

## 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; потрібне, 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 приведення моменту інерції махових мас та змінами в часі моменту навантаження тягового електродвигуна при підйманні (опусканні) вантажу. Запропоновано і обґрунтовано розрахункові співвідношення, за допомогою яких визначаються зміни в часі приведення моменту інерції тягового електропривода, зумовлені намотуванням і змотуванням троса, до якого підвішений вантаж, на катушку, 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 троса, до якого підвішений вантаж, в результаті підймання 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 winding 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.