При перевірці системи головний ПЛК проводить власне тестування і тестування блоків розширення які до нього приєднані. Якщо виявлені помилки згенерується відповідне повідомлення з кодом для аналізу оператору. Також проводиться оновлення інформації з іншого устаткування. Алгоритм дезактивації виконується в пункті «Робота установки дезактивації метала в час зміни». Після подання команди на завершення зміни виконується закінчення всіх поточних робочих циклів, переміщення крана на позицію ТК, злив відпрацьованих розчинів, якщо це потребується, закриття всіх кранів та відключення насосів, а також відключення всіх модулів і систем. В алгоритмі роботи закладено спілкування з оператором, при якому оператор приймає рішення про виконання наступного кроку алгоритму.

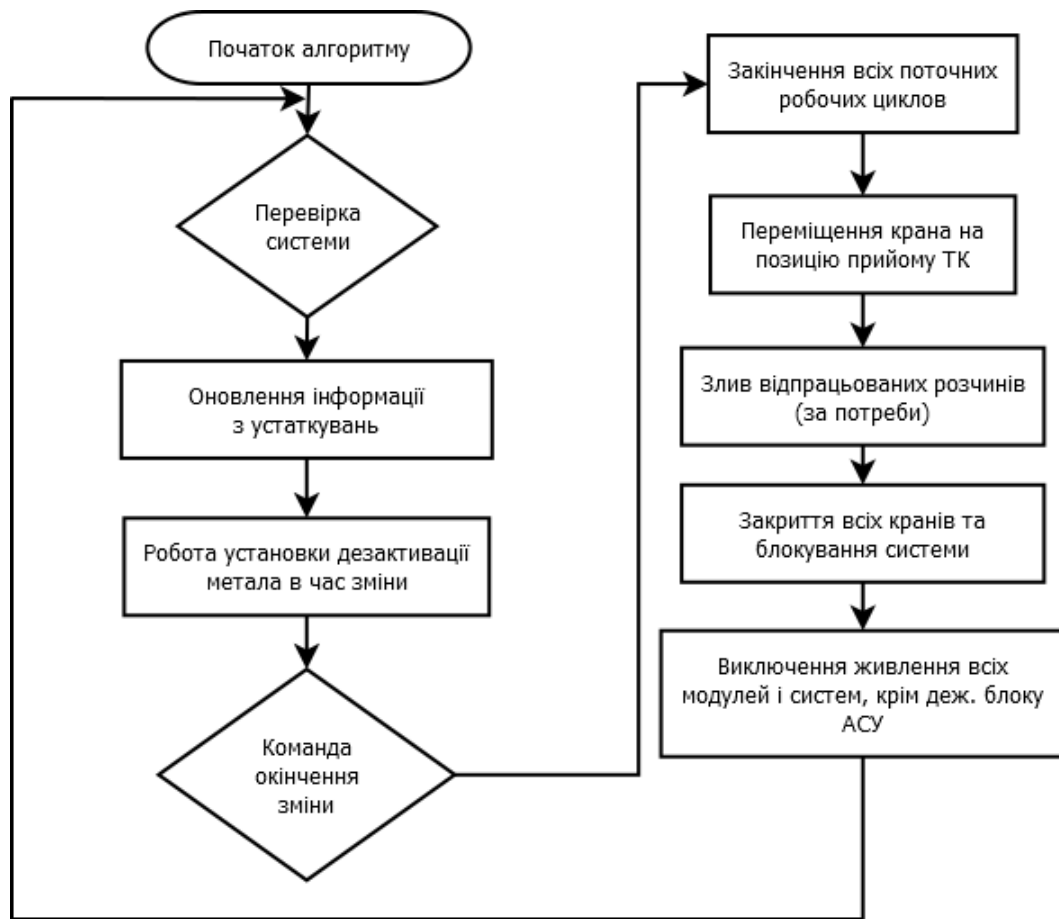


Рис. 4.12 Головний алгоритм УДМ

Робота установки дезактивації представляє собою послідовне виконання операцій, між початком і кінцем підпрограми. Цей перелік команд подані в Додатку Д. Умова виходу виконується якщо є аварійна зупинка персоналом, пауза, чи аварія обладнання.

Було розроблено алгоритм переміщення крана-маніпулятора для програмно логічного контролера Siemens S7-1200. Контролер крана отримує команду від головного контролера по мережі для переміщення до потрібної точки цеху. По мережі Modbus ПЛК моста отримує інформацію про стан привода. На основі отриманих даних визначається положення крана. ПЛК крана подає команди керування на привод крана для переміщення до заданої точки простору, при цьому слідкує за положенням. При приближенні до заданої точки простору подає команди для зміни швидкості по розрахованій траєкторії. Блок схема головного алгоритму представлена на Рис. 4.13.

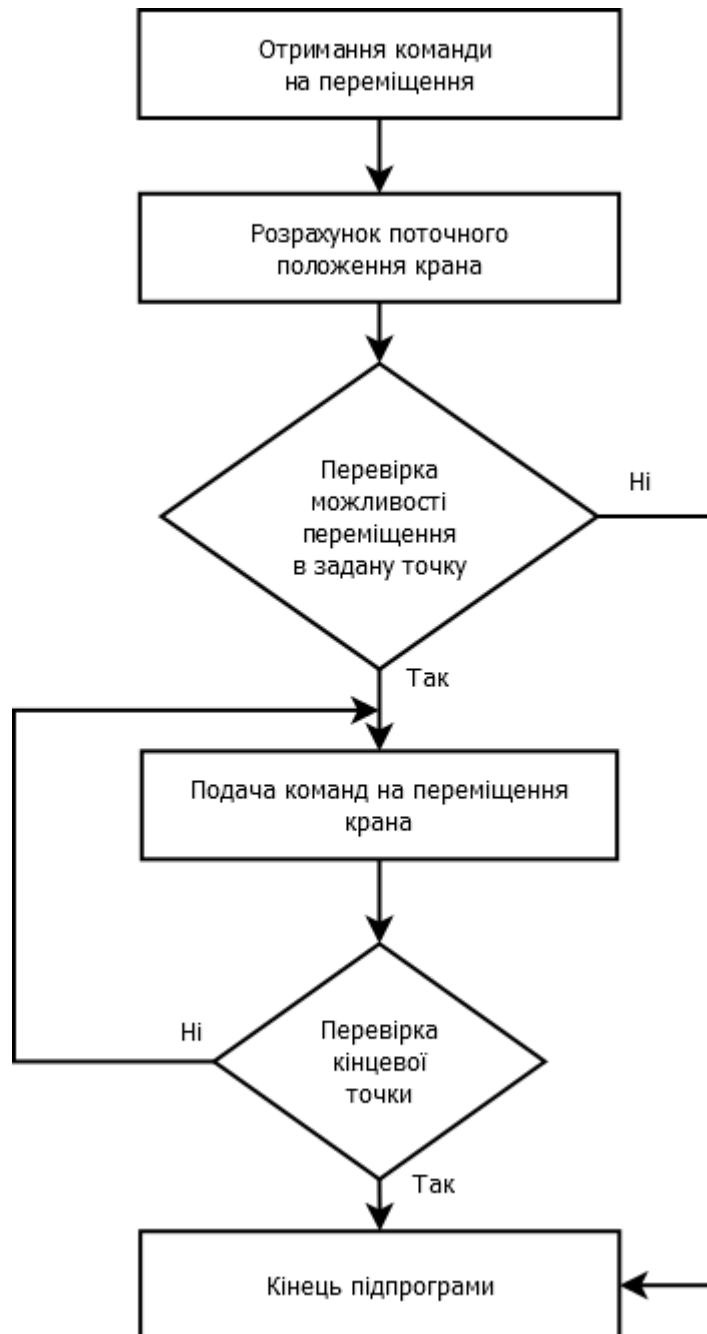


Рис. 4.13 Підпрограма керування крана

4.3. Розробка відеокадрів керування цехом та електроприводами крана-маніпулятора з позиціюванням вантажу

На Рис. 4.14 показано відеокадр яким користується оператор для налаштування автоматичного режиму роботи, та слідкування за процесом.

