

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КРИВОНІС ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 531.31:621.86

ДИСЕРТАЦІЯ
СИНТЕЗ СИСТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА
ПРУЖНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник:

Мокін Борис Іванович,
Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор

Вінниця - 2021

АНОТАЦІЯ

Кривоніс О.М. Синтез систем оптимального керування електроприводами зі змінними параметрами та пружними зв'язками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань (14 «Електрична інженерія»). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

В дисертаційній роботі розв'язана наукова задача зі створення методів синтезу та ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем, яка враховує змінність параметрів в часі та у просторі, на її основі розроблено закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі. Впровадження зазначеного закону в системах керування електроприводами вантажопідіймальних механізмів дозволить оптимізувати характеристики процесу переміщення вантажів, унеможливити руйнування як вантажів, так і майданчиків, на яких ці вантажі встановлюються, оскільки процес переміщення вантажу здійснюється без їх ударних співдотиків, обумовлених виникненням повздовжніх коливань в тросі, до якого підвішений вантаж. Отримані результати також доповнюють теорію синтезу та ідентифікації математичних моделей одного класу лінійних динамічних систем в частині розв'язання задач врахування змінності параметрів в часі та у просторі. В результаті дисертаційного дослідження отримані такі результати.

У дисертації здійснено аналіз наукових праць, опублікованих за темою дисертації, і показано, що: по-перше, автори наукових праць в своїх роботах використовували для аналізу процесів в електромеханічних системах підйомних кранів та скіпових лебідок шахт класичне рівняння динаміки електропривода, що не є правильним, оскільки параметри цього класу систем в процесі підймання та опускання вантажів змінюються в часі; по-друге, в усіх розглянутих роботах,

спрямованих на нейтралізацію пружних коливань в системі кранового механізму при підйманні/опусканні вантажу, встановлено, що не враховується змінний момент інерції барабана, на який намотується і з якого розмотується трос, до якого підвішений вантаж. А припущення, що при сталій швидкості обертання ротора тягового електродвигуна кранового механізму лінійна швидкість підймання/опускання вантажу також буде сталою, не є достовірним. Вона буде або наростати, або спадати, тому наведені системи стабілізації кутової швидкості «маскують» нестабільні лінійні швидкості підймання/опускання вантажів; по-третє, для забезпечення справності тягового асинхронного електродвигуна при безперервній роботі з перевантаженням або близьким до перевантаження необхідно забезпечити контроль значення фазних струмів статора для унеможливлення погіршення характеристик двигуна або виходу його з ладу.

Запропоновано метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами, до якого належить тяговий електропривод підйомного крану зі змінними параметрами, обумовленими змінами в часі приведенного моменту інерції махових мас та змінами в часі моменту навантаження тягового електродвигуна при підніманні (опусканні) вантажу. Запропоновано і обґрунтовано розрахункові співвідношення, за допомогою яких визначаються зміни в часі приведенного моменту інерції тягового електропривода, зумовлені намотуванням і змотуванням троса, до якого підвішений вантаж, на котушку, зв'язану через редуктор з валом електродвигуна. Запропоновано і обґрунтовано також розрахункові співвідношення, за допомогою яких визначаються зміни в часі моменту навантаження, зумовленого вкороченням та видовженням тросу, до якого підвішений вантаж, в результаті піднімання чи опускання цього вантажу. Розроблено покроковий алгоритм визначення усіх параметрів математичної моделі динаміки кранового електропривода зі змінними в часі моментом інерції махових мас та моментом навантаження. Наведено результати моделювання динаміки системи електропривода при розгоні, гальмуванні, усталеній швидкості, холостому ході та реверсі тягового електродвигуна з урахуванням

змінних параметрів та використанням математичної моделі, ідентифікованої конкретними паспортними характеристиками тягового електродвигуна, редуктора та троса, у графічному програмному середовищі Simulink пакета прикладних програм MATLAB. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів і показано, що використання класичного рівняння динаміки системи електропривода, яке містить сталий момент інерції і сталий момент навантаження, приводить до суттєвих похибок, навіть незважаючи на плавне регулювання швидкості з використанням частотних регуляторів для асинхронних електродвигунів та використанням силових транзисторів для регулювання електродвигунів постійного струму шляхом зміни напруги, що подається на якір електродвигуна.

Обґрунтовано необхідність системного підходу до аналізу процесів переміщення вантажів підйомним краном, який враховував би і зміну характеристик цього процесу у часі, зумовлену змінами приведенного моменту інерції системи електропривода та моменту навантаження під час переміщення вантажу, і вплив поздовжніх коливань, що виникають у тросі, на який підвішується вантаж. Показано, що ігнорування цих особливостей процесу переміщення вантажів підйомним краном може призвести до руйнування як вантажів, так і майданчиків, на яких ці вантажі встановлюються, внаслідок виникнення їх ударних зіткнень, зумовлених виникненням поздовжніх коливань у тросі, до якого підвішений вантаж. З використанням структури звичайного диференціального рівняння зі змінними в часі параметрами, яке зв'язує приводний момент тягового електродвигуна з моментом навантаження та приведеним моментом інерції системи електропривода, та структури диференціального рівняння в частинних похідних, яким описується процес виникнення поздовжніх коливань в тросі, зумовлених впливом маси вантажу та маси відрізка троса між барабаном його намотування та точкою підвісу вантажу, здійснено синтез системної математичної моделі процесу переміщення вантажу підйомним краном, яка враховує і зміну параметрів математичної моделі цього процесу у часі, зумовлену змінами приведенного моменту інерції системи

електропривода та моменту навантаження, і вплив поздовжніх коливань, які виникають у тросі, на який підвішується вантаж. Запропоновано алгоритм практичної реалізації синтезованої системної математичної моделі процесу переміщення вантажу підйомним краном, який дозволяє покроково оцінювати цей процес в темпі його перебігу.

Наведено результати моделювання динаміки системи електропривода при розгоні, гальмуванні, усталеній швидкості. Шляхом зіставлення результатів, отриманих на імітаційній моделі, з результатами експериментальних досліджень цього ж класу динамічних систем, виконаних іншими авторами, доведена адекватність синтезованих математичних моделей. Доведено, що використання класичного рівняння динаміки системи електропривода, яке містить сталий момент інерції і сталий момент навантаження, приводить до похибок при оцінюванні процесів, що супроводжують піднімання та опускання вантажів підйомними кранами. А це, у свою чергу, не дозволяє достатньо точно спрогнозувати поведінку системи в різних режимах роботи.

Синтезовано закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часі та просторі, до якого відносять систему електропривода підйомного крана, оскільки у цій системі електропривода мають місце і зміна характеристик процесу переміщення вантажів у часі, зумовлена змінами приведенного моменту інерції системи електропривода та моменту навантаження під час переміщення вантажу, і вплив повздовжніх коливань, які виникають у тросі, на який підвішується вантаж. Як критерій оптимізації використано функціонал у вигляді інтеграла від квадрата відхилень реальної кутової швидкості приводного електродвигуна підйомного крана від її ідеальної траєкторії. При синтезі закону оптимального керування використано створену математичну модель процесів переміщення вантажу підйомним краном, структура якої побудована з використанням як звичайного диференціального рівняння зі змінними в часі параметрами, яке зв'язує приводний момент тягового електродвигуна з моментом навантаження та приведеним моментом інерції системи електропривода, так і диференціального рівняння в частинних похідних,

яким описується процес виникнення повздовжніх коливань в тросі, зумовлених впливом маси вантажу та маси відрізка троса між барабаном його намотування та точкою підвісу вантажу. Показано, що реалізацією синтезованого закону оптимального керування електроприводом підйомного крана досягаються такі характеристики процесу переміщення вантажів, які унеможливають руйнування як вантажів, так і майданчиків, на яких ці вантажі встановлюються, оскільки процес переміщення вантажу здійснюється без їх ударних співдотиків, обумовлених виникненням повздовжніх коливань в тросі, до якого підвішений вантаж. Запропоновано алгоритм практичної реалізації синтезованого закону оптимального керування системою електропривода підйомного крана як динамічного об'єкта з параметрами, змінними в часі та просторі.

