

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 поздовжніх 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ РУХОМ ТА РОЗРАХУНКІВ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ МАШИН	25
1.1 Аналіз процесу роботи вантажопідіймальної машини	25
1.2 Аналіз математичних моделювань роботи системи	26
1.3 Аналіз робіт, присвячених динамічним розрахункам вантажопідіймального механізму	34
1.4 Огляд патентної інформації, яка пов'язана з механізмом підйому вантажу кранових механізмів	41
1.5 Огляд оцінки перегріву тягових електродвигунів вантажопідіймальних машин.....	44
1.6 Висновки до першого розділу	47
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОДНОГО КЛАСУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ	48
2.1 Загальне рівняння динаміки системи кранового механізму	48
2.2 Синтез конкретизованих математичних моделей, придатних для аналізу процесів в електромеханічних системах одного класу.....	49
2.3 Метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами	54
2.4 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

3.1 Постановка задачі оцінювання динамічної системи з параметрами, змінними в часі та у просторі	75
3.2 Системний підхід до аналізу процесів переміщення вантажів підйомним краном	76
3.3 Моделювання системи підйомного механізму як об'єкта з класу динамічних з параметрами, змінними в часі та у просторі	83
3.4 Результати моделювання роботи кранового механізму з урахуванням поздовжніх коливань у тросі, змін у часі приведенного моменту інерції махових мас та моменту навантаження.....	87
3.5 Висновки до третього розділу	91
РОЗДІЛ 4 ЗАКОН ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ОДНИМ КЛАСОМ ОБ'ЄКТІВ З ПАРАМЕТРАМИ, ЗМІННИМИ У ЧАСІ ТА ПРОСТОРИ	92
4.1 Синтез закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі.....	92
4.2 Аналіз отриманого закону оптимального керування.....	97
4.3 Побудова структурної схеми мікропроцесорної системи автоматичного керування.....	99
4.4 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
5.1 Аналіз фізичних процесів, що відбуваються у вимірювальному трансформаторі струму	104
5.2 Метод аналізу електромагнітних процесів в однокаскадних трансформаторів струму	108
5.3 Математична модель оцінювання струму, що протікає у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму	119
5.4 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 площа 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ РУХОМ ТА РОЗРАХУНКІВ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ МАШИН

1.1 Аналіз процесу роботи вантажопідіймальної машини

Широкий спектр застосування практично в будь-якій галузі промисловості вантажопідіймальних машин вимагає постійного динамічного розвитку, постановки нових, ще не вирішених задач та вдосконалення уже знайдених рішень, зокрема закону керування процесом підймання або опускання вантажу та розрахунків процесу роботи електромеханічної системи.

Кожен процес роботи кранового механізму можна розділити на три періоди [12], [27], [59]: *пуск* – підвішений вантаж чи скіп намотується на барабан чи змотується з нього, *усталений рух* – ТЕД працює зі сталою кутовою швидкістю обертання вала та *гальмування* – ТЕД зменшує свою кутову швидкість від сталої до нуля для зупинки процесу піднімання/спускання вантажу. Весь же цикл роботи КМ в більшості випадків характеризується як повторно-короткочасний [27] з великою кількістю чергувань періодів роботи механізмів і технічних пауз.

Період пуску [81] КМ характеризується процесом відривання вантажу від поверхні, якому передуює вибір зазору в механічній передачі при наявності слабини в канаті чи тросі, що є основною причиною виникнення динамічних навантажень, які діють на електропривод піднімання КМ та є найпоширенішою причиною виникнення несправностей, до 80%. Також момент відривання супроводжується, виникненням перехідного некерованого процесу коливального характеру та можливим виникненням ривків [31] при перевищенні допустимої швидкості обертання ротора тягового електродвигуна КМ, в даний момент для даної маси вантажу. Часте виникнення ривків в системі сприяє

інтенсивному накопиченню втомних пошкоджень в деталях [51] і, в результаті, виходу з ладу механізму.

В період уставленого руху [97] основним завданням є стабілізація вибраної швидкості та, при можливості, реалізація технічних рішень в плані її підвищення. Основна задача при цьому – це зменшення амплітуди маятникових коливань, які виникли в період пуску, з урахуванням впливу зовнішніх динамічних вітрових навантажень [84]. Вплив некерованих маятникових коливань на систему збільшує тривалість робочого циклу (до 20%) та ризик виникнення аварійних ситуацій [65], [118], тому вирішення поставленої задачі матиме суттєвий результат у покращенні показників швидкості.

Основним завданням періоду гальмування [127] є забезпечення посадкової швидкості для вантажу, а для процесу опускання ще і точність у його розміщенні. Тому задача, вирішення якої суттєво вплине на якість роботи КМ, – це зменшення швидкості ТЕД, за заданим математичним законом, та погашення маятникових коливань, які виникають в процесі гальмування.

Для вдосконалення цих задачі проведено аналіз уже існуючих рішень, розглянемо їх ефективність.

1.2 Аналіз математичних моделювань роботи системи

Під час аналізу публікацій на тему дисертації проведено огляд великої кількості робіт ([19], [21], [31], [37], [44], [47], [51], [66], [68], [75], [77], [83], [85], [102], [118]), присвячених математичним моделюванням процесів, що виникають в підймальних механізмах під час переміщення вантажу.