За допомогою випадного списку біла надпису «Програма дезактивації №» виконується вибір програми дезактивації.

Вікна які розташовані на цьому відеокадрі мають наступні функції.

- **Налаштування:** За допомогою кнопок «Так» «Ні» в стовбці «Вибір» виконується вибір потрібного етапу обробки, кнопки підсвічуються при виборі. Для вводу параметрів треба обрати мишею потрібне вікно, та за допомогою клавіатури ввести нове значення. Після вводу нового значення потрібно натиснути «Enter» на клавіатурі комп'ютера, щоб нове значення було прийнято. Збереження програми дезактивації відбувається при натисканні клавіши «Зберегти програму».

Скриншот інтерфейсу програми дезактивації № 0. Інтерфейс складається з кількох панелей:

- Налаштування:** Таблиця для вибору об'єкта та параметрів.

Об'єкт	Вибір	Температура, C°	Потужність УЗ, %	Час, хв
Луг	Так Ні	00	000	0000
Кислота	Так Ні	00	000	0000
Електрохімія	Так Ні	Струм, А	Напруга, В	Час, хв
		0000	0.000	0000
Вода		Температура, C°	Потужність УЗ, %	Час, хв
		00	000	0000
- Показники:** Таблиця для моніторингу параметрів.

pH	Температура, C°	Потужність УЗ, %	Розчин
0.0	00.0	000	Відсутній
0.0	00.0	000	Відсутній
Струм, А		Напруга, В	Водень
0000		0.000	ПОРОГ 1
pH	Температура, C°	Потужність УЗ, %	
0.0	00.0	000	
Поточна		Перед проц.	Після проц.
Вага		0000	0000
- Автоматичний процес:** Кнопки «Старт» (сіра) та «Стоп» (червона). Нижче: «Продовжити процес» (сіра).
- Автоматичний нагрів:** Кнопки «Старт» та «Стоп» для Луг, Кислота, Вода.
- Приготування розчинів:** Кнопки «Кислий розчин», «Лужний розчин», «Стоп».
- Кран:** Кнопки «Пуск», «Сирена», «Стоп».
- Зберегти програму:** Велика сіра кнопка.
- Статус процесу:** Поле з текстом «Процес зупинено» та кнопка «До процесу» (сіра).

Рис. 4.14

- **Автоматичний процес:** При натисканні кнопки «Старт» запускається автоматичний режим роботи УДМ. Кнопкою «Стоп» автоматичний режим зупиняється. Кнопка «Продовжити процес» підсвічується тоді коли потрібно рішення оператора для продовження процесу.
- **Автоматичний нагрів:** «Старт» та «Стоп» автоматичного нагріву з заданими параметрами в вікні «Налаштування».

- **Приготування розчинів:** Натисканням на клавішу «Кислий розчин» переходим до відеокадру автоматичного приготування кислого розчину (см. розділ «Автоматичного приготування кислого розчину»). Натисканням на клавішу «Лужний розчин» переходим до відеокадру автоматичного приготування лужного розчину (см. розділ «Автоматичного приготування лужного розчину»). Натисканням на клавішу «Стоп» припиняється робота автоматичних режимів приготування кислого і лужного розчинів, якщо вони запущені.

- **Кран:** При натисканні кнопки «Пуск» подається команда на подачу живлення до перетворювачів частоти які живлять двигуни,

для підтвердження цієї команди необхідно, щоб перемикач на пульті вибору режиму крана знаходився в положенні «Автоматичний», після чого натискається клавіша «Пуск» на пульті. Після цього світлодіод на пульті, та індикатор під надписом «Кран» загориться. Кнопкою «Стоп» знімається живлення з перетворювачі частоти. При натиснутій кнопці «Сирена» вмикається сирена.

- **Показники:** в даному вікні відображуються значення які знімаються датчиками. Біля показників, температури, потужності ультразвуку та електрохімії розташовані індикатори подачі живлення на ці об'єкти. «Порог 1» для електрохімії підсвічується зеленим кольором та мерехтить при спрацюванні першого порогу для водню.

- **Статус процесу:** відображає на якому етапі знаходиться процес дезактивації. Кнопкою «До процесу» виконується перехід до вікну «Ручного режиму»

На Рис. 4.15 показано відеокادر який реалізує керування краном маніпулятором. Кнопки які знаходяться на цьому відеокадрі мають наступні функції.

- **Пуск:** При натисканні кнопки «Пуск» подається команда на подачу живлення до перетворювачів частоти які живлять двигуни, для підтвердження цієї команди необхідно, щоб режиму крана знаходився в положенні «Автоматичний»

- **Стоп:** Кнопкою «Стоп» знімається живлення з перетворювачі частоти.

- **Сирена:** При натиснутій кнопці «Сирена» вмикається сирена.

- **Автоматичний режим роботи:** Кнопки «Дозволити» та «Заборонити»: працюють в купі з кнопками які обирають координати «Ваги», «Ванна Ел.Хім.»,

«Ванна Луга», «Вана Ополоскування», «Вана Кислоти», «Опрокидувач», «Мийка та сушка», «До Ванни», «До позиції переміщення по цеху». Якщо, обрано якусь з координат в вікні «Обраний режим» відображається координата до якої треба зробити переміщення. При натисканні «Дозволити» кран починає переміщення до заданої координати.

- **Поновити координату крана. Кнопки «Дозволити» та «Заборонити»:**

При зупиненому автоматичному режимі коли натискається клавіша «Дозволити» зберігаються нові координати для обраного режиму в пам'ять ПЛК.

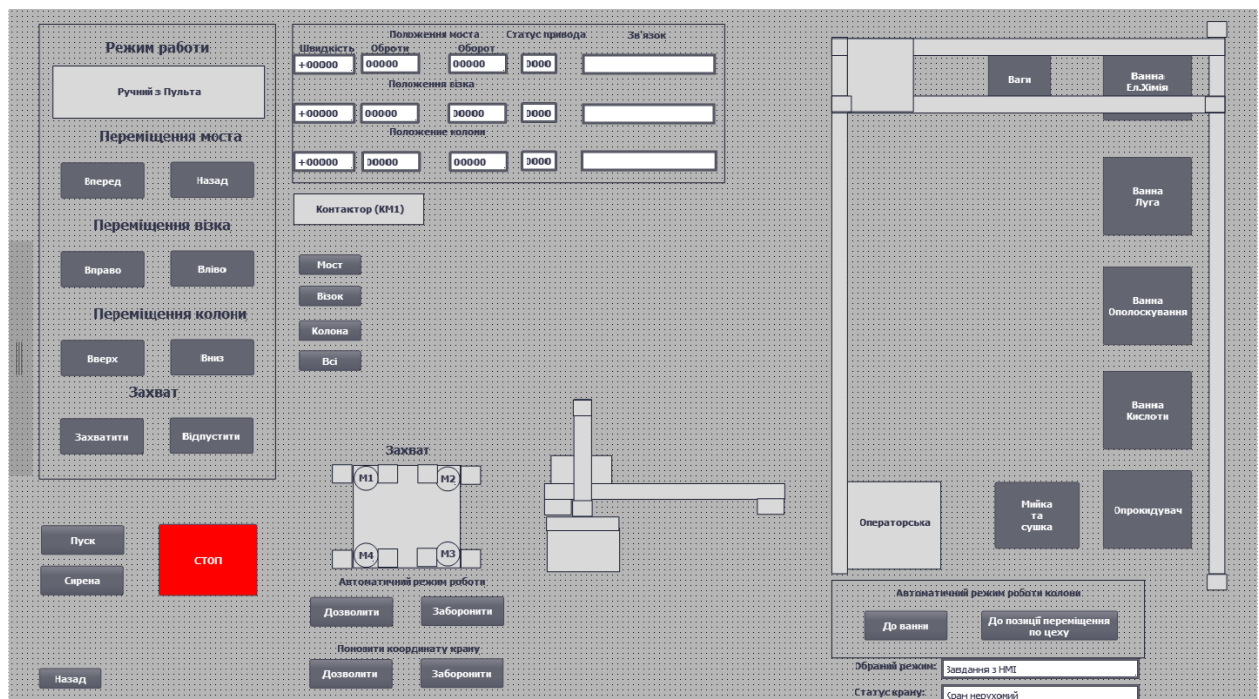


Рис. 4.15

- **Режим роботи:** Автоматичний та ручний. При активованому «Ручному» режиму є можливість керування краном кнопками «Вперед», «Назад», «Вправо», «Вліво», «Вверх», «Вниз», «Захватити», «Відпустити».