Виходячи з фізики процесів, що відбуваються у вимірювальних трансформаторах струму, уточнено існуючі характеристики цих процесів та їх математичні моделі як статичні, що характеризують залежність дійсного значення вихідного струму від вхідного, так і динамічні, що характеризують перехідні процеси в обмотках цих трансформаторів при переході їх магнітопроводів від ненасиченого стану до насиченого і навпаки.

Виходячи з фізики процесів, що відбуваються у двокаскадних трансформаторах струму, запропоновано нові моделі цих процесів і показано, що загальноприйнята заступна схема трансформатора цього класу не може використовуватись для розрахунків його режимів в широкому діапазоні змін вимірюваного струму.

Ключові слова: тяговий електропривод, вантажопідіймальний механізм, математична модель, моделювання, закон оптимального керування, трансформатор струму.

ABSTRACT

Kryvonis O.M. Synthesis of systems for optimal control of electric drives with variable parameters and elastic connections. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy in the direction of preparation 141 - "Electric power, electric engineering and electromechanics" (14 - "Electrical engineering"). - Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, 2021.

In the dissertation the scientific problem on creation of methods of synthesis and identification of mathematical model of one class of linear dynamic systems which considers variability of parameters in time and in space is solved, on its basis the law of optimum control of one class of objects with parameters variable in time is developed. and space. Introduction of the specified law in control systems of electric drives of load-lifting mechanisms will allow to optimize characteristics of process of movement of freights, to prevent destruction of both freights, and platforms on which these freights are established as process of moving of freight is carried out without their shock contacts caused by occurrence of suspended load. The obtained results also supplement the theory of synthesis and identification of mathematical models of one class of linear dynamical systems in terms of solving problems of taking into account the variability of parameters in time and space. The following results were obtained as a result of the dissertation research.

The dissertation analyzes scientific papers published on the topic of the dissertation and shows that: first, the authors of scientific papers in their work used to analyze the processes in electromechanical systems of cranes and skip winches of mines, the classical equation of electric drive dynamics, which is not correct, because the parameters of this class of systems in the process of lifting and lowering loads change over time; secondly, in all the considered works aimed at neutralizing elastic oscillations in the crane mechanism system when lifting / lowering the load, it is established that the variable moment of inertia of the drum on which the cable is wound and unwound to which the load is suspended is not taken into account. And the assumption that at a constant speed of rotation of the rotor of the traction motor of the crane mechanism, the linear speed of lifting / lowering the load will also be constant, is not valid. It will either increase or decrease, so the above angular velocity stabilization systems "mask" the unstable linear speeds of lifting / lowering loads;

thirdly, to ensure the serviceability of the traction induction motor during continuous operation with overload or close to overload, it is necessary to provide control of the magnitude of the phase currents of the stator to prevent deterioration of the motor characteristics or its failure.

A method for identifying a mathematical model of one class of linear dynamic systems with variable parameters, which includes a traction crane with variable parameters due to changes in the time of the moment of inertia of the flywheels and changes in the time of loading of the traction motor during lifting. The calculated relations are proposed and substantiated, by means of which the changes in time of the reduced moment of inertia of the traction electric drive, caused by winding and unwinding of the cable to which the load is suspended, on the coil connected through a reducer to the motor shaft are determined. The calculated ratios are also proposed and substantiated, by means of which changes in time of the moment of loading caused by shortening and lengthening of a cable to which the load is suspended, as a result of raising or lowering of this load are defined. A step-by-step algorithm for determining all parameters of the mathematical model of crane electric drive dynamics with time-varying moment of inertia of flywheels and moment of loading is developed. The results of modeling the dynamics of the electric drive system during acceleration, braking, steady speed, idling and reverse of the traction motor taking into account variable parameters and using a mathematical model identified by specific passport characteristics of the traction motor, reducer and cable in graphical software environment M and Sim. A comparative analysis of the obtained results is performed and it is shown that the use of the classical equation of dynamics of the electric drive system, which contains a constant moment of inertia and a constant load moment, leads to significant errors, even despite smooth speed control using frequency regulators for induction motors and power transistors. DC motors by changing the voltage applied to the armature of the motor.

The necessity of a systematic approach to the analysis of cargo moving processes by a crane is substantiated, which would take into account the change of characteristics of this process in time due to changes in the moment of inertia of the electric drive

system and the moment of loading during cargo movement, and the influence of longitudinal oscillations. the load is suspended. It is shown that ignoring these features of the process of moving loads by a crane can lead to the destruction of both loads and areas where these loads are installed, due to their impact collisions due to longitudinal oscillations in the cable to which the load is suspended. Using the structure of the ordinary differential equation with time-varying parameters, which connects the driving moment of the traction motor with the load moment and the reduced moment of inertia of the electric drive system, and the structure of the partial differential equation, which describes the process of longitudinal oscillations in the cable. load and the mass of the cable segment between the drum of its winding and the point of suspension of the load, the synthesis of a systematic mathematical model of the process of moving the load by crane, which takes into account changes in the mathematical model of this process over time due to changes in the inertia of the drive system. longitudinal oscillations that occur in the cable on which the load is suspended. An algorithm for the practical implementation of the synthesized system mathematical model of the load moving process by a crane is proposed, which allows to evaluate this process step by step in the rate of its flow.

The results of modeling the dynamics of the electric drive system during acceleration, braking, steady speed are presented. By comparing the results obtained on the simulation model with the results of experimental studies of the same class of dynamical systems performed by other authors, the adequacy of the synthesized mathematical models is proved. It is proved that the use of the classical equation of dynamics of the electric drive system, which contains a constant moment of inertia and a constant moment of loading, leads to errors in estimating the processes that accompany the lifting and lowering of loads by cranes. And this, in turn, does not allow you to accurately predict the behavior of the system in different modes.

The law of optimal control of one class of objects with parameters variable in time and space is synthesized, which includes the crane electric drive system, fragments in this electric drive system take place and the characteristics of the load moving process in time due to changes the moment of loading during the movement of

the load, and the influence of longitudinal oscillations that occur in the cable on which the load is suspended. As an optimization criterion, a functional in the form of an integral of the square of the deviations of the real angular velocity of the crane drive motor from its ideal trajectory is used. In the synthesis of the law of optimal control the created mathematical model of processes of cargo movement by the crane which structure is constructed with use as the usual differential equation with time variables connecting the driving moment of the traction electric motor with the moment of loading and the resulted moment of inertia of the electric drive system is used. differential equation in partial derivatives, which describes the process of occurrence of longitudinal oscillations in the cable due to the influence of the mass of the load and the mass of the segment of the cable between the drum of its winding and the point of suspension of the load. It is shown that the implementation of the synthesized law of optimal control of the electric crane drive achieves such characteristics of the process of moving goods that prevent the destruction of both goods and areas where these loads are installed, because the process of moving cargo is carried out without their shock contacts , to which the load is suspended. An algorithm for the practical implementation of the synthesized law of optimal control of the crane electric drive system as a dynamic object with parameters variable in time and space is proposed.

Based on the physics of the processes occurring in measuring current transformers, the existing characteristics of these processes and their mathematical models are clarified, both static, which characterize the dependence of the actual value of the output current on the input, and dynamic, from unsaturated to saturated and vice versa.

Based on the physics of processes occurring in two-stage current transformers, new models of these processes are proposed and it is shown that the generally accepted substitute circuit of a transformer of this class cannot be used to calculate its modes in a wide range of measured current changes.