Так, у роботі [51] авторами обрано відображення моделі електроприводу піднімання КМ у вигляді двомасової механічної системи; також запропоновано застосувати в даному електроприводі безінерційне джерело моменту (рис. 1.1), як такий виступає АД з перетворювачем частоти та введені у систему регулятор пружного моменту і регулятор швидкості. А за алгоритм керування РПМ використали залежність, отриману на базі синергетичної теорії керування [51]

$$M = M_{12} + \frac{J_1}{J_2}(M_{12} - M_C) - J_1\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)(\omega_1 - \omega_2) - \frac{J_1}{T_1 T_2 C_{12}}(M_{12} - M_{12}^*), \quad (1.1)$$

де $\omega_1, \omega_2, J_1, J_2$ - кутова швидкість і момент інерції першої і другої мас;

M_{12} - моменту сили пружності;

M - потрібне значення електромагнітного моменту двигуна;

T_1, T_2 - постійні часу регулятора;

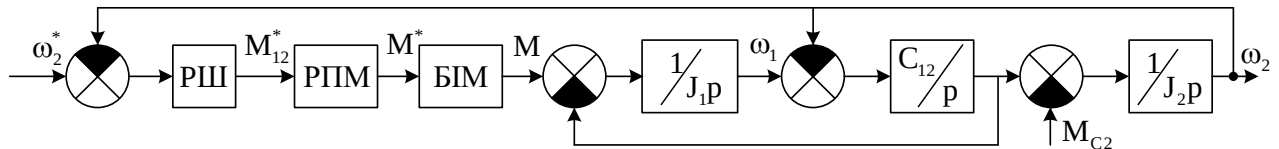


Рисунок 1.1 – Структурна схема електропривода піднімального кранового механізму

Задання значення швидкості обертання ротора ТЕД, в період вибору зазору, визначається виразом (1.2), при цьому фіксується прямо пропорційна залежність між ω_1 та M_{12}^*

$$\omega_1 = M_{12}^* \frac{1}{(T_1 + T_2)C_{12}}. \quad (1.2)$$

Також у роботі запропонований метод автоматичного обмеження динамічних навантажень в приводах підймання КМ, в результаті розрахунок кутової швидкості $\omega_{1\max}$, при якій забезпечується обмеження пружного моменту на рівні $M_{12\max}$ максимально допустимої сили натягу тросу, приведеної до вала ТЕД, обчислюється за формулою

$$\omega_{1\max} = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_1} \Delta\phi_{1\max}^2 + \frac{2}{J_1} M_{T\max} \frac{M_{12\max}}{C_{12}}}. \quad (1.3)$$

Наведена модель не дозволяє забезпечити лінійність в процесі відриву вантажу від поверхні, хоча забезпечує, при цьому, автоматичне обмеження динамічних навантажень при виборі зазору.

Обмеження величини ривка розглянуто також у роботі [31], де запропоновано на початковому етапі роботи електропривод підймання

ввімкнути як позиційний з нульовим заданням та з допомогою датчика положення, реверсного лічильника та контролера розраховувати допустимий рівень ривка і прискорення. Також запропонована структурна схема електропривода підймання з обмеженням ривка (рис. 1.2).

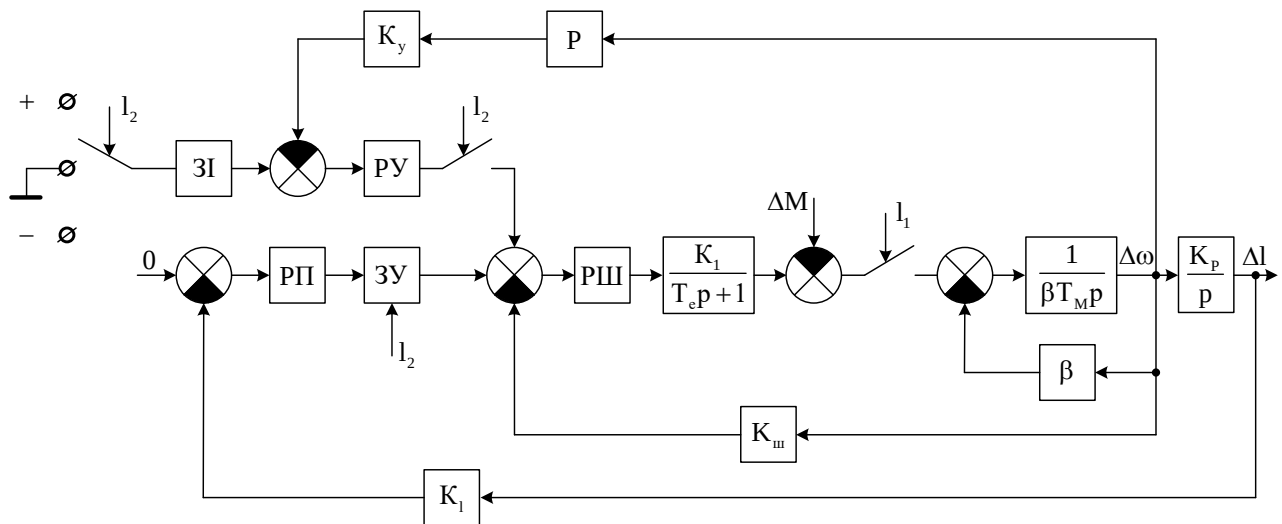


Рисунок 1.2 – Структурна схема електропривода підйому з обмеженням ривка

Визначені параметри передаточної функції регулятора положення W_{pn} в період компенсації електроприводом впливу моменту навантаження (1.4) та передаточної функції регулятора прискорення в період розгону двигуна (1.5)