- **Контактор (KM1):** підсвічується при включеному контакторі який живе перетворювачі частоти крана.

- **Індикатори (Мост, Візок, Колона, Всі):** підсвічуються в разі коли обновлюються координати відповідних механізмів.

Висновки до розділу 4

За результатами досліджень розроблено та створено автоматичну систему керування краном-маніпулятора в складі АСК-ТП цеху дезактивації.

1. Розроблена автоматична система на базі програмовано логічних контролерів, в якій виконано програмну реалізацію розроблених алгоритмів керування автоматизованим краном-маніпулятором.

2. Розроблена система з використанням спроектованих алгоритмів роботи цеху та крану забезпечує автоматичну роботу цеху дезактивації з мінімальною участю людини в процесі.

3. Розроблені програмні засоби для практичної реалізації можуть бути використані при створенні автоматичних та автоматизованих кранів та використовуватись в промисловості.

4. Результати виконаних в дисертації досліджень використані компанією ООО «НТФ Темс» в проекті для Рівненської атомної електростанції, що підтверджено відповідними актами. Дана система позитивно зарекомендувала себе при використанні і є дешевшою від зарубіжних аналогів.

Посилання: [49-59] див. список використаних джерел стор. 160-165

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу, що полягає у створенні автоматизованої системи позиційного керування приводами крана-маніпулятора при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка підвищує швидкодію та точність позиціонування вантажу крана в умовах динамічної зміни характеристик навантаження та збурень.

Основні наукові результати роботи полягають у наступному:

1. 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 при створенні нової системи автоматичного керування електроприводами крана-маніпулятора, який відпрацьовує технологічний процес у складі установки дезактивації радіоактивних металів.

2. Розроблено віртуальну модель електромеханічної системи крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів, шляхом реалізації в моделі залежності моменту навантаження, величина якого змінюється в процесі переміщення, що дає змогу врахувати динамічну зміну навантаження, дозволяє проводити моделювання та аналіз статичних і динамічних режимів роботи приводних механізмів крану (моста, візка і вантажопідйомного пристрою) при переміщеннях вантажу (відпрацюванні технологічного процесу). Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків за імітаційною моделлю крана-маніпулятора та за лінеаризованим математичним описом, який дає змогу стверджувати про адекватність моделі та дає можливість в подальшому здійснювати моделювання приводних механізмів мостових кранів у складі систем керування положенням вантажу.

3. 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.

4. 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 по вектору стану і спостерігача стану Люенбергера третього порядку на підставі лінеаризованої моделі зі змінними параметрами. Адаптація середньогеометричного 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.

5. Розроблено нову математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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 вантажопідйомних пристроїв кранів-маніпуляторів.

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

12. 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 і є дешевшою, ніж зарубіжні аналоги.

13. Достовірність і адекватність отриманих в дисертаційній роботі результатів підтверджується коректністю застосування фундаментальних методів теорії

автоматичного керування, теорії електричного приводу та результатами практичної реалізації системи керування краном-маніпулятором в автоматичному режимі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стяжкін В.П., Подейко П.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 19 (95). С. 71-74.
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.
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.
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.
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.
6. Bohuš Leitner, Lucia Figuli. Fatigue life prediction of mechanical structures under stochastic loading. *MATEC Web Conf*. 2018. №157. С. 202-224.
7. Толочко О. И., Бажутин Д. В. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана. *Электромашинобудування та електрообладнання*. 2010. № 75. С. 22-28.
8. Aksjonov A., Vodovozov V., Petlenkov E., Three-Dimensional Crane Modelling and Control Using Euler-Lagrange State-Space Approach and Anti-Swing Fuzzy Logic. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2015. №9(1). С. 5-13.

9. You, Z., Peng, Y., Li, W., Li, S. Adaptive synchronization control of diaphragm wall grab crane with double main hoist. *JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)*. 2010. №38. С. 1635-1640.
10. Johansen T.A., Fossen T.I., Sagatun S.I., and Nielsen F.G. Wave synchronizing crane control during water entry in offshore moonpool operations-experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2003. №28(4). С. 720–728.
11. Jinbo Wu, Zeyu Yang, and Donglai Wu. Impedance control of secondary regulated hydraulic crane in the water entry phase. *Ocean Engineering*. 2018. №169: С. 134- 143
12. Ловеїкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів: монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2015. 197 с.
13. Tomakov I., Tomakov V., Pahomova G., Semicheva E., Bredihina V. A study on the causes and consequences of accidents with cranes for lifting and moving loads in industrial plants and construction sites of the Russian Federation. *Istrazivanja i projektovanja za privredu*. 2018. №1(16). С. 95-98.
14. Нормы радиационной безопасности Украины; дополнение: Радиационная защита от источников потенциального облучения (НРБУ-97/Д-2000) : постановою Головного державного санітарного лікаря України від 12 липня 2000 р. №116.
15. Control Techniques Drives Limited, Расширенное руководство пользователя Unidrive SP [Електронний ресурс]:<http://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1165.pdf> (дата звернення: 10.9.2020). Назва з екрану.
16. Грузовой мостовой кран-манипулятор электрический с автоматизированной системой управления для перевозки и перемещения контейнера с радиоактивными отходами: пат. 111532 Российская Федерация, МПК В66С. ; №2011127556/11 ; заявл. 5.07.11, опубл. 20.12.11, Бюл. №35.
17. Michael Booth. The AI Systems of Left 4 Dead, 2009. [Електронний ресурс]: https://steamcdn-a.akamaihd.net/apps/valve/2009/ai_systems_of_l4d_mike_booth.pdf (дата звернення: 10.9.2020). Назва з екрану.

18. Oliver Sawodny, Harald Aschemann, Stephan Lahres. An automated gantry crane as a large workspace robot. 2002. *Control Engineering Practice*. №10(12). C. 1323-1338.
19. Chang C.Y. The switching algorithm for the control of overhead crane. *Neural Computing & Applications*. 2006. №15, C. 350-358.
20. Sorensen K.L. , Singhose W., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes. *Control Engineering Practice*. №15, 2007. C. 825-837.
21. Liu Xiaofeng, Krafes Soukaina, Chalh Zakaria, Saka Abdelmjid. A Review on the Control of Second Order Underactuated Mechanical Systems. *Complexity*. №2018. 2018. C. 1-17.
22. Moustafa K. A. Feedback control of overhead cranes swing with variable rope length. *American Control Conference Baltimor, Mariland*. 1994, pp. 691-695.
23. Park H., Chwa D., Hong K.S. A feedback linearization control of container cranes: varying rope length. *International Journal of Control, Automation, and System*. 2007. № 5(4). C. 379-387.
24. Bartolini G., Pisano A., Usai E.. Output-feedback control of container cranes: a comparative analysis. *Asian journal of control*. 2003. № 5. C. 578-593.
25. M. B. Trabia, J. M. Renno, K. A. F. Moustafa. Generalized design of an anti-swing fuzzy logic controller for an overhead crane with hoist. *Journal of Vibration and Control*. 2008. №14. C. 319-346.
26. Kwon D., Eom M., Chwa D. Anti-Sway Control of the Overhead Crane System using HOSM Observer. *J Electr Eng Technol*. 2016. №11, C. 1921-1928.
27. Liu D., Yi J., Zhao D., Wang W. Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane. *Mechatronics*. 2005. №15. C. 505-522.
28. Jordi Cornella, David Puig, and Vtor Sequeira. Á crane-based robotic device for operating inside storage cells. *IEEE Transactions on Robotics*. 2012. №28(4). C. 911–921
29. Thein Moe Win, Tim Hesketh, Ray Eaton Simmechanics Construction Tower Crane SimMechanics-Visualized Modelling, Tower Vibration Impact on Payload Swing