Keywords: traction electric drive, hoisting mechanism, mathematical model, modeling, law of optimal control, current transformer.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] B. I. Mokin, O. B. Mokin, and O. M. Kryvonis, “Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters”, in: *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 334-337.
- [2] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 62-75, 2018.
- [3] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крану з врахуванням змін в часі моменту інерції махових мас”, *НаукПраці ВНТУ*, вип. 1, Квіт. 2020.
- [4] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Системний підхід до аналізу процесів переміщення вантажів підйомним краном”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 21-31, 2019.
- [5] B. Mokin, O. Mokin, and O. Kryvonis, “Adequacy evaluation of the synthesis of mathematical models for one class of linear dynamic systems with parameters, variable in time and in space”, *ScienceRise*, no. 5, pp. 35-43, Oct. 2020. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001486>.
- [6] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Синтез закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 38-46, 2020.
- [7] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Я. В. Хом'юк, та О. М. Кривоніс, “Уточнення характеристик процесів у вимірювальних трансформаторах струму та їх математичних моделей”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 51—57, 2017.

- [8] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Я. В. Хом'юк, та О. М. Кривоніс, “Нові моделі аналізу процесів в двокаскадних трансформаторах струму”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 38—47, 2017.
- [9] Б. І. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Аналіз основних задач та їх рішень в процесі керування електроприводами кранових механізмів”, на *XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2018.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ РУХОМ ТА РОЗРАХУНКІВ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВАНТАЖОПІДЙМАЛЬНИХ МАШИН.....	25
Аналіз процесу роботи вантажопідіймальної машини.....	25
Аналіз математичних моделювань роботи системи.....	26
Аналіз робіт, присвячених динамічним розрахункам вантажопідіймального механізму.....	34
Огляд патентної інформації, яка пов'язана з механізмом підйому вантажу кранових механізмів.....	41
Огляд оцінки перегріву тягових електродвигунів вантажопідіймальних машин.....	44
Висновки до першого розділу.....	47
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОДНОГО КЛАСУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	48
Загальне рівняння динаміки системи кранового механізму.....	48
Синтез конкретизованих математичних моделей, придатних для аналізу процесів в електромеханічних системах одного класу.....	49
Метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами.....	54
Моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крану з врахуванням змін в часі моменту інерції махових мас .	71
2.5 Висновки до другого розділу.....	73
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ, В ЯКИХ ВРАХОВУЄТЬСЯ ЗМІННІСТЬ ПАРАМЕТРІВ В ЧАСІ ТА У ПРОСТОРІ.....	75

	14
Постановка задачі оцінювання динамічної системи з параметрами, змінними в часі та у просторі.....	75
Системний підхід до аналізу процесів переміщення вантажів підйомним краном	76
Моделювання системи підйомного механізму як об'єкта з класу динамічних з параметрами, змінними в часі та у просторі.....	83
Результати моделювання роботи кранового механізму з урахуванням поздовжніх коливань у тросі, змін у часі приведенного моменту інерції махових мас та моменту навантаження.....	87
Висновки до третього розділу.....	91
РОЗДІЛ 4 ЗАКОН ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ОДНИМ КЛАСОМ ОБ'ЄКТІВ З ПАРАМЕТРАМИ, ЗМІННИМИ У ЧАСІ ТА ПРОСТОРИ	92
Синтез закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі.....	92
Аналіз отриманого закону оптимального керування.....	97
Побудова структурної схеми мікропроцесорної системи автоматичного керування	99
Висновки до четвертого розділу	102
РОЗДІЛ 5 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТРУМУ, ЩО ПРОТІКАЄ У ВТОРИННИХ ОБМОТКАХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ОДНОКАСКАДНИХ ТА ДВОКАСКАЖНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ СТРУМУ	104
Аналіз фізичних процесів, що відбуваються у вимірювальному трансформаторі струму	104
Метод аналізу електромагнітних процесів в однокаскадних трансформаторів струму	108
Математична модель оцінювання струму, що протікає у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму.....	119
Висновки до п'ятого розділу.....	135
ВИСНОВКИ	137

	15
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	142
ДОДАТКИ.....	158
Додаток А Акти впровадження результатів досліджень	159
Додаток Б Список публікацій здобувача	164

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД	- асинхронний двигун
БІМ	- безінерційне джерело моменту
ЕП	- електропривід
ЕРС	- електрорушійна сила
КМ	- крановий механізм
МК	- мікроконтролер
ППП	- пакет прикладних програм
РПМ	- регулятор пружного моменту
РШ	- регулятор швидкості
ТЕД	- тяговий електродвигун
ТС	- трансформатор струму

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Практично будь-яка галузь промисловості потребує застосування кранових механізмів в певних періодах свого технологічного процесу. Широкий спектр використання, від підйому сировини з надр землі з використанням кранових лебідок чи завантаження її на транспорт за допомогою підйомних кранів для доставлення на підприємство, завершуючи завантаженням уже виробленого продукту для реалізації. В ході транспортувань досить часто відбувається зміна виду транспорту, що також потребує використання кранових механізмів для перевантаження. З урахуванням викладеного та сучасної інтенсифікації виробництва в цілому, зменшення періоду завантаження чи перевантаження та кількості цих операцій в процесі, можуть суттєво впливати, як на швидкість, так і на вартість виготовлення продукції. А підвищення ефективності роботи крана в плані точності та плавності переміщень вантажу зменшить кількість пошкоджень як вантажу, так і майданчиків, на які ці вантажі встановлюються [86], [12], [27].

Характерною особливістю підйомних механізмів, за допомогою яких піднімають та опускають різні вантажі над землею та з глибини шахт на поверхню землі і навпаки, є наявність жорстко зв'язаних, напряду чи через редуктор з валами тягових електродвигунів, систем електропривода барабанів, на які намотуються чи з яких змотуються троси, до яких підвішуються вантажі чи порожні або завантажені скіпи, котрі необхідно підняти чи опустити [12]. А процес підйому/опускання крановим механізмом вантажу можна розділити на три періоди: розгону, усталеного руху та гальмування.

Із літератури, присвяченої дослідженням процесів в електромеханічних системах підйомних кранів, що виникають при підніманні/опусканні вантажів, зокрема і публікацій [115], [126], [132], [50], [27], витікає, що розглядається зміна кутової швидкості в тросі, на якому підвішений вантаж, в якому не виникають повздовжні коливання, завдяки яким при відриві вантажу від площини, на якій

він стоїть, чи в момент дотику вантажу до площини, на яку він ставиться, і вантаж, і площина можуть отримувати серії ударів, від яких можлива втрата вантажем своїх товарних властивостей або руйнування місця розміщення вантажу [89].

Дослідженням літератури щодо нейтралізації пружних коливань в тросі при підніманні/опусканні вантажу крановим механізмом встановлено, що в усіх розглянутих роботах не враховується змінний момент інерції барабана, на який намотується і з якого розмотується трос, до якого підвішений вантаж [86]. Пропонується використання графіка зміни кутової швидкості обертання вала тягового електродвигуна, закону зміни струму якоря тягового електродвигуна постійного струму, електромагнітний момент M_{ed} якого створюється цим струмом, і закону зміни частоти струму тягового асинхронного двигуна, електромагнітний момент якого залежить від цієї частоти, формувати з використанням рівняння динаміки електроприводу, в якому не враховується змінність в часі t приведенного моменту інерції J махових мас системи електропривода та змінність у часі моменту навантаження M_w , тобто, з використанням рівняння динаміки електропривода у вигляді $J \frac{d\omega}{dt} = M_{ed} - M_w = \Delta M$ [89]. Припущення, що при сталій швидкості обертання ротора тягового електродвигуна кранового механізму лінійна швидкість підйому/спуску вантажу також буде сталою, не є правильним і "маскує" нестабільні лінійні швидкості підйому/спуску вантажів [86].