$$W_{pn}(p) = K_{pn} \approx \frac{K_c}{8TK_pK_L}, \quad (1.4)$$

$$W_{KU}(p) = \frac{1/K_U}{T_U p + 1}, \quad (1.5)$$

де K_U, K_c, K_L – коефіцієнти зворотного зв'язку за прискоренням, швидкістю та положенням відповідно;

K_p – коефіцієнт редуктора,

T_U – постійна часу швидкодії контуру прискорення.

Також наведено отримані передаточні функції (1.6) та (1.7) для розглянутих періодів роботи, в яких виконаний зв'язок ривка з моментом навантаження та ривка з заданим сигналом прискорення відповідно

$$W_{p1}(p) = \frac{p^2}{T_M p (T_E p + 1) + T'_M}, \quad (1.6)$$

$$W_{p2}(p) = \frac{p(2Tp + 1) / K_U}{2Tp + 1 + (T_U p + 1)(2Tp + \alpha)}, \quad (1.7)$$

де T_E – електрична постійна часу АД;

T_M, T'_M – реальне та розрахункове значення постійної часу відповідно,

T_U – постійна часу регулятора,

$$\alpha = T_M / T'_M.$$

За результатами моделювання розглянутої моделі, з урахуванням зроблених припущень (не враховується змінні складові електромагнітних перехідних процесів в АД і перетворювачі частоти та проведена лінеаризація рівняння $M = f(\omega, U_D)$), встановлено, що забезпечується лінійність в процесі відривання вантажу.

Вирішення проблеми демпфірування коливань вантажу на пружному підвісі ([65], [150], [118], [66], [142], [75]) запропоновано у роботі [66], де наведено спосіб розгону (гальмування) вантажу в режимі повного гасіння залишкових коливань, які виникають після розгону.

Для аналітичного виведення нелінійних часових залежностей прискорення, швидкості і переміщення точки підвішування вантажу обрано математичну модель плоского маятника (1.8) та використано принцип перерахунку аналітичної часової залежності (1.9) кута відхилення вантажного троса від вертикалі в аналітичній залежності прискорення, швидкості і переміщення точки підвішування вантажу. В ході перетворень авторами отримано аналітичний вираз прискорення точки підвішування вантажу (1.10), з якого, в свою чергу, було отримати також вирази для швидкості та переміщення

$$\ddot{q} + \frac{\ddot{x}}{L} + \left(2 \cdot \frac{b}{m} \right) \dot{q} + g \cdot \frac{q}{L} = 0, \quad (1.8)$$

$$q(t) = A + A \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1.9)$$

$$\ddot{x}(t) = -g \left(A - A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega \cdot t\right) \right) - A \cdot L \cdot \omega^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega \cdot t\right) - \frac{2 \cdot A \cdot L \cdot b \cdot \omega \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega \cdot t\right)}{m}, \quad (1.10)$$

де $\ddot{q}$ – друга похідна кута відхилення вантажного троса КМ від гравітаційної вертикалі;

m – маса вантажу;

L – довжина вантажного троса КМ від рухомої точки підвішування на вантажній люльці;

b – приведений до кутової координати коефіцієнт в'язкого тертя;

g – прискорення вільного падіння;

A – амплітуда кута нахилу вантажного троса КМ під час переміщення вантажу;

$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ – циклічна частота синусоїди;

T – час розгону вантажу.

Для перевірки реакцій динамічної системи кранового механізму з вантажем та розрахованого, за наведеною математичною моделлю, впливу керування запропонована імітаційна математична модель коливань вантажу, переміщуваного крановим механізмом в окремій площині (рис. 1.3).