- Analysis and LQR Swing Control. *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*. 2014. №7(6). С. 979-982.
30. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов в MATLAB 5.X: в 2-х томах. Москва: ДИАЛОГ–МИФИ, 1999. 366 с.
31. Егоренков Д.Л., Фрадков А.Л., Харламов В.Ю. Основы математического моделирования. Построение и анализ моделей с примерами на языке MATLAB. С.-Петербург: Балт.гос.техн.ун-та, 1994. 191с.
32. Arfken G. B., Hans J. W. Mathematical Methods For Physicists International Student Edition. Miami: Elsevier Science Publishing Co Inc, 2005. 1200с.
33. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
34. Макаров, А. М. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока : учеб. пособие / А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев. Волгоград: ВолгГТУ., 2016. 192 с.
35. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ». 2016. 150 с.
36. Joshi M., Chandorkar C. Two-motor single-inverter field-oriented induction machine drive dynamic performance. *Indian Academy of Sciences*. №39(2). 2014. С 391–407
37. Ghorbanali M. Dynamic performance of single inverter fed parallel induction motors *30th power system conference*. Tehran. April 2015. №.5. С 121–124.
38. Gunabalan R. Speed-sensorless vector control of parallel connected induction motor drive fed by a single inverter using natural observer. *World academy of science: Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2010. №4(8). С. 1193-1198.
39. Hesari, Sadegh. A New Technique for Operating Multiple Induction Motors Using a Single Inverter. *International Journal of Scientific Study*. 2017. №5(5). С. 427-432.
40. Gunabalan R., Subbiah V. Single inverter fed speed sensorless vector control of parallel connected two motor drive. *Automatika*. №57(2). 2016. С. 416-427.

41. Чернышев Ю., Дементьев Н., Чернышев И. Электропривод переменного тока: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 212 с.
42. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов.: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 82 с.
43. Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed loop control system for rotating field machines. *Siemens Rev.* 1972. №34, С. 217-220
44. Bosch Rexroth. The Drive & Control Company. - Bosch Rexroth AG [Электронный ресурс]: <http://www.boschrexroth.com/dcc/Vornavigation/VorNavi.cfm?Language=EN&Variant=internet&VHist=g97568&PageID=g96067> (дата звернения: 10.9.2020). Назва з екрану.
45. Motion Control Motors - Motors - Siemens [Электронный ресурс]: <http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/motors/motion-control-motors/Pages/motion-control-motors.aspx> (дата звернения: 10.9.2020). Назва з екрану.
46. Power Converters and Inverters | ABB [Электронный ресурс]: <http://new.abb.com/ua> (дата звернения: 10.9.2020). Назва з екрану.
47. Орловский И.А., Бут Ю.С. Математическая модель взаимосвязанного электропривода перемещения мостового крана с общей системой управления. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного ун-та ім. М. Остроградського.* – Ч.1. Кременчук, 2008. Вип. 4 (51). С. 145-149.
48. Servo Drives and Motors from Control Techniques - AC Brushless | Synchronous | Unidrive | Unimotor [Электронный ресурс]: <http://www.emersonindustrial.com/en-EN/controltechniques/products/servodrives/Pages/servo-drives-motors.aspx> (дата звернения: 8.9.2020). Назва з екрану.
49. Руководство пользователя Flex Kraft 77-107.0222 RU Rev.F [Электронный ресурс]: 2009. URL: https://inova-group.ru/upload/goods/docs/flex_kraft_rp.pdf (дата звернения: 8.9.2020). Назва з екрану.
50. PROFINET System Description Technology and Application [Электронный ресурс]: URL: <https://www.profibus.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=51714>

- &token=4ea5554cbb80a066e805a879116ead2a759c23c3 (дата звернення: 8.9.2020). Назва з екрану.
51. SIOS 6GK5208-0BA00-2TB2 SCALANCE XB208 [Електронний ресурс]: URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/pd/314936?pdti=pi&dl=en&lc=en-US> (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.
52. SIMATIC HMI WinCC Runtime Advanced readme [Електронний ресурс]: URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/803/109753803/att_937533/v1/ReadMe_WinCC_RT_Advanced_V15_enUS.pdf (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.
53. SIMATIC S7-1200 [Електронний ресурс]: URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html> (дата звернення: 8.9.2020). Назва з екрану.
54. The RS-485 Design Guide [Електронний ресурс]: URL: <https://www.ti.com/lit/an/slla272c/slla272c.pdf> (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.
55. Absolute encoders multiturn [Електронний ресурс]: URL: <https://www.kuebler.com/en/products/measurement/encoders/absolute-multiturn> (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.
56. MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b [Електронний ресурс]: 2006. URL: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.
57. ВПД1010Л (Платформенные напольные весы) [Електронний ресурс]: URL: <https://dneproves.ua/products/vpd1010l> (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.
58. RS-232 INTERFACE [Електронний ресурс]: URL: <http://www.tscm.com/rs-232.pdf> (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.
59. ADAM-4520 Isolated RS-232 to RS-422/485 Converter [Електронний ресурс]: URL: https://www.advantech.com/products/gf-5u7m/adam-4520/mod_8dcee4b7-fbde-4c5d-9752-ed2f2fbd00bf (дата звернення: 7.9.2020). Назва з екрану.

ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Стяжкін В.П., Подейко П.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 19 (95). С. 71-74.
2. Рыжков 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.
3. Толочко О.І., Стяжкін В.П., Рыжков 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.
4. Толочко О.І., Рыжков О.М. Синтез та аналіз системи модального керування крановим механізмом поступального руху з врахуванням роботи підйимального механізму. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 131-134.

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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Толочко О.І., Стяжкін В.П., Рыжков О.М. Керування вантажопідйомним пристроєм крана-маніпулятора під час опускання вантажу у ванну з агресивною рідиною. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С.46-51.

Продовж. дод. А

Апробація результатів дисертації

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)

ДОДАТОК Б

ДОДАТОК Б.1. Програма ініціалізація параметрів моделі

```
clc, clear all
f=50
Zp=2
Ufn=220
Usl=380, Usfm=Usl*sqrt(2/3)
eta=0.68
cosfi=0.69
J=0.02
n=1380
ws = 2*pi*f
w0=ws/Zp
wn=pi*n/30
Pn = 370
Mn=Pn/wn
In=Pn/(3*Ufn*eta*cosfi)
Ina=In*sqrt(2)
Is0=0.89
Is0a=Is0*sqrt(2)
isd0=Is0a
Rs = 29.42;
Ls_sig =0.047;
Rr = 22.9;
Rr1=Rr, Rr2=1.5*Rr
Lr_sig = 0.094;
Lm = 0.816;
%Ks=Ls_sig/(Lm+Ls_sig)
Lr=Lm+Lr_sig
Ls=Lm+Ls_sig
alfr=Rr/Lr
Tmu=1e-3
```

```

Kr=Lm/Lr
Ks=Lm/Ls
sgma=1-Ks*Kr
Rsr2=Rs+Kr*Kr*Rr2
Rsr1=Rs+Kr*Kr*Rr1
Ls1=sgma*Ls
    Lr1=sgma*Lr
    Tsr2=Ls1/Rsr2
    Tr2=Lr1/Rr2
    Ts1=Ls1/Rs,
    Tr1=Lr1/Rr
    Tr12=Lr1/Rr2, Tr11=Lr1/Rr1
Tsr2=Ls1/Rsr2
Tsr1=Ls1/Rsr1
Ti=2*Tmu
alfr=Rr/Lr
%Ti=1/7600
%PSlro=Lm*Iso
    PSlro=Lm*isd0
    Km=3/2*Zp*Kr/Ls1
Cm=Km*PSlro
Tw=2*Ti
Tpsi=2*Ti
Tm=2*Tmu
Krs=J/Cm/Tw
%isd0=PSlro/Lm
alf=Rr/Lr
alfs=Rs/Ls
bet=(Lm/(Lr*sgma))
gamma=Rs/sgma+alf*bet*Lm;
mu=(3/2)*Zp*(1/J)*(Lm/Lr);
tr0 = J*w0/Mn
Krps=7.5