Нині на практиці боротьба [26] з цим недоліком полягає виключно лише у зменшенні швидкості переміщення вантажів у просторі при наближенні до площадок їх складування та у керуванні в ручному режимі. А тому тема дисертаційного дослідження є актуальною науково-практичною задачею. Темою дослідження є *синтез математичних моделей* електромеханічних систем підйомних кранів і шахтних скіпових підйомників, що враховують і змінні параметри, і пружність зв'язків, та *розробка законів оптимізації процесів і реалізація систем оптимального керування електроприводами*, які реалізують ці

закони та моделі, завдяки чому можна буде підвищити швидкість переміщення вантажів без нанесення їм і площадкам їх складування механічних пошкоджень, тому дане дисертаційне дослідження є актуальним в рамках спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

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

Дисертаційна робота виконана у ході виконання науково-дослідної роботи: «Синтез законів оптимального керування процесами в об'єктах з параметрами, змінними у часі і просторі та оцінка їх ефективності» в рамках наукової школи «Розроблення математичних моделей процесів, що протікають в складних технічних та організаційних системах, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного і автоматизованого керування цими процесами», створеної Заслуженим діячем науки і техніки України, академіком Національної академії педагогічних наук України, доктором технічних наук, професором Мокіним Б. І., в процесі реалізації програм досліджень якої на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті (ЕМСАПТ) Вінницького національного технічного університету та у Національній академії педагогічних наук України виконано більше 30 держбюджетних та більше 10 госпдоговірних науково-дослідних тем.

Мета і завдання дослідження.

Мета дисертаційного дослідження полягає у підвищенні точності та ефективності функціонування електромеханічних систем підйомних кранів і скіпових підйомників з електроприводами зі змінними параметрами і пружними зв'язками.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі поставлені і розв'язані нижчевказані наукові завдання:

- здійснити аналіз наукових публікацій за темою дисертації і визначити множину завдань, які потрібно розв'язати для досягнення мети дисертаційного дослідження за сформульованою темою;

- здійснити аналіз впливу перегріву тягових електродвигунів підйомного механізму, коли той працює майже в неперервному режимі з важкими вантажами, на його характеристики;

- довести, що при сталій швидкості обертання ротора тягового електродвигуна кранового механізму швидкість піднімання/спускання вантажу не є лінійною;

- провести синтез математичних моделей одного класу електромеханічних систем зі змінними параметрами та розробити метод їх ідентифікації;

- розробити математичну модель динамічної системи, яка враховує змінність параметрів у часі та у просторі;

- провести моделювання системи підйомного механізму як об'єкта з класу динамічних з параметрами, змінними в часі та у просторі;

- розробити закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі;

- визначити застосування закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі в системах керування тяговим електродвигуном вантажопідіймальних механізмів;

- здійснити детальний аналіз фізичних процесів, що відбуваються у вимірювальних одно- та двокаскадних трансформаторах струму, та уточнити їх характеристики;

- провести синтез математичних моделей для оцінювання струму, що протікає у вторинній обмотці вимірювального одно- та двокаскадного трансформатора струму, що характеризує динаміку його роботи.

Об'єктом дисертаційного дослідження є процеси в електромеханічних системах підйомних кранів та шахтних скіпових підйомників з електроприводами зі змінними параметрами і пружними зв'язками.

Предметом дисертаційного дослідження є математичні моделі та закони оптимального керування електроприводами зі змінними параметрами і пружними зв'язками в електромеханічних системах підйомних кранів і шахтних скіпових підйомників.

Методи дослідження. Під час роботи над дисертацією використовувались методи досліджень, які базувалися: на теорії автоматичного керування, теорії систем керування електроприводами, теорії моделювання динамічних систем, теорію диференціальних рівнянь та методах математичної фізики

Наукова новизна отриманих результатів. Серед результатів, одержаних в процесі дисертаційного дослідження, наукову новизну несуть нижчевикладені:

- запропоновано метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами, в якому, на відміну від існуючих рішень, враховано змінність в часі приведенного моменту інерції махових мас і змінність в часі моменту навантаження тягового електродвигуна при підніманні (опусканні) вантажу вантажопідіймальним механізмом. Шляхом порівняльного аналізу доведено що використання класичного рівняння динаміки системи електропривода, яке містить сталий момент інерції і сталий момент навантаження, приводить до суттєвих похибок;

- уперше здійснено синтез системної математичної моделі та створено алгоритм моделювання процесу переміщення вантажу підйомним краном, з використанням синтезованої моделі що, на відміну від існуючих рішень, враховує і зміну параметрів математичної моделі цього процесу у часі, зумовлену змінами приведенного моменту інерції системи електропривода та моменту навантаження, і вплив поздовжніх коливань, які виникають у тросі, на який підвішується вантаж;

- на основі синтезованої математичної моделі процесу переміщення вантажу підйомним краном проведено комп'ютерне моделювання динаміки системи електропривода при розгоні, гальмуванні, усталеній швидкості. Шляхом зіставлення отриманих результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень цього ж класу динамічних систем, отриманих іншими авторами, доведена адекватність синтезованих математичних моделей;

- уперше синтезовано закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часі та просторі, реалізацією якого є досягнення таких

характеристик процесу переміщення вантажів, які унеможливають руйнування як вантажів, так і майданчиків, на яких ці вантажі встановлюються;

- уперше доведено, що статична характеристика трансформатора струму є не просто нелінійною з насиченням, як вважалось раніше, а нелінійною з початковим лінійним наростанням та наступною спадною ділянкою, внаслідок чого одному і тому ж струму первинної обмотки трансформатора струму фактично відповідають два різних значення струму у його вторинній обмотці, на що ніхто з науковців, які досліджували процеси в трансформаторах струму, раніше не звертав уваги.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у розробці закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі, та у застосуванні його в системах керування електроприводами вантажопідіймальної техніки для досягнення характеристик процесу переміщення вантажів, які унеможливають руйнування як вантажів, так і майданчиків, на яких ці вантажі встановлюються, оскільки процес переміщення вантажу здійснюється без їх ударних співдотиків, спричинених виникненням повздовжніх коливань в тросі, до якого підвішений вантаж.

Отримані результати доповнили також програми таких навчальних дисциплін, як «Математичні методи ідентифікації та оптимізації динамічних систем», що викладається студентам бакалаврату, та «Методологія та організація наукових досліджень», що викладається студентам магістерської підготовки. Саме ці результати дисертаційного дослідження, що націлені на розв'язання конкретних задач розроблення та використання еквівалентних моделей процесів в реальних електроприводах вантажопідіймальної техніки, передані для впровадження у АТ «Хмельницькобленерго», «ДП Старокостянтинівський лісгосп», ТОВ «Шпон Шепетівка» та ТОВ «Велес-Агро ЛТД.», що засвідчено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, авторові належать такі наукові результати: в роботі [11] – виконано імітацію у

графічному програмному середовищі Simulink пакета прикладних програм MATLAB та наведено результати моделювання динаміки системи електропривода при розгоні, гальмуванні і русі з усталеною швидкістю; в роботі [12] – показано, що класичне рівняння динаміки електропривода не може використовуватись для аналізу процесів в електромеханічних системах підйомних кранів; в роботі [86] – проведено аналіз публікацій на рахунок нейтралізації пружних коливань в системі кранових механізмів при підніманні/опусканні вантажу; в роботі [89] – розроблено алгоритм методу ідентифікації процесів, метод ідентифікації математичних моделей, якими описуються процеси піднімання і опускання вантажів підйомними кранами; в роботі [90] – виконано імітаційну модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням запропонованої моделі; в роботі [92] – розроблено алгоритм практичної реалізації синтезованого закону оптимального керування системою електропривода підйомного крана як динамічного об'єкта з параметрами, змінними в часі та просторі; в роботі [93] – алгоритм практичної реалізації синтезованої системної математичної моделі процесу переміщення вантажу підйомним краном, який дозволяє здійснити покрокове оцінення цього процесу в темпі його протікання; в роботі [95] – побудовано вихідну статичну характеристику вимірювального трансформатора струму, яка зв'язує дійсне значення струму у його вторинній обмотці з дійсним значенням струму у первинній обмотці, та запропоновано ввести цю характеристику в офіційну документацію; в роботі [96] – здійснено детальний аналіз фізичних процесів, що відбуваються у двокаскадному трансформаторі струму, та уточнено їх характеристики.