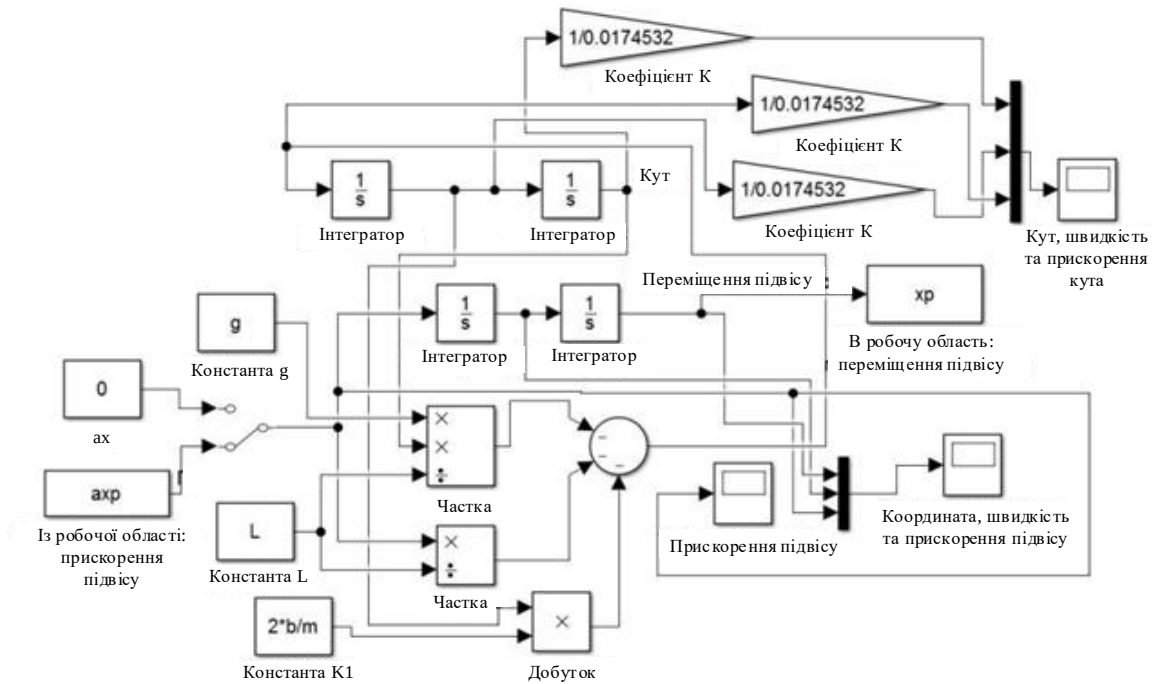


Рисунок 1.3 – Імітаційна математична модель коливань вантажу, який переміщується крановим механізмом в окремій площині, описана диференціальним рівнянням (1.10)

Також на рис. 1.4 наведений приклад часових залежностей переміщення, швидкості і прискорення точки підвішування та кута нахилу троса.

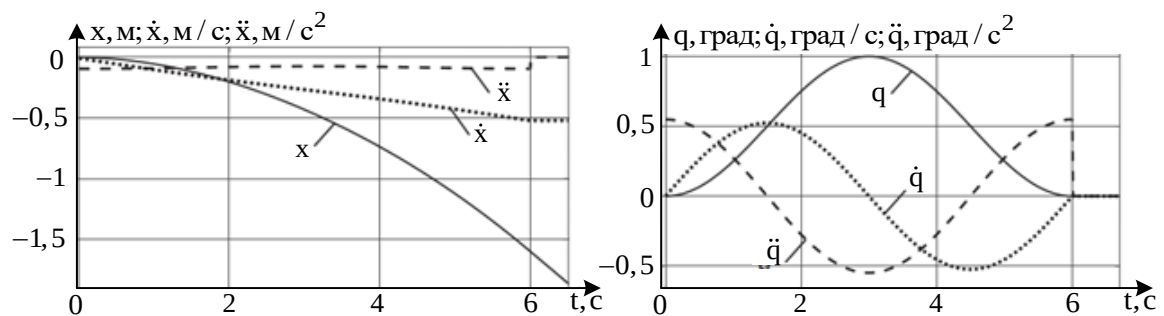


Рисунок 1.4 – Приклад часових залежностей переміщення, швидкості та прискорення точки підвісу(а), відповідні їм переміщення, швидкість і прискорення кута нахилу тросу(б)

За наведеними на рис. 1.4 результатами моделювання відмічене повне затухання поздовжніх коливань вантажного троса в кінці моменту розгону/гальмування.

Вирішення даного питання розглянуто також у роботі [118], авторами наведена розрахункова модель КМ, яка описується системою диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + m_2 \cdot \ddot{x}_2 = F - W \cdot g \cdot \sin \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l}(x_2 - x_1) = 0 \end{cases}, \quad (1.11)$$

де m_1, m_2, x_1, x_2 - приведені маси та координати центрів мас відповідно КМ та вантажу;

W, F - приведені сили опору та тяги чи гальмування, які діють на крановий механізм;

l - довжина тросу.

В ході математичних перетворень і присвоєння відповідних значень швидкості та тривалості періоду розгону була знайдена формула, яка описує енергію коливань вантажу на пружному підвісі в момент закінчення розгону кранового механізму

$$\begin{aligned} E(2 \cdot T_3 + \Delta T) = & \frac{m_2 \cdot v_1^2}{2 \cdot T_3^2 \cdot \Omega_0^2} (2 - 2 \cdot \cos(T_3 \cdot \Omega_0) - 2 \cdot \cos(\Delta T \cdot \Omega_0) + \\ & + 2 \cdot \cos((T_3 + \Delta T)\Omega_0) - \cos((2 \cdot T_3 + \Delta T)\Omega_0)\Omega_0), \end{aligned} \quad (1.12)$$

де v_1 - проміжна швидкість руху КМ;

T_3 - час розгону КМ до проміжної швидкості;

ΔT - час руху КМ на проміжній швидкості;

Ω_0 - частота власних коливань математичного маятника.