```

$$K_{rp1} = 1 / (4 * T_w)$$

$$K_{rp2} = 1 / (8 * T_w)$$

$$K_{per} = ((30 / \pi) / 228.93) * (\pi * (0.22 + 0.011))$$

$$M_{c1} = 0.467$$

$$M_{c2} = 5.5405$$

$$T_{sgmr} = \sigma / \alpha_f$$

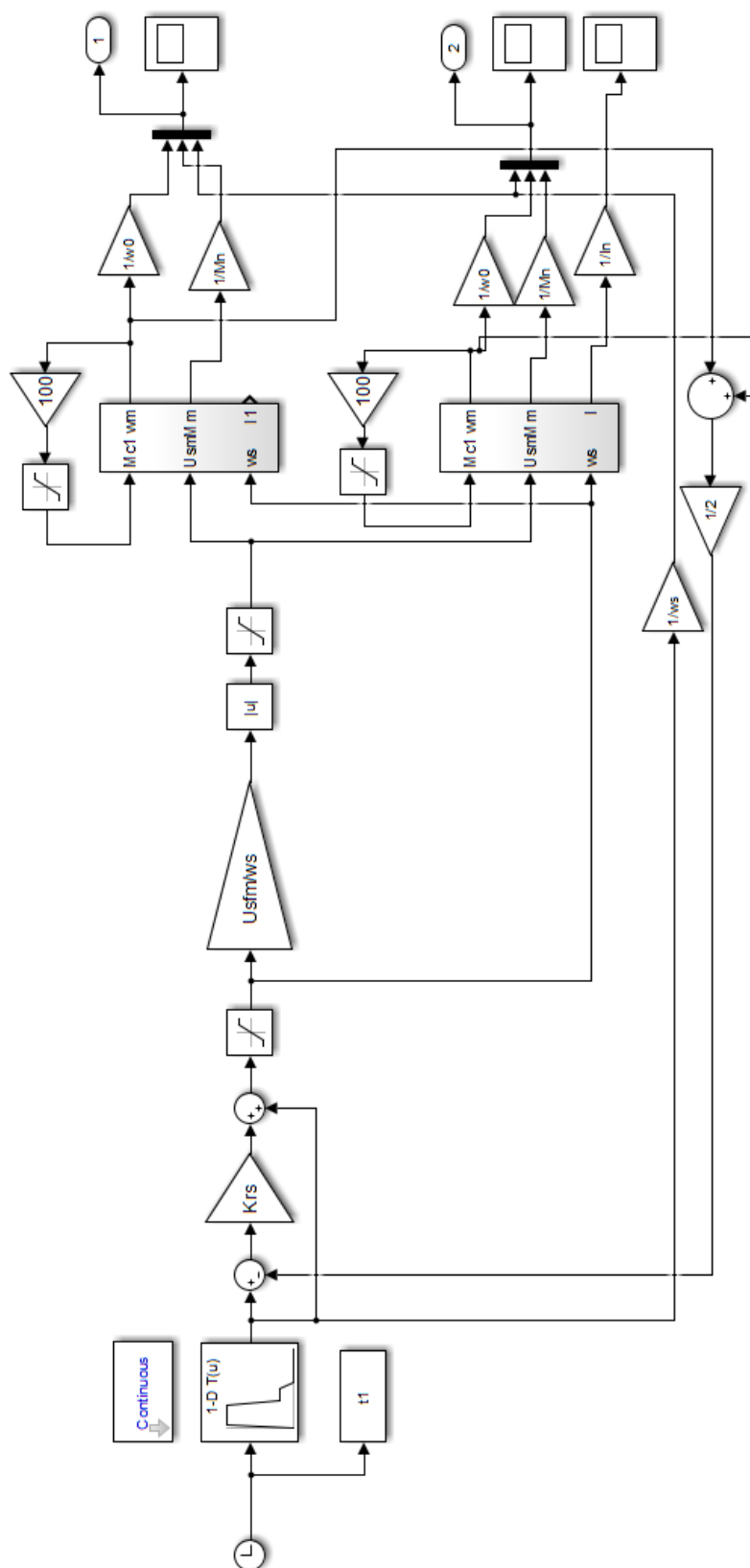
$$o = 1 - L_m^2 / (L_s * L_r)$$

$$T_u = 1e-3$$

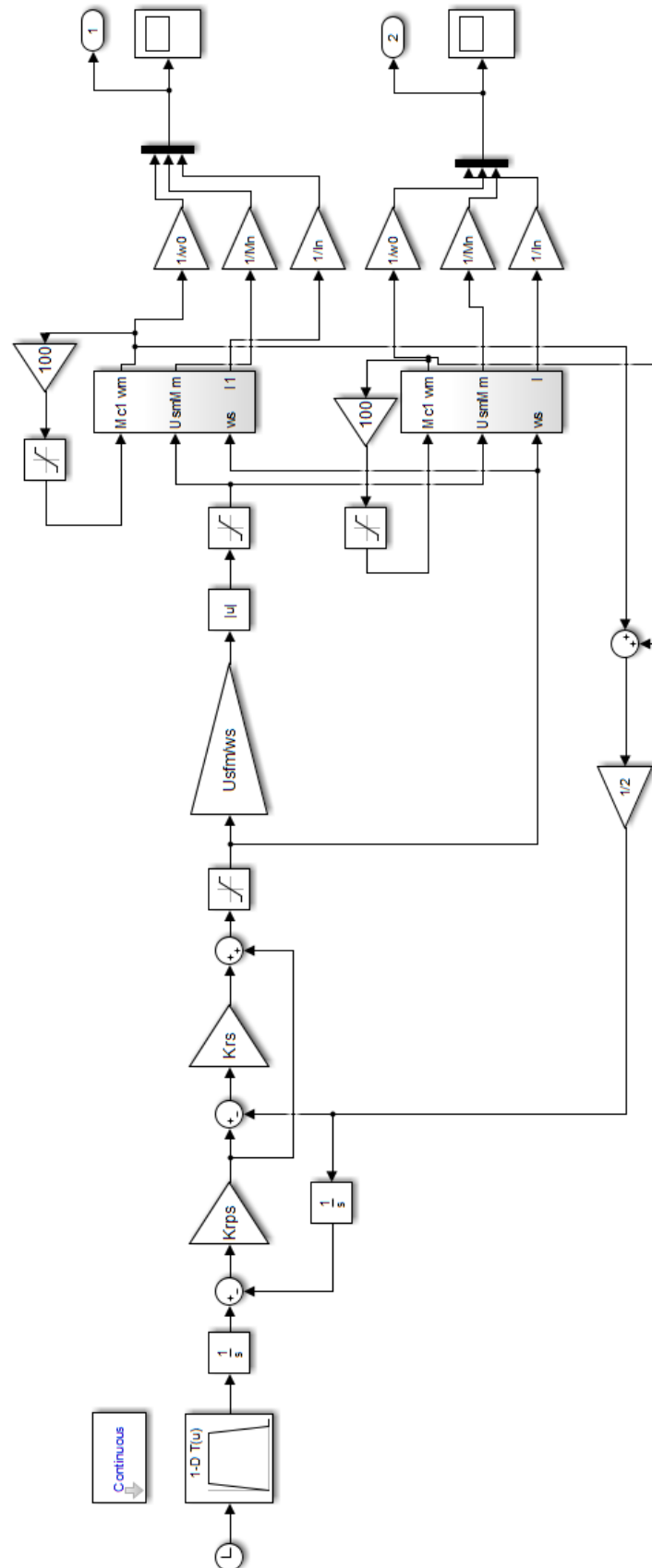
$$R_e = R_s + L_s * \alpha_{fr}$$

$$T_e = \sigma * L_s / R_e$$

ДОДАТОК Б.2 Структурна схема скалярного електроприводу з регулюванням швидкості