Апробація матеріалів дисертації. Результати, отримані в дисертаційному дослідженні, доповідались та обговорювались на двох наукових семінарах кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету та на двох науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників і студентів Вінницького національного технічного університету,

що проводились у м. Вінниці у 2018-2019 роках, а також на Міжнародній конференції «2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)», що проводилась у м. Київ у 2017 році, на Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)», що проводилась у м. Вінниця у 2018 році та на VIII Міжнародній науковій конференції «Фундаментальні та прикладні дослідження в сучасній науці», що проводилась у м. Харків у 2020 році.

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковані у 9 наукових роботах, із яких 6 опубліковано у наукових журналах, що входять до переліку фахових видань, 1 опубліковано у журналі, що входить до НМБ Scopus, 1 опубліковано у науковому журналі з міжнародним статусом, а 1 є тезами науково-практичної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників і студентів Вінницького національного технічного університету.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел зі 151 найменування, і додатків. Загальний обсяг дисертації складають 165 сторінок, з яких основний зміст дисертації викладено на 123 сторінках, на яких розміщено поряд із текстом 26 рисунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] F. Debrouwere, M. Vukov, and R. Quirynen, “Experimental validation of combined nonlinear optimal control and estimation of an overhead crane”, in *Preprints of the 19th world congress the international federation of automatic control cape town*, South Africa, 2014. [Online]. Available: http://ac.els-cdn.com/S1474667016431356/1-s2.0-S1474667016431356-main.pdf?_tid=9018532c-b0b2-11e6-b50a-00000aacb35f&acdnat=1479819345_71b6593420fbf4e501dde027f9a98d02. Accessed on: 16.11.2018.
- [2] Dimensioning of a drive system. Technical guide, no. 7, 2011. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/a3ef20fdc69ccc9ac12578800040ca95/ABB_Technical_guide_No_7_REVC.pdf. Accessed on: 16.11.2018.
- [3] V. Gačić, Z. Zrnić, and M. Milovančević, “Considerations of various moving load models in structural dynamics of large gantry cranes”, *FME Transactions* vol. 41, no 4, 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/286495033_Considerations_of_various_moving_load_models_in_structural_dynamics_of_large_gantry_cranes. Accessed on: 16.04.2019.
- [4] T. Haniszewski, “Konceptcja projektu stanowiska do badania zjawisk dynamicznych zachodzących podczas unoszenia ładunku”, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, Transport Politechnika Śląska*, 2015. [Online]. Available: http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element/baztech-114c4c8b-9294-4d9d-b44b-fd552f80081b/c/Haniszewski_ZN_88_2015.pdf. Accessed on: 16.11.2018.
- [5] T. Haniszewski, and D. Gąska, “Overhead traveling crane vibration research using experimental wireless measuring system”, *Transport Problems*, Gliwice, vol. 8, pp. 57-66, 2013.
- [6] Pu Hanjun, Xie Xiaopeng, Liang Guangchi, Yun Xiangyong, and Pan Haining, “Analysis for dynamic characteristics in load-lifting system of the crane”, *Procedia Engineering*, №16, pp. 586–593, 2011.

- [7] Vladić Jovan, Malešev Petar, Nostakov Rastislav, and Brkljač Nikola, “Dynamic Analysis of the load lifting”, *Journal of mechanical engineering*, №10, pp. 655–661, 2008.
- [8] Juliusz Grabski, and Jarosław Strzałko, “Dynamic analysis of the load hoisting process”, *Journal of theoretical and applied mechanics*, №4, pp. 853–872, 2003.
- [9] D. Liu, J. Yi, D. Zhao, and W. Wang, “Swing-Free Transporting of Two-Dimensional Overhead Crane Using Sliding Mode Fuzzy Control”, *Proceeding of the American Control Conference*, Boston MA, 2004. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/1cf0/84d5f43e488c5e09b0e6851360bd24402ae1.pdf>. Accessed on: 16.04.2017.
- [10] T. Matyja, and A. Śładkowski, “Modelling of the Lift Crane Vibration Caused by the Lifting Loads”, in: *Zdvihaci Zarizeni v Teorii a Praxi 2007. Sbornik prednasek konference s mezinarodni ucasti*, Brno, 2007, pp. 98-105.
- [11] B. Mokin, O. Mokin, and O. Kryvonis, “Adequacy evaluation of the synthesis of mathematical models for one class of linear dynamic systems with parameters, variable in time and in space”, *SR*, no. 5, pp. 35-43, Oct. 2020. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001486>.
- [12] B. I. Mokin, O. B. Mokin, and O. M. Kryvonis, “Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters”, in: *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 334-337.
- [13] O. Mokin, and B. Mokin, “Comparative analysis of magnetization curve models in terms of accuracy and applicability for variational optimization of electromechanical converters”, in: *2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, Dnipropetrovsk, 2015, pp. 1-4.
- [14] J. Szpytko, J. Smoczek, and D. Łakomski, “Adaptive control system of overhead crane's movement mechanisms”. [Online]. Available: <http://www.icc-conf.cz/Conference/ICCC2002/Proceedings/papers/271.pdf>. Accessed on: 16.04.2017.

- [15] И. И. Абрамович, В. Н. Березин, и А. Г. Яуре, *Грузоподъемные краны промышленных предприятий*. М.: Машиностроение, 1989.
- [16] М. Аит Адди, “Микропроцесорное управление асинхронным электроприводом подъемных механизмов”, дисс. канд. техн. наук, О., 1997.
- [17] М. П. Александров, *Подъемно-транспортные машины*. М.: Высш. шк., 1985.
- [18] М. П. Александров и др., *Грузоподъемные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование»*. М.: Машиностроение, 1986.
- [19] А. Л. Ахтулов, О. М. Кирасиров, и Е. В. Комерзан, “Теоретическое исследование и моделирование процесса разгона грузоподъемного крана мостового типа”, *Омский научный вестник*, № 1(64), с. 59–63, 2008.
- [20] В. П. Бабак, А. Я. Білецький, та А. М. Гуржій, *Сигнали і спектри*. Київ, Україна: НАУ, 2005.
- [21] Д. В. Бажутин, “Моделирование упругих колебаний конструкций крановых установок в пакете Comsol Multiphysics”, *Научные труды Винницкого национального технического университета*, № 4, с. 1–5, 2013.
- [22] Н. И. Бачурин, *Трансформаторы тока*. Л.: Энергия, 1964.
- [23] Л. Н. Бондаренко, и С. В. Ракша, “Параметры привода передвижения мостового крана в период пуска с учетом трения качения колеса по рельсу”, *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, с. 29–31, 2006.
- [24] А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.Н. Нестеров, и А.Н. Шишков, “Автоматизация режимов работы механизмов подъема кранов с асинхронными электроприводами”, *Вестник Южноуральского государственного университета. Серия „Энергетика”*, №12(7), с. 41-44, 2007.
- [25] И. Н. Бронштейн, и К. А. Семендяев, *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. Москва: Наука, 1967.