Усунення маятникових коливань вантажу в момент виходу КМ на сталу швидкість стає можливим при розв'язанні рівняння

$$E(2 \cdot T_3 + \Delta T) = 0, \quad (1.13)$$

відносно параметра. Вирішення трансцендентного алгебраїчного рівняння (1.14) подано у такому вигляді

$$\Delta T = \frac{\pi}{\Omega_0} - T_3, \quad (1.14)$$

при якому рівняння (1.15), яке характеризує енергію залишкових коливань вантажу на пружному підвісі в момент закінчення перехідного режиму руху кранового механізму, стає рівним нулю

$$E(2 \cdot T_1 + \Delta T) = \frac{288 \cdot m_2 \cdot v_1^2 \cdot \cos\left(\frac{1}{2}(T_1 + \Delta T)\Omega_0\right)^2 \cdot \left(T_1 \cdot \Omega_0 \cdot \cos\left(\frac{T_1 \cdot \Omega_0}{2}\right) - 2\sin\left(\frac{T_1 \cdot \Omega_0}{2}\right)\right)^2}{T_1^6 \cdot \Omega_0^6} \quad (1.15)$$

При аналізі фазового портрета коливань вантажу на пружному підвісі (рис. 1.5), наведеного авторами після моделювання переміщення вантажу за заданим законом, відмічається, що невеликі відхилення швидкості руху КМ від заданої швидкості викликають незначні залишкові коливання вантажу на пружному підвісі, максимальна амплітуда яких не перевищує 0,7 градуса.

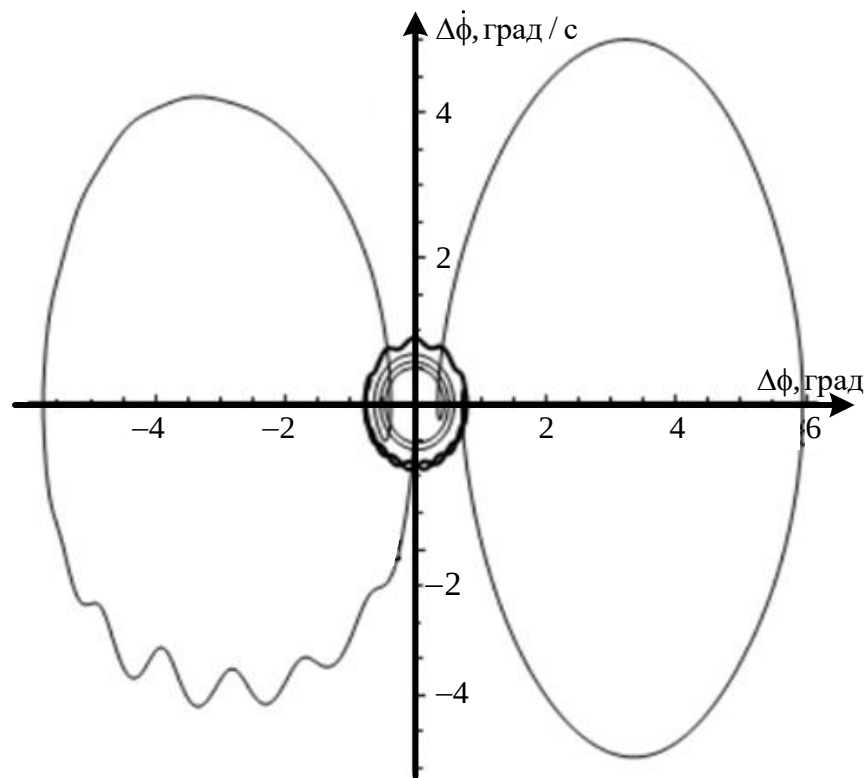


Рисунок 1.5 – Фазовий портрет коливань вантажу на пружному підвісі

Важливо також відмітити ще одну роботу «Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів» [75]. В даній монографії розглянутий розгорнутий аналіз робіт (який перехрещується з описаним в

підрозділі 1.3) з динаміки та оптимального керування мостовими кранами. Описані режими підймання/опускання вантажу «з підхвату» та «з вісу». Для першого наведена дев'ятиетапна математична модель руху динамічної системи «механізм підймання вантажу – вантаж – основа», яка враховує динаміку взаємодії вантажу та основи. Для другого синтезована багатоетапна математична модель руху «механізм підймання вантажу – вантаж». Отримані значення динамічних навантажень троса, кранового моста та основи, на яку опускається вантаж. Також проведений аналіз експериментальних даних при частотному керуванні тяговим електродвигуном КМ і встановлена доцільність застосування (порівняно з реостатним керуванням) як в технічному, так і в економічному планах.

Аналіз описаних в даному підрозділі досліджень опубліковано в авторській науковій праці [86].

1.3 Аналіз робіт, присвячених динамічним розрахункам вантажопідіймального механізму

В.Ф. Гайдамака [34] у роботі приводить розрахунок кранового механізму як двомасової динамічної моделі, яка враховує динамічні навантаження в системі, але не враховує рух зведеної маси електроприводу. При розрахунках припущено, що вантаж відривається з постійною швидкістю з місця посадки, на основі чого визначено максимальне навантаження у канаті та мості крана, а також наведено двоетапну математичну модель. Автор формулу пружного удару бере за основу для отримання методики визначення максимальних навантажень у тросі та доводить шляхом порівняння результатів двох теоретичних розрахунків, що з використанням даної методики дозволяє отримати більші навантаження у тросі. На жаль, запропонована у роботі [34] методика не враховує зміну приводного зусилля та дисипативні характеристики системи.