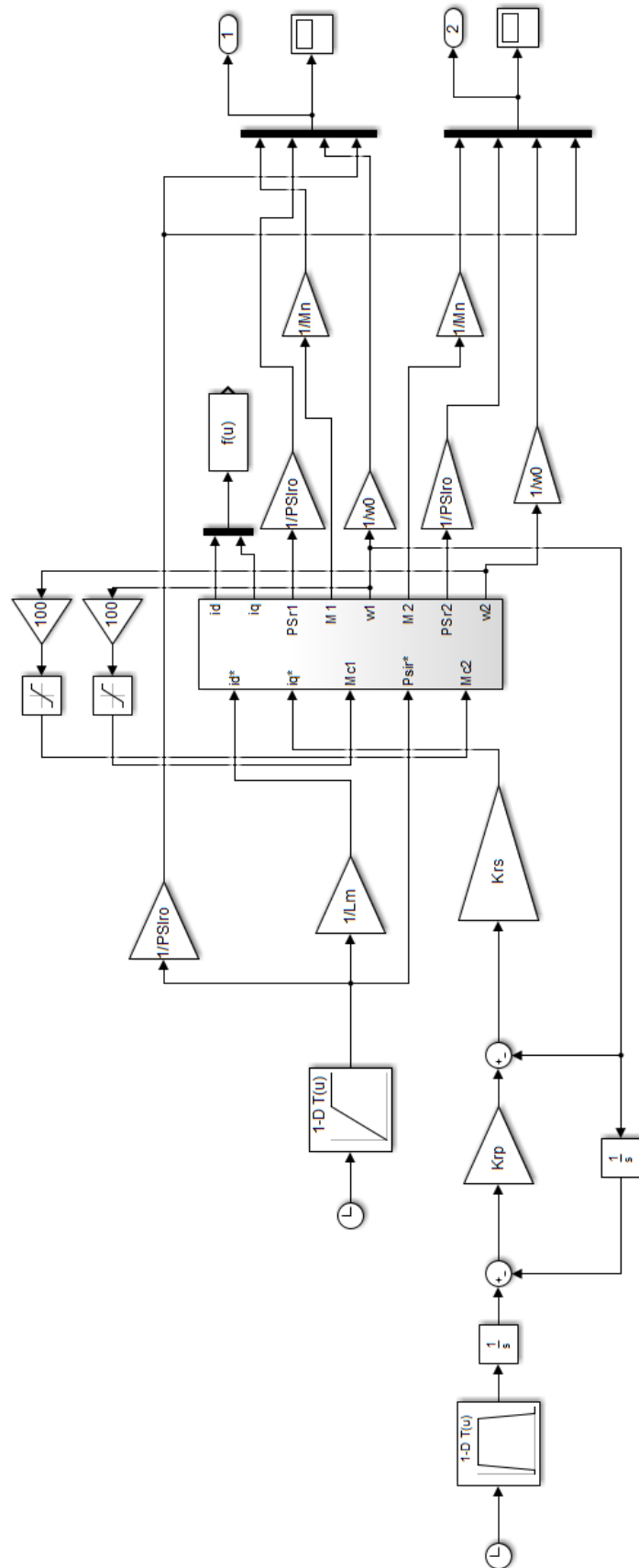


ДОДАТОК Б.3 Структурна схема скалярного електроприводу з регулюванням положення

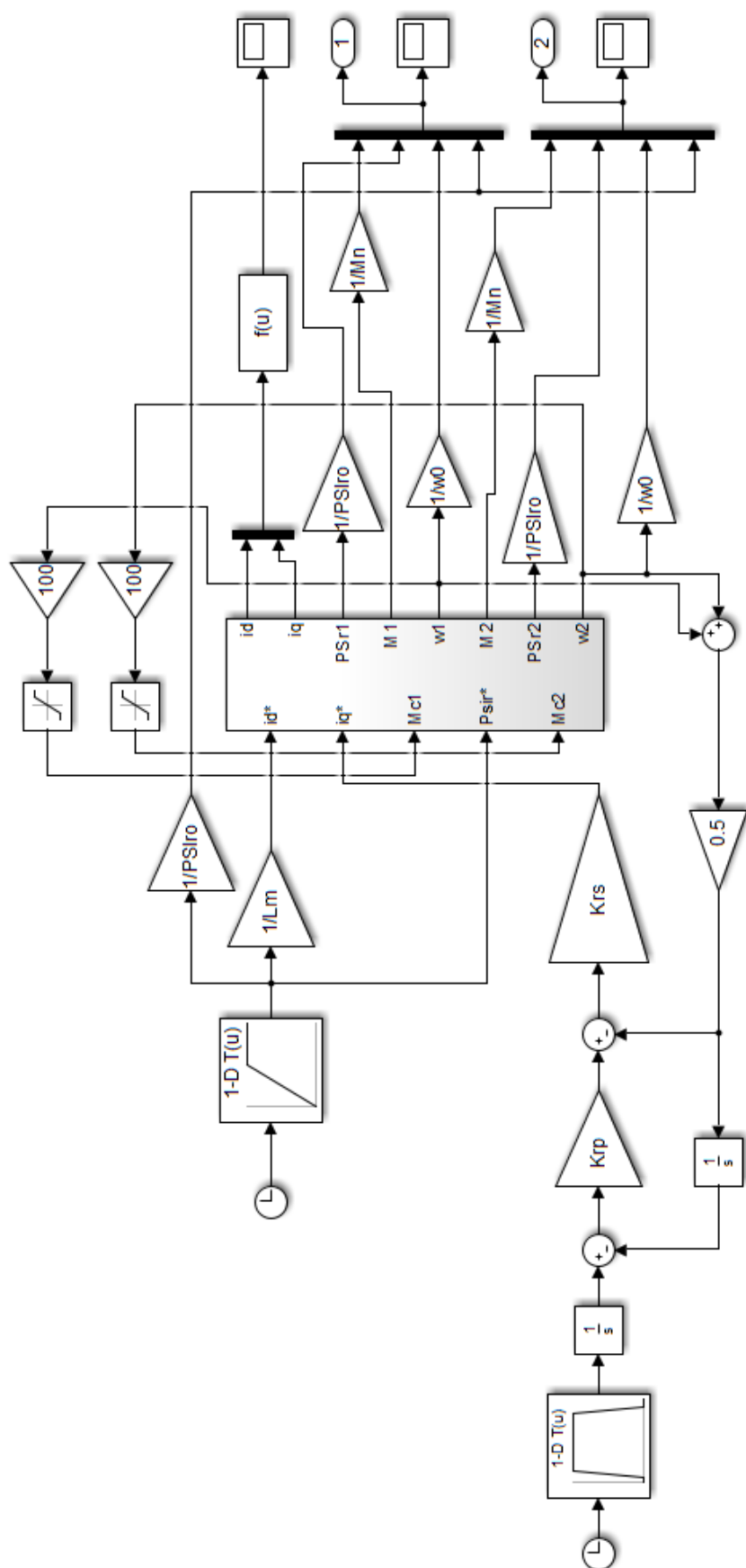


ДОДАТОК В

ДОДАТОК В.1. Структурна схема стратегії керування «Master-Slave»



ДОДАТОК В.2. Структурна схема стратегія керування «Mean control»



ДОДАТОК Г. Перелік команд підпрограм

Головний алгоритми роботи

Робота установки дезактивації в час зміни

Умови перед стартом алгоритму: корзина з вантажем підвішена поряд з вагами.