- [26] Л. Я. Будиков, *Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа*. Луганск: ВУГУ, 1997.
- [27] Будівельна техніка (довідник): Кранове електрообладнання та схеми управління кранами. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://budtehnika.pp.ua/1639-kranove-elektroobladnannya-ta-shemi-upravlnnya-kranami.html>. Дата звернення: Лист. 9, 2018.
- [28] А. А. Вайнсон, *Подъемно-транспортные машины*. М.: Машиностроение, 1989.
- [29] В. А. Вартабедян, *Загальна електротехніка: навч. посіб. 4-те вид*. Київ: Вища школа, 1986.
- [30] В.Л. Вейц, *Динамика машинных агрегатов*. Л.: Машиностроение, 1969.
- [31] С. С. Виноградов, А. В. Гордеев, и И. Ю. Муллин, “Синтез крановых электроприводов с ограничением рывка”, *Вестник УлГТУ*, №2, с. 42-48, 2012.
- [32] Г. М. Вовненко, І. А. Удовіченко, Т. Б. Вовненко, А. Ю. Сухоставець, та М. С. Фісенко, “Механізм підйому ливарного крана”, *Пат. 87867 Україна, МПК В66С 1/04. Бюл. № 4, 25.02.2014*.
- [33] И.И. Вульфсон, и М.З. Коловский, *Динамика машинных агрегатов*. Л.: Машиностроение, 1969.
- [34] В. Ф. Гайдамака, *Грузоподъемные машины*. К.: Вища школа, 1989.
- [35] В. Г. Герасимов и др., *Электротехнический справочник (в 3-х томах). Том 2. Электротехнические устройства*. М.: Энергоиздат, 1981.
- [36] Р.П. Герасимьяк, *Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов*. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [37] Р. П. Герасимьяк, и В. А. Лещёв, *Анализ и синтез крановых электромеханических систем*. О.: СМИЛ, 2008.
- [38] Ю.Б. Гладь, “Определение динамических нагрузок при подъеме длинномерных грузов многонитевым подвесом”, автореф. дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук, Л., 1986.

- [39] Н.А. Голубенцев, *Динамика переходных процессов в машинах со многими массами*. М.: Машгиз, 1959.
- [40] М.М. Гохберг, *Металлические конструкции подъемно-транспортных машин*. М.: Машиностроение, 1969.
- [41] В. В. Грабко, та Б. І. Мокін, *Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.
- [42] В. В. Грабко, В. Ю. Кучерук, та О. М. Возняк, *Мікропроцесорні процеси керування електроприводами*. Вінниця: ВНТУ, 2009.
- [43] О. В. Григоров, та В. В. Стрижак, “Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом”, *Вісник ХНАДУ*, №57, с. 249-256, 2012.
- [44] С. В. Демідас, “Мінімізація динамічних навантажень в елементах баштового крана на основі оптимізації режиму руху механізму підйому”, дис. канд. техн. наук, Київський національний університет будівництва і архітектури, 2000.
- [45] Н. А. Дербенев, “Динамическая модель совместной работы электромеханической системы механизма подъема и несущей металлоконструкции мостового крана”, *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия „Машиностроение”*, №2 (31), с. 109-114, 2006.
- [46] Н. А. Дербенев, “Конечно-элементная модель электромеханической системы механизма подъема и несущей металлоконструкции мостового крана”, *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия „Машиностроение”*, №2 (37), с. 57-60, 2007.
- [47] А.А. Дорофеев, и Л.Я. Теличко, “Математическая модель электропривода передвижения мостового крана”, *Вести высших учебных заведений черноморья*, с. 34–40, 2011.
- [48] М.Ю. Дорохов, “Динамічне гасіння коливань мостових кранів із використанням хвильових ланцюгових передач”, автореф. дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук, Х., 2007.

- [49] А. Д. Дроздов и др, *Переходные режимы работы каскадных трансформаторов тока с дополнительной ступенью*. Электричество, № 2, с. 34-41, 1973.
- [50] Электродвигун крана. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ukrbukva.net/page,4,98958-Elektrodvigatel-krana.html>. Дата звернення: Жовт. 15, 2018.
- [51] В. М. Завьялов, и А. В. Гусев, “Автоматическое ограничение динамических нагрузок электропривода подъема мостового крана”, *Известия Томского политехнического университета*, №4, с. 151-154, 2011.
- [52] В. С. Зайцев, и О. В. Харланов, “Адаптивная система управления электроприводом грузоподъемного механизма крана”, *Вісник Приазовського державного технічного університету*, №19, с.215-217, 2009.
- [53] В. С. Зайцев, та О. В. Харланов, “Система управління електроприводом вантажопідйомного механізму крана: Пат. 44047 Україна, МПК В66С 1/28”, *Пат. 44047 Україна, МПК В66С 1/28. Бюл. № 17. 10.09.2009.*
- [54] К.П. Здросис, “Керування спеціальними режимами електромеханічних систем механізмів підйому з асинхронним електроприводом”, автореф. дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук, О., 2001.
- [55] А.М. Кабанов, “Исследование динамических нагрузок механизма подъема электромагнитных кранов и некоторые пути их снижения”, автореф. на соиск. степ. канд. техн. наук, Л., 1980.
- [56] С. А. Казак, *Динамика мостовых кранов*. М.: Машиностроение, 1968.
- [57] В. Е. Казанский, *Трансформаторы тока в схемах релейной защиты*. М.: Энергия. 1969.
- [58] В. Е. Казанский, *Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики*. М.: Энергия. 1978.
- [59] В. И. Ключев, *Ограничение динамических нагрузок электропривода*. М.: Энергия, 1971.

- [60] В. Д. Ковальський, та І. В. Ковальська, “Механізм підіймання вантажу та спосіб експлуатації цього механізму: Пат. 87007 Україна, МПК В66D 1/28, В66В 15/00”, *Пат. 87007 Україна, МПК В66D 1/28, В66В 15/00. Бюл. № 11, 10.06.2009.*
- [61] К.К. Колесник, “Исследование динамики механизма подъема груза с гидравлическим приводом”, автореф. дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук, Л., 1968.
- [62] М. С. Комаров, *Динамика грузоподъемных машин.* М.: Машиностроение, 1969.
- [63] М.С. Комаров, *Нелинейные задачи динамики машин.* М.: Машиностроение, 1968.
- [64] О.Ю. Кондратюк, и А.Б. Егоров, “Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной”, *Системы обробки інформації*, Вип. 4, с. 79-86, 2006.
- [65] М. С. Корытов, В. С. Щербаков, и Е. О. Шершнева, “Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана”, *Вестник СибАДИ*, №1, с. 12-19, 2017.
- [66] М. С. Корытов, и В. С. Щербаков, “Использование синусоидальной функции для моделирования разгона и торможения груза мостового крана в режиме гашения колебаний”, *Вестник СибАДИ*, №2, с. 22-28, 2017.
- [67] Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, и М. М. Смирнов, *Уравнения в частных производных математической физики.* Москва: Высшая кола, 1970.
- [68] Е. В. Курапова, и К. П. Манжула, “К методике моделирования циклического нагружения кранов мостового типа”, *Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции.* СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012, с. 438–444.
- [69] И.А. Лагерев, “Влияние подкрановой конструкции на динамическую нагруженность мостового крана”, *Известия Тульського державного университета. Технические науки*, Вып. 3, Часть 3, с. 3-10, 2011.