У роботах М. П. Александрова [17], [18] наведений розрахунок підйманні вантажу «з підхвату» а також максимальних значень зусиль в металоконструкції

крана та канаті. Наведені в роботі для розрахунку максимальних зусиль в деталях крана рівняння, на жаль, не дають змоги наочно встановити коригуванням яких саме параметрів можна зменшити небажані зусилля в крановому механізмі. Також при розрахунку прийнято, що основа, з якої підіймається вантаж, є абсолютно жорсткою.

У роботах [62], [63] М. С. Комарова наведений розрахунок мостового кранового механізму як тримасової динамічної моделі, для якої окремо знайдено рівняння руху приводу, моста та вантажу, при цьому прийнято сталою величиною зовнішнє приводне зусилля. При розрахунку підіймання вантажу не були враховані дисипативні властивості механізму.

Отримані М. С. Комаровим результати [63] можна застосовувати для динамічного розрахунку механізму підіймання вантажу в першому наближенні. Автор отримав рівняння для максимальних значень зусиль, що виникають у таких пружних об'єктах, як трос і піддатлива основа, а також дослідив три випадки роботи вантажопідіймального механізму: гальмування при опусканні (посадці) вантажу на піддатливу основу; підіймання вантажу при одночасному відриві його від піддатливої основи; підіймання вантажу з урахуванням дії його ваги на гнучкий підвіс. Для перших двох випадків кутову швидкість канатного барабана прийнято, сталою.

У роботі [56] С. А. Казаком досліджено крановий механізм щодо зміни величини динамічного навантаження, розглянуто зміну жорсткості механічної характеристики (окремо розглянуто випадок зміни її стрибкоподібно) та його вплив на динамічне навантаження системи. Також проведено аналіз впливу ударів у зачепленнях. В розрахунках механізму підіймання вантажу встановлено: вплив зміни довжини троса на його натяг та залежність зміни зусилля приводу від величини динамічного навантаження в системі. Знайдено аналітичну залежність в динамічній крановій системі для зусиль у пружних елементах; також виконаний порівняльний аналіз отриманих результатів з уже відомими.

У роботі [40] М. М. Гохбергом наведений розрахунок кранового механізму як двомасової динамічної моделі, в якій досліджено підіймання/опускання

вантажу з основи при максимальних навантаженнях. При цьому прийнято, що швидкість обертання барабана, на який намотується трос, є сталою. Окремо проведено дослідження гальмування системи в процесі опускання. Також автором виконано аналіз ефективності теоретичних методів визначення динамічного коефіцієнта деформації гнучкого підвісу. Для підтвердження адекватності запропонованих розрахунків проведено порівняння отриманих теоретичних значень зусиль, що виникають у тросі, балці кранового механізму, з експериментальними (дослідження проводилося на крані вантажопідіймальністю 5 тонн), та встановлено достатній їх збіг для практичного застосування.

У роботі [73] М. А. Лобовим проведено аналіз виникнення різниці між значеннями результатів, отриманих експериментально та теоретично при дослідженні процесу підймання вантажу. Встановлено, що незбіг спричинений неврахуванням: характеру зміни приводного зусилля, зміни модуля пружності гнучкого підвісу, жорсткості основи та виду самого вантажу. З урахуванням зазначеного, запропоновано методику для режиму підймання вантажу з основи, що дозволяє розрахувати величину максимального навантаження в деталях крана.

В наведеному вище переліку робіт прийнято, що зусилля є сталим або воно змінюється лінійно, залежно від лінійної механічної характеристики тягового електродвигуна, який, як правило, обертається зі сталою кутовою швидкістю ще до початку його навантаження. Згідно з чим можна також встановити, що швидкість намотування троса на барабан, яка задається, буде сталою.

У роботі [79] В. С. Ловейкіним, Ю. В. Човнюком, М. Д. Діктеруком та С. І. Пастушенком застосовані системи з розподіленими та зосередженими параметрами для опису кранового механізму. При розрахунку динаміки руху системи уже враховуються нелінійні ефекти, а саме: відхилення деформації троса від закону Гука та зміна його довжини. Виконано синтез режимів руху та аналіз динамічних процесів, що виникають в крановому механізмі в період роботи.

У роботі [38] Ю. Б. Гладьо подано крановий механізм як систему з розподіленими параметрами, яка за допомогою багатониткового підвісу піднімає/опускає довговимірний вантаж. За результатами даного дослідження були визначені найменші зусилля, при яких можна закріпити вантаж.

Аналіз робіт щодо динаміки виникнення, впливу та шляхів усунення коливань, які виникають при підйманні вантажу у тросі, показав, що авторами запропоновано їх усунення за допомогою різноманітних керованих або некерованих гасників (демпферів) [71], [73], [76], [101], [112], [120], [121], [140], [48], [105] – [108], [55], [100], [147], [135], а їх вплив в першу чергу спрямований на зменшення динамічних навантажень. Так у роботах [73], [120], [121], [48], [105] – [108], [55], [100] запропоновані конструктивні рішення демпферів коливань за допомогою застосування гасників коливань у металоконструкціях крана [73], [120], [121], [140], або механізмі його підйому [48], або гнучкому підвісі вантажу [73], [48], [105] – [108], [55], [100]. Розглянуто аналіз динаміки роботи [101], [120], [121], [140], [48], [105] – [108], [55], [100] та проведено розрахунок визначення оптимального місця їх встановлення [16], [54] у вантажопідіймальному механізмі. Їх же практична реалізація потребує внесення конструктивних змін у вантажопідіймальному механізмі, що не завжди є можливим чи малозатратним. Важливо також зазначити, що запропоновані методи демпферування коливань, у зв'язку з низькою швидкістю, не дозволяють усунути перші коливання вантажу в момент відриву від основи, а, відповідно, й суттєво скоригувати їх вплив на максимальне навантаження в момент пуску. При розгляді повного циклу роботи кранового механізму та впливу методів демпферування на систему відмічається їх ефективність на гасіння коливань.

У роботах [16], [36], [37], [54], [71], [81] дослідження виконувались на чолі з Р. П. Герасимяком, вантажопідіймальний механізм подано тримасовою електромеханічною системою, а результатами дослідження встановлено, що найбільший вплив на характер пружних коливань при підйманні вантажу «з підхвату» мають: кут нахилу стріли крана, жорсткість механічної

характеристики тягового електроприводу та жорсткість троса. Як і в роботах, наведених вище, для усунення коливань у тросі запропоновано застосування розроблених методів збільшення демпферувальних здатностей тягового електроприводу вантажопідіймального механізму; для реалізації яких наведено функціональну схему та алгоритм мікропроцесорного керування, що відповідають сформованим вимогам та реалізують можливість зменшення коливань при підйманні вантажу у крановому механізмі.

У роботах [120], [140] В. Ф. Семенюка та Ч. В. Тьєна запропоновано для зменшення динамічних зусиль, що виникають в деталях кранового механізму під час роботи, застосовувати в конструкції системи гасники коливань, один з яких має встановлюватись послідовно в механізм підвісу, а інший – паралельно в металоконструкцію. Дослідження динаміки роботи кранової металоконструкції та троса кранового механізму в процесі підймання/опускання вантажу виконане на основі розробленої математичної моделі.

У роботі [100] І. Г. Однокопиловим запропоновано реалізацію, на основі мікроконтролера та непрямих методів виміру маси, обмежувача перевантаження кранового механізму. Дослідження динаміки системи проведено на основі запропонованої математичної моделі тягового асинхронного електроприводу з урахуванням насичення двигуна, механічних характеристик конструкцій та троса, застосування електромагнітного гальма та керування за допомогою перетворювача частоти.

У роботі [51] В. М. Зав'ялова та О. В. Гусева наведений алгоритм реалізації системи керування тяговим електроприводом кранового механізму, згідно з яким досягається забезпечення максимально допустимої швидкості підймання/опускання вантажу відносно стабілізації динамічного навантаження в рамках невизначеності стосовно маси вантажу та неврахування коливальної складової в моменти пуску/гальмування системи.

У роботах [52], [53] В. С. Зайцева та О. В. Харланова запропоновано керування швидкістю тяговим електроприводом крана на основі системи

«перетворювач частоти – асинхронний двигун». Швидкісний режим підймання потрібно задавати пропорційно масі вантажу.

У роботах [124], [125] О. Сладковського, Т. Ханішевського та Т. Матії наведена методика дослідження мостового крана, згідно з якою було виконано моделювання об'єктів із зосередженими та розподіленими параметрами. Особливу увагу звернуто на вантажопідіймальний механізм та розглянуто пружності робочої основи, пружності конструкції балки, троса й барабана, на який намотується трос, з урахуванням, що рушійний момент на барабані постійний.

В роботі [131] Д. Н. Спіциної та О. О. Чалого проведено дослідження процесу підймання/опускання вантажу козловим краном та встановлено наявність поздовжніх і поперечних коливань кранового моста в процесі роботи. Результати дослідження відображено також графічними залежностями, які доводять наявність цих процесів при повільному їх затуханні.

В статтях [45], [46] М. А. Дербенева розглянуто вплив жорсткості пружних деталей та індуктивності тягового електродвигуна на динамічну модель механізму підймання/опускання вантажу. На цій основі та системи наведених диференціальних рівнянь виконано дослідження динамічних процесів у вантажопідіймальному механізмі. При цьому враховано, що металоконструкція балки крана є абсолютно жорсткою. Опубліковані матеріали дозволяють провести аналіз та встановити вплив тягового електродвигуна на динамічні навантаження в крановому механізмі.

В роботі [136] В. Б. Фрейдліна запропоновано для зниження динамічних навантажень у вантажопідіймальному механізмі застосовувати пристрій пуску системи у функції його прискорення. Також розглянуто використання динамічної механічної характеристики тягового електродвигуна при дослідженні вантажопідіймального механізму портового крана та засоби підвищення надійності системи.

Дослідження в елементах вантажопідіймального механізму з гідроприводом динамічних зусиль та їх залежність від жорсткості

металоконструкції та троса, характеристик гідроприводу та маси вантажу розглянуті у роботі [61] К. К. Колесника. Дослідником Д. Ю. Орловим визначено [101], що найбільший вплив на деформацію (його прогин) кранового мосту має кількість циклів підймання/опускання вантажу за весь час його роботи та довжина прольоту мостового крана. У своїх дослідженнях автор на основі непрямих методів встановлення маси вантажу виконав обмежувач вантажопідймальності, а також провів моделювання системи кранового механізму при підйманні вантажу з урахуванням зміни електромагнітного приводного моменту та кінематичних зв'язків. У роботі [24] А. М. Борисова, Г. І. Драчева, Н. Е. Ляха, О. Н. Нестерова та О. Н. Шишкова розглянута система автоматичного вибору режимів тягового електропривода при підйманні/опусканні вантажу з урахуванням зміни його швидкості та моменту тертя. Дослідження проводилися для кранових механізмів, що підіймають/опускають легкі вантажі, з застосуванням дросельного регульованого тягового асинхронного електропривода. Розрахунок значень динамічних параметрів підкранових конструкцій та розробка динамічної моделі підймання/опускання вантажу крановим механізмом, з урахуванням отриманих динамічних властивостей, наведений у роботах [69], [70] І. А. Лагерева. Дослідником О. Б. Неженцевим отримано залежність коефіцієнтів динамічності троса і балки мосту від штучної механічної характеристики тягового електродвигуна та висоти підймання/опускання вантажу, у роботах [98], [99] наведені результати дослідження в мостовому крані процесу опускання вантажу при електродинамічному гальмуванні тяговим електродвигуном.

Розглядаючи закордонні публікації на дану тему потрібно згадати роботи [1] – [10], [14], [146]. Так, авторами М. Шеффлером, Х. Дресінгом та Ф. Куртом в роботі [146] крановий механізм розглянуто як одно- та двомасову динамічну модель. Шляхом аналітичного розв'язання отримано рівняння коефіцієнтів динамічності зусиль у тросі та мості вантажопідймального механізму. Для спрощення проведений поділ динамічних процесів, що виникають в крановому механізмі під час підймання/опускання вантажу, на декілька етапів.

В роботі [6] Hanjun Pu, Xiaopeng Xie, Guangchi Liang, Xiangyong Yun, Haining Pan описано як, на основі задання характеру зміни прискорення під час усталеного руху при підймання/опускання вантажу вантажопідіймальним механізмом, досягнуто практично повне усунення динамічних навантажень у тросі. При дослідженні крановий механізм розглядається як чотиримасова динамічна модель, а в процесі моделювання отримано підтвердження адекватності отриманих результатів.

В статті [8] Juliusza Grabski та Jarosława Strzałko наведена математична модель вантажопідіймально механізму та на її основі побудовано графіки зміни зусиль в деталях вантажопідіймального механізму при зміні жорсткості дисипації в тросі. Розв'язання рівнянь виконано на основі чисельних методів.

Дослідження поширення коливань у тросі вантажопідіймального механізму описано у роботах [7], [74], також встановлено характер коливань конструкції крана значної величини. Отримання результатів вдалося на основі застосування динамічних моделей крана з розподіленими параметрами, отриманих у [26], [74], [7].

В роботах [116], [117] Ю. О. Ромасевича наведено результати дослідження динаміки підймання/опускання вантажу крановим механізмом, в яких не враховано вплив динамічної дії вантажу на майданчики, на яких ці вантажі встановлюються, що підтверджується незбігом даних, отриманих експериментально, з теоретичними.

1.4 Огляд патентної інформації, яка пов'язана з механізмом підйому вантажу кранових механізмів

Аналіз дослідження процесів, що виникають у вантажопідіймальному механізмі підйомного крана під час підймання/опускання вантажу, не буде повним без перегляду патентних робіт (винаходів на корисну модель) на дану тематику, на ці та інші патентні рішення звернуто увагу монографії [78] авторів В. С. Ловейкіна, Ю. О. Ромасевича, В. А. Голдуна, та В. В. Крушельницького.

У розглянутих патентах [72], [108], [144], [145] запропоновані гідравлічні системи, у яких досягаються зменшення динамічного навантаження у тросі у зв'язку з коригуванням швидкості прикладення сили до вантажу, що піднімається/опускається. В даних розробках також досягається зменшення динамічних навантажень у тросі, конструкції крана та коливань вантажу у вертикальному напрямку. До недоліків даних розробок можна віднести відсутність саморегулювання відносно маси вантажу, конструктивну складність при реалізації та забезпечення постійного контролю герметичності гідроканалів.

У запропонованій розробці [133] виконано пристрій для забезпечення захисту тягових електродвигунів від роботи в аварійному режимі або режимі перевантаження, який супроводжується нагрівом його обмоток, про що більш детально описано в підрозділі 1.4. Даний пристрій забезпечує відключення живлення тягового електродвигуна при перевищенні допустимих струмів статора або обриві тросів крюкової підвіски.

Запропонований тензометричний датчик маси вантажу, наведений в розробці [53], дозволяє проводити визначення оптимального прискорення та швидкості підймання/опускання вантажу. У даному винаході виконаний синтез силового електроприводу та автоматики, реалізованого на основі системи перетворювач частоти – асинхронний двигун