1. Перевірка стану систем
2. Виконання підпрограми «Забору корзини»
3. Виконання підпрограми «Мийка та сушка»
4. Якщо обрано обробку в лузі, виконання підпрограми «Дезактивація в лузі»
5. Якщо обрано обробку в кислоті, виконання підпрограми «Дезактивація в кислоті»
6. Якщо обрано обробку в електрохімії, виконання підпрограми «Дезактивація в електрохімії»
7. Виконання підпрограми «Мийка та сушка»
8. Виконання підпрограми «Взвішування корзини»
9. Виконання підпрограми «Перекидач»
10. Стоп програми

Підпрограма «Забору корзини»

1. Очікування переходу в автоматичний режим роботи та пуску крана
2. Підйом корзини до висоти переміщення
3. Переміщення корзини до ваг
4. Опускання корзини на ваги
5. Збереження ваги до процесу дезактивації та очікування рішення оператора
6. Підйом корзини до даху

Підпрограма «Мийка та сушка»

1. Рух крана до мийки

2. Опускання корзини на мийку
3. Відпускання корзини
4. Піднімання зачепу на висоту очікування та переміщення до перекидача
5. Очікування рішення оператора про продовження процесу
6. Переміщення до мийки
7. Опускання зачепу для захвату корзини
8. Захват корзини
9. Піднімання корзини до даху

Підпрограма «Деактивація в лузі»

1. Рух крана до ванної з лугом
2. Відкривання кришки ванної
3. Опускання корзини в ванну
4. Розчіплювання захвату
5. Піднімання зачепу на висоту очікування
6. Закриття кришки ванної з лугом
7. Запуск ультразвуку потужністю відповідною до налаштувань
8. Очікування кінця процесу
9. Припинення обробки ультразвуком
10. Відкривання кришки ванної
11. Опускання маніпулятора в ванну
12. Захват корзини
13. Піднімання корзини на висоту очікування стікання розчину
14. Очікування стікання розчину з корзини до команди оператора
15. Піднімання зачепу з корзиною на висоту переміщення
16. Закриття кришки ванної з лугом
17. Виконання підпрограми «Ополіскування в воді»

Підпрограма «Деактивація в кислоті»

1. Рух крана до ванної з кислотою
2. Відкривання кришки ванної
3. Опускання корзини в ванну
4. Розчіплювання захвату
5. Піднімання зачепу на висоту очікування
6. Закриття кришки ванної з кислотою
7. Запуск ультразвуку потужністю відповідною до налаштувань
8. Очікування кінця процесу обробки ультразвуком
9. Припинення обробки ультразвуком
10. Відкривання кришки ванної
11. Опускання маніпулятора в ванну
12. Захват корзини
13. Піднімання корзини на висоту очікування стікання розчину
14. Стікання розчину з корзини до команди оператора
15. Піднімання зачепу з корзиною на висоту переміщення
16. Закриття кришки ванної з кислотою
17. Виконання підпрограми «Ополіскування в воді»

Підпрограма «Деактивація в електрохімії»

1. Рух крана до ванної з електрохімією
2. Відкривання кришки ванної
3. Опускання корзини в ванну
4. Розчіплювання захвату
5. Піднімання зачепу на висоту очікування
6. Закриття кришки ванної з електрохімією
7. Очікування повного відкриття клапану вентиляції
8. Запуск електрохімії з потужністю відповідною до налаштувань
9. Очікування кінця процесу
10. Припинення процесу електрохімії
11. Відкривання кришки ванної

- 12.Закриття клапану витяжки
- 13.Опускання маніпулятора в ванну
- 14.Захват корзини
- 15.Піднімання корзини на висоту очікування стікання розчину
- 16.Стікання розчину з корзини до команди оператора
- 17.Піднімання зачепу з корзиною на висоту переміщення
- 18.Закриття кришки ванної з електрохімією
- 19.Виконання підпрограми «Ополіскування в воді»

Підпрограма «Ополіскування в воді»

1. Рух крана до ванної з водою
2. Відкривання кришки ванної
3. Опускання корзини в ванну
4. Розчіплювання захвату
5. Піднімання зачепу на висоту очікування
6. Закриття кришки ванної з водою
7. Запуск ультразвуку потужністю відповідною до налаштувань
8. Очікування кінця процесу обробки ультразвуком
9. Припинення обробки ультразвуком
- 10.Відкривання кришки ванної
- 11.Опускання маніпулятора в ванну
- 12.Захват корзини
- 13.Піднімання корзини на висоту очікування стікання розчину
- 14.Стікання розчину з корзини до команди оператора
- 15.Піднімання зачепу з корзиною на висоту переміщення
- 16.Закриття кришки ванної з водою

Підпрограма «Взвішування»

1. Переміщення корзини до ваг
2. Опускання корзини до ваг

3. Збереження ваги після дезактивації та очікування рішення оператора
4. Підйом корзини до даху

Підпрограма «Перекидач»

1. Переміщення корзини до перекидача
2. Перевірка чи можливо опустити на перекидач корзину. Якщо неможливо, попередження оператора прийняти дії (Відпустити захват та/чи повернути в вихідний стан перекидача)
3. Опускання корзини до перекидача
4. Відпускання корзини
5. Підйом маніпулятора до даху

ДОДАТОК Д. Системи керування положенням

Для системи керування положенням крана можуть бути використані сервоприводи. Сервоприводом називається система автоматичного керування, в якій положення виконавчого органу регулюється шляхом керування лінійним або обертальним рухом двигуна.

Електричний сервопривод складається з чотирьох основних частин: силового перетворювача, двигуна, пристрою зворотного зв'язку та механізму. Розповсюдженими установками, що містять електричні сервоприводи є промислові роботи, верстати, допоміжні приводи в автомобілях, ліфтові установки, конвеєри, крани-маніпулятори, тощо.

В 1972-му році німецьким вченим Ф.Блашке була запропонована теорія полеорієнтування [43], яка пізніше була названа векторним керуванням, і дала змогу досягти кращих результатів регулювання машин змінного струму порівняно з приводами постійного струму. Такий результат став можливим завдяки новому підходу до регулювання координат, а саме розмежуванню струмоутворюючого та потокоутворюючого струму. Однак використання векторного керування вимагало значних обчислювальних ресурсів, тому першими установками, де воно було застосоване, стали високопотужні установки, де їх застосування було економічно виправданим. Лише швидкий розвиток мікропроцесорної техніки дав змогу на початку 80-х років досягти відмінних динамічних показників електроприводів змінного струму і, таким чином, зробити придатним їх використання в установках малої потужності а також в сервосистемах.

У сервоприводах, як правило, використовується підпорядкована система регулювання координат. Контур регулювання положення є зовнішнім, завдання для нього надходить від користувача або системи верхнього рівня. Вихід контуру регулювання положення є завданням для контуру регулювання швидкості, а вихід контуру регулювання швидкості є завданням для контуру регулювання струму. В якості пристрою зворотного зв'язку в таких системах використовується інкрементальний енкодер або резолвер, який краще підходить саме для синхронних

двигунів зі збудженням від постійних магнітів. Живлення двигуна здійснюється від автономного інвертора напруги, який виконується на IGBT або MOSFET ключах. Саме таку конфігурацію мають серійні сервоприводи, що нині присутні на ринку.

Розглянемо існуючі на ринку сервоприводи, що серійно виготовляються провідними виробниками електротехнічної продукції – фірмами *Siemens*, *ABB* та *Rexroth* [44].

Компанія *Siemens* [45] пропонує наступні рішення для керування рухом:

1. Загальнопромислові приводи MC GMC. Загальнопромислові приводи являють собою серію перетворювачів частоти SINAMICS G110 (0,12 - 3 кВт), G110D/G120D (0,75 - 7,5 кВт), G120 (0,37 - 250 кВт), G120C (0,75 - 18,5 кВт), G120P (0,75 - 90 кВт), MICROMASTER 420, 430, 440 (0,12 - 250 кВт), сервопривод для простих задач керування та позиціонування Sinamics S110, S120 (0,12 ... 90 кВт), крокові приводи SINAMICS V60. В якості двигунів застосовуються синхронні та компактні асинхронні, лінійні та вбудовані двигуни серій 1FK, 1FT, 1PH, 1FE, 1FN, що призначені для вирішення задач переміщення та позиціонування.

Спеціалізовані сервоприводи серій SINAMICS S110 та S120 – сучасна заміна свого попередника - Simovert Masterdrives Motion Control і Vector Control, призначені для вирішення завдань з підвищеною вимогою до точності та динаміки і знаходять своє застосування в різних промислових галузях, наприклад, в пакувальних машинах, текстильному обладнанні, верстатах, промислових та портових краних.

2. Системи керування переміщенням для верстатів MC MT. До таких систем належать системи числового програмного керування SINUMERIK та електроприводи SIMODRIVE та SINAMICS, які широко розповсюджені в автомобілебудуванні, виготовленні прес-форм, авіації та космонавтиці, машинобудуванні, електронних, медичних, та підйомно-транспортних пристроях. Разом з додатковим обладнанням (серводвигуни, системи серводвигун-редуктор, асинхронні двигуни, вбудовані двигуни, високошвидкісні мотор-шпинделі, механічні шпинделі, оптоелектронні датчики для контролю переміщення) ці приводи здатні забезпечувати п'ятиосне перетворення координат, якісне виготовлення штамповочного обладнання,

здійснювати компенсацію люфтів, забезпечувати комплексну автоматизацію виробництва і реалізовувати високоточні системи для промислових машин.

3. Системи керування рухом для промислових машин та установок MC PMA. Представником цього класу приводів є система керування рухом SIMOTION, призначена для виробничих машин та установок, де вимагається точне позиціонування та узгоджений рух кількох механізмів з урахуванням специфічних технологічних вимог. Привод виготовляється на базі трьох платформ: Simotion D – на базі привода, Simotion C – в корпусі контролера, та Simotion P – промисловий комп'ютер. Це дає змогу проводити операції з 128 віртуальними та реальними осями. Окрім того створені стандартні програмні бібліотеки, що дозволяє спростувати апаратну частину і зводять роботу програміста до параметризації привода. Такі шаблони містять у собі функції реалізації основних приводних задач і можуть редагуватися згідно з вимогами технологічного процесу.

4. Компоненти для кранового обладнання MC Cranes. Компонентами такого обладнання є перетворювачі напруги SIMOTRAS HE, SIMOTRAS HD, двигуни з фазним ротором 1LT8/1LT9, двигуни з фазним ротором та вбудованим гальмом 1LV9, двигуни з короткозамкнутим ротором з вбудованим гальмом 1LD8/1LD9.

Для виконання підйомно-транспортних операцій створена спеціалізована програма керування кранами SIMOCRANE, яка забезпечує невисокі затрати на обслуговування механізму, гнучке керування та візуалізацію стану крана і поточних операцій. Програма SIMOCRANE має бібліотеку кранових функціональних блоків, що зводить роботу програміста до параметризації системи обираючи функціональність згідно з поставленими вимогами. Набір основних функціональних блоків містить: керування переміщенням крана, включаючи порталні осі, керування механізмом підйому та опускання вантажу, керування пристроєм захоплення, керування системою гасіння коливань.

До сервоприводів *ABB* [46] належать приводи серій ACSM1-04, MicroFlex та MotiFlex з діапазоном потужності 1 кВт – 355 кВт.

Приводи MicroFlex та MotiFlex призначені для керування рухом по одній або по кількох осях з використанням технології Ethernet POWERLINK і застосовуються в пакувальній та текстильній промисловості.

Сервопривод ACSM1-04 відрізняється від інших приводів тим, що призначений для високоточних та високодинамічних механізмів, тому застосовується в точному машинобудуванні.

Системи керування рухом *Rexroth* для приводів малої потужності (до 3.5 кВт) серії IndraDrive Cs виконуються у вигляді комплектного приводу, а керуючо-перетворювальні пристрої більшої потужності мають модульне виконання, тобто силова частина (power section) та інтелектуальний модуль (control unit) виконуються окремо, і залежно від поставленого завдання необхідні компоненти об'єднуються разом. Це стосується серій приводів IndraDrive C та модульних систем IndraDrive M.

Серія IndraDrive C виробляється на діапазон потужностей до 11 кВт (HCS02) до 75 кВт (HCS03) та до 630 кВт (HCS04), є можливість конфігурувати оптимальну систему привода для реалізації технічного завдання з урахуванням економічних та масогабаритних факторів.

До сервоприводів підрозділу *Control Techniques* фірми *Emerson* [48] належать приводи серій Unidrive M700, Unidrive SP, Epsilon EP та Digitax ST.

Сервопривод Unidrive M700 призначений для керування високодинамічними об'єктами. Тому в нього вбудовано модуль Ethernet версії (IEEE 1588 V2) який використовується для RTMoE (рух в реальному часі через Ethernet), що дає можливість швидкісного керування, та точної синхронізації по осям. Випускається для потужностей від 0.75 кВт до 2.8 МВт.

Серія універсальних електроприводів Unidrive SP з можливістю використання режиму сервоприводу має можливість спілкуватись через протоколи EtherCAT, SERCOS, Profibus, SLM та CANopen за допомогою внутрішніх інтерфейсів та модулів розширення. Діапазони потужностей 0.37 кВт - 150 кВт.

Сервопривод серії Epsilon EP, це компактний електропривод який може працювати з перевантажувальною здатністю в 200%. Має три типи виконання: EP-P – для створення програм замкнених циклів керування переміщенням, EP-I –

переміщення між заданими точками по таблиці індексації, EP – стандартний електропривод для використання з зовнішнім за датчиком переміщення. Випускається для діапазону номінальних потужностей 0.37 кВт - 4 кВт.

Серія Digitax ST призначена для використання в системах де можуть бути динамічні навантаження з миттєвим перевантаженням в 300%.

Посилання: [43-48] див. список використаних джерел стор. 160-165

ДОДАТОК Ж. Акт впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора ТОВ «Науково-технічна фірма «ТЕМС»



О.О. Герасименко
2021 г.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електродинаміки
НАН України, академік НАН України



О.В. Кириленко
"11" січня 2021 г.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи м.н.с. Інституту електродинаміки НАН України **Рижкова Олександра Михайловича**
«Динамічне керування приводами автоматизованого крана-маніпулятора»

Цим актом підтверджуємо, що розроблені в кандидатській дисертації: імітаційна модель механічної системи крана-маніпулятора, яка дозволила провести моделювання та аналіз статичних і динамічних режимів роботи приводних механізмів крана при переміщеннях вантажу і відпрацюванні технологічного процесу у трьох координатах; математична модель механічної частини системи електроприводу вантажопідйомного 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; алгоритми автоматичного керування електроприводами крана були використані у 2016-2019 роках ТОВ «Науково-технічна фірма «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», випробувані на діючому обладнанні і позитивно зарекомендували себе при використанні.

Застосування системи керування у складі установки дезактивації радіоактивних металів дозволило підвищити продуктивність обладнання, збільшити якість керування, зменшити абсолютні і відносні показники споживання електроенергії. Все це підтвердило придатність синтезованої системи позиційного керування для вантажопідйомних пристроїв кранів-маніпуляторів та може бути рекомендовано для їх подальшого застосування та експлуатації у складі установок з дезактивації радіоактивних металів.

Нач. відділу впроваджень
ТОВ «НТФ «ТЕМС»

О.З. Зайченко

О.А. Зайченко