- [70] И. А. Лагереv, “Методика моделирования эксплуатационной нагруженности металлоконструкции мостового крана”, *Наука и производство 2009: материалы международной научно-практической конференции*, 2009, с. 312–314.
- [71] В.А. Лещев, “Ограничение колебаний груза кранового механизма подъема при монтажных операциях”, *Электротехнические и компьютерные системы*, №7 (83), с. 22-26, 2012.
- [72] В. С. Лисенко, Т. Г. Таурит, та О.В. Могилянський, “Регулятор швидкості опускання вантажу вантажопідйомної машини: Пат. 35880 Україна. МПК В66С13/42”, *Пат. 35880 Україна. МПК В66С13/42. Бюл. № 3*, 16.04.2001.
- [73] Н. А. Лобов, *Динамика грузоподъемных кранов*. М.: Машиностроение, 1987.
- [74] В.С. Ловейкін, *Динамічна оптимізація підйомних машин*. Х.: ХДАДТУ, 2002.
- [75] В. С. Ловейкін, та Ю. О. Ромасевич, *Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів: монографія*. Київ: НУБіП України, 2015.
- [76] В. С. Ловейкін, та Ю. О. Ромасевич, “Дослідження коливань у механізмах з асинхронним електроприводом”, *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, №4(72), с. 207-214, 2013.
- [77] В.С. Ловейкін, та Ю.О. Ромасевич, “Математичне моделювання роботи механізму підйому вантажу мостового крана”, *Збірник наукових праць „Машинобудування”*, №13, с. 15-23, 2014.
- [78] В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, В. А. Голдун, та В. В. Крушельницький, *Динаміка та оптимальне керування рухом мостових кранів. Монографія*. Київ: ЦП «КОМПРІНТ», 2019.
- [79] В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, М. Г. Діктерук, та С. І. Пастушенко, *Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин*. К.-Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004.

- [80] В. С. Ловейкін, та Г. В. Шумілов, “Механізм підйому баштового крана: Пат. 53791 Україна, МПК В66С 23/16”, *Пат. 53791 Україна, МПК В66С 23/16. Бюл. № 20*, 25.10.2010.
- [81] К.С. Логвиненко, “Підвищення якості перехідних процесів складних електромеханічних систем кранових механізмів”, автореф дис. на здоб. ступ. канд техн. наук, О., 2003.
- [82] А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, и Ю. П. Сердобинцев, *Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. Пособие*. Волгоград: ВолгГТУ, 2016.
- [83] Л.М. Мамаев, А.М. Кабаков, та А.І. Пабат, “Математическое моделирование динамического гашения вибраций грузоподъемных машин”, *Вісник СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія*, № 120, с. 272-275, 2011.
- [84] А. В. Машин, и П. А. Сорокин, “Реализация алгоритма управления приводами башенных кранов при ветровых воздействиях”, *Известия ТулГУ. Технические науки*, №1, с. 186-193, 2014.
- [85] Моделирование и анализ процесса разгона мостового крана, *Вестник РГРТУ*, 2008. [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.rsreu.ru/en/component/docman/doc_download/392. Дата звернення: 16.11.2018.
- [86] Б. І. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Аналіз основних задач та їх рішень в процесі керування електроприводами кранових механізмів”, на *XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2018.
- [87] Б. І. Мокін, та О. Б. Мокін, *Модельовання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом: монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2013.
- [88] Б. І. Мокін, та О. Б. Мокін, *Теорія автоматичного керування. Методологія та практика оптимізації*. Вінниця: ВНТУ, 2013.
- [89] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі

- змінними параметрами”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 62-75, 2018.
- [90] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крану з врахуванням змін в часі моменту інерції махових мас”, *НаукПраці ВНТУ*, вип. 1, Квіт. 2020.
- [91] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крану з врахуванням змін в часі моменту інерції махових мас”, на *XIV Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)»*, Вінниця, 2018, с. 14.
- [92] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Синтез закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 38-46, 2020.
- [93] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, та О. М. Кривоніс, “Системний підхід до аналізу процесів переміщення вантажів підйомним краном”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 21-31, 2019.
- [94] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, та О. Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації динамічних систем*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.
- [95] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Я. В. Хом'юк, та О. М. Кривоніс, “Уточнення характеристик процесів у вимірювальних трансформаторах струму та їх математичних моделей”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 51—57, 2017.
- [96] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Я. В. Хом'юк, та О. М. Кривоніс, “Нові моделі аналізу процесів в двокаскадних трансформаторах струму”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 38—47, 2017.
- [97] Е. В. Найдено, “Управление электроприводом механизмов горизонтального перемещения с подвешенным грузом”, *Електромашинобудування та електрообладнання*, Вип. 69, с. 17–22, 2007.

- [98] А.Б. Неженцев, С.М. Аветисян, Л.Г. Косоногова, и С.А. Орлов, “Моделирование переходных процессов при опускании грузов кранами мостового типа”. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rusnauka.com/32_DWS_2008/Tecnic/36602.doc.htm. Дата обращения: 15.10.2014.
- [99] А. Б. Неженцев, С. М. Аветисян, и Д. В. Гонтарь, “Динамические нагрузки при передвижении мостовых кранов с частотным управлением”, *Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Přední vědecké novinky - 2013». Technická vědy. Chemie a chemická technologie: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o, № 10, с. 24–27, 2017.*
- [100] И. Г. Однокопылов, “Асинхронный электропривод механизма подъема крана мостового типа с повышенной безопасностью и живучестью”, автореф. на соиск. степ. канд. техн. наук., Томск, 2008.
- [101] Д. Ю. Орлов, “Повышение безопасности эксплуатации кранов мостового типа на основе ограничителя грузоподъемности с расширенными функциональными возможностями”, автореф. дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук., Томск, 2004.
- [102] И. А. Орловский, та Ю. С. Бут, “Уточненные математическая и имитационная модели электропривода перемещения мостового крана”, *Електротехніка та електроенергетика*, Вип. 2, с. 39–51, 2007.
- [103] М. А. Павловський, *Теоретична механіка*. Київ: Техніка, 2002.
- [104] Д. А. Паламарчук, “Дослідження руху стрілової системи крана під час пуску за законом оптимізації прискорень”, *Гірничі, будівельні, дорожні меліоративні машини*, Вип. 85, с. 21-27, 2015.
- [105] О. С. Подоляк, “Исследование динамических нагрузок при подъеме груза с жесткого основания автомобильным краном”, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, №1/5(37), с.43–47, 2009.
- [106] О. С. Подоляк, “Многофакторный анализ динамики подъема груза автомобильным краном”, *Машинобудування*, №3, с. 54–63, 2008.

- [107] О. С. Подоляк, “Підвищення техніко-експлуатаційних показників стрілових самохідних кранів застосуванням гідравлічних гасителів коливань”, автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук., Х., 2010.
- [108] О. С. Подоляк, І. І. Ісьєміні, та О. В. Чернишенко, “Саморегулювальний пристрій для зменшення динамічних навантажень вантажопідйомного механізму”, Пат. 53198 Україна. МПК В66С 1/00. Бюл. № 18, 27.09.2010.
- [109] Е. В. Попов, “Проектирование электроприводов крановых механизмов”, *Техническая коллекция Schneider Electric*, Вып. 12, 46 с., 2009.
- [110] *Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів*. Х.: Вид-во „Форт”, 2007.
- [111] *Правила расчета подъемных устройств Европейской Федерации по погрузочно-разгрузочным машинам. Раздел 1. Металлоконструкции. Раздел 2. Механизмы*. М.: ВНИИСтройдромаш, 1965.
- [112] А. М. Проскурін, та Є. П. Плавельський, *Зниження динамічних навантажень в канатах вантажопідйомних машин. Підйомно-транспортне 312 устаткування. Республ. міжвідом. наук.-техн. зб.* К.: Техніка, 1971.
- [113] Б. М. Рапутов, *Электрооборудование кранов металлургических предприятий*. М.: Металлургия, 1990.
- [114] Режими роботи механізмів кранів. *Будівельна техніка. Довідник*, 2016. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://budtehnika.pp.ua/6798-rezhimi-roboti-mehanzmv-kranv.html>. Дата звернення: Січ. 05, 2018.
- [115] Д. И. Родькин, *Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях*. М.: Недра, 1992.
- [116] Ю. О. Ромасевич, “Анализ и разработка способов учета ограничений на функцию управления движением грузоподъемных кранов”, *Motrol*, № 3, с. 123-129, 2014.

- [117] Ю. О. Ромасевич, “Динамічна оптимізація режимів руху механізмів вантажопідійомних машин як мехатронних системи”, дис. докт. техн. наук., Одеський національний політехнічний університет, 2015.
- [118] Ю. А. Ромасевич, и В. С. Ловейкин, “Оптимизация режимов движения мостовых кранов”, *Синергия*, №2, с. 73-80, 2016.
- [119] О. О. Ручка, та О. О. Ніколаєв, “Векторне управління частотно-регульованого асинхронного електроприводу”, *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, №4, с. 159-162, 2013.
- [120] В. Ф. Семенюк, “Теоретическое определение места установки гасителей колебаний металлоконструкций козловых кранов”, *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*, №48, с. 48-54, 1999.
- [121] В. Ф. Семенюк, та В. М. Лингур, “Влияние параметров пружинно-шарикового буферного устройства на динамические нагрузки мостового крана”, *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*, с. 59–66, 2014.
- [122] О. С. Симоненко, “Біротативний електропривід механізмів підйому крюкового крана та спосіб його експлуатації”, Пат. 56643 Україна, МПК В66С13/22, Бюл. № 5, 15.05.2003.
- [123] И. М. Сирота, *Переходные режимы работы трансформаторов тока*, Киев: АН УССР, 1961.
- [124] А. Сладковский, Т. Ханишевский, и Т. Матья, “Динамика мостового крана. Часть 1. Определение характеристик мостового крана”, *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, №10, частина 1, с. 150-155, 2010.
- [125] А. Сладковский, Т. Ханишевский, и Т. Матья, “Динамика мостового крана. Часть 2. Моделирование процесса подъема груза с постоянной скоростью”, *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, №10, частина 2, с. 168-177, 2010.
- [126] А. А. Смехов, и Н. И. Ерофеев, *Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами*. М.: Машиностроение, 1975.

- [127] С. Л. Смоляков, та І. І. Ісьєміні, “Захисна система вантажопідіймальних кранів у кінцевих ділянках шляху”, Пат. 69229 UA, МПК9 F 16 F 5/00, бюл. № 8, 25.04.2012.
- [128] А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, С. А. Бут, В. А. Піддубний, та В. Г. Резнік, “Пристрій для піднімання та переміщення вантажів”, Пат. 15841 UA, МПК B65B 5/10, бюл. № 7, 17.07.2006.
- [129] А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, К. В. Васильківський, С. А. Бут, та М. І. Юхно, “Пристрій для піднімання вантажів”, Пат. 36148 UA, МПК B65B5/10, бюл. № 3, 16.04.2001.
- [130] И.О. Спицына, “Исследование долговечности узлов и деталей подъемно-транспортных машин циклического действия”, дисс. доктора техн. наук, М., 1972.
- [131] Д. Н. Спицина, и А. А. Чалый, “Исследование динамики металлоконструкций козловых кранов при подъеме груза”, *Известия высших учебных заведений*, №9, с. 3-12, 2013.
- [132] Г. И. Ткаченко, А. В. Пирогов, и А. В. Мохнатый, “Исследования привода передвижения моста крана при работе в режимах противовключения”, *Металлургическая и горнорудная промышленность*, № 4, с.122–125, 2010.
- [133] В.П. Токарев, В. В. Токарев, П. М. Кирильченко, В. В. Власов, Є. В. Кукса, та Г. Г. Кабанцев, “Пристрій для захисту піднімального механізму підйомно-транспортного устаткування від перевантаження”, Пат. 19361 UA, МПК B65D 1/54, H02H 7/075, H02H 9/02, бюл. № 12, 15.12.2006.
- [134] Токовые перегрузки и их влияние на работу и срок службы электродвигателей. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://electricalschool.info/main/drugoe/379-tokovye-peregruzki-i-ikh-vlijanie-na.html>. Дата звернення: Січ. 05, 2018.
- [135] О. И. Толочко, Д. В. Бажутин, и Ф. Ф. Палис, “Гашения горизонтальных упругих колебаний конструкции мостового крана”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Теорія і практика. Тематичний випуск*, Вип. 3(19), с. 336–339, 2012.

- [136] В.Б. Фрейдлин, “Исследование влияния неустановившихся режимов на эффективность работы портовых кранов”, автореф. дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук, Л., 1974.
- [137] Характерные дефекты и повреждения металлоконструкций козловых кранов типа КПБ-10. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.drive2.ru/b/3140140>. Дата звернення: 16.11.2018.
- [138] Л. А. Хмара, А. Ф. Шевченко, М. П. Колісник, та І. С. Соколов, “Гакова підвіска”, Пат. 28879 UA, МПК В65С1/34, бюл. № 5, 06.10.2000.
- [139] Я. З. Цыпкин, *Адаптация и обучение в автоматических систем*. Москва: Наука, 1968.
- [140] В. Т. Чан, “Способы повышения эффективности гашения колебаний металлоконструкция козловых кранов”, автореф. дисс. на соиск. науч. степеня канд. техн. наук, Одесский государственный политехнический университет, 1996.
- [141] М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, и А. В. Шинянский, *Основы автоматизированного электропривода*. Москва: Энергия, 1974.
- [142] Ю. С. Швед, и И. А. Орловский, “Экспериментальные исследования и математическое моделирование асинхронного электропривода передвижения мостового крана”, *Електротехніка та електроенергетика*, №1, с. 18-27, 2013.
- [143] Т. В. Шебанова, та І. В. Шебанов, “Механізм підйому мостового крана”, Пат. 62308 UA, МПК В66С 17/00, бюл. № 12, 15.12.2003.
- [144] А. Ф. Шевченко, М. П. Колісник, та А. Л. Червоноштан, “Кранова демпфірувальна підвіска”, Пат. 10333 UA, МПК В66С 1/34, бюл. № 11, 15.11.2005.
- [145] С. І. Шевченко, “Гальмо вантажопідйомного механізму”, Пат. 25150 UA, МПК В66D 5/00”, Бюл. № 11, 25.07.2007.
- [146] М. Шеффлер, Х. Дресиг, и Ф. Курт, *Грузоподъемные краны: книга 2, под ред. М.П. Александрова [пер. С немецкого М. М. Рунов, В. Н. Федосеев]*. М.: Машиностроение, 1981.

- [147] Д. Г. Шимкович, “Динамические нагрузки при колебаниях груза на канате”, *Вестник московского государственного университета леса. Лесной вестник*. с. 141–146, 2012.
- [148] Г. В. Шумілов, “Оптимізація режиму зміни вильоту і підйому вантажу баштового крану”, дис. канд. техн. наук, Київський національний університет будівництва і архітектури, 2013.
- [149] О. М. Щеглов, та Р. В. Суглобов, “Механізм підйому вантажопідйомного крана для транспортування довгомірних вантажів”, Пат. 67732 UA, МПК В66С 1/06, бюл. № 5, 12.03.2012.
- [150] В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов, и Е. О. Шершнева, “Математическое моделирование рабочего процесса мостового крана с релейными приводами моста и грузовой тележки”, *Вестник СибАДИ*, №1, с. 28-36, 2016.
- [151] А. Г. Яуре, и Е. М. Певзнер, *Крановый электропривод: справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1988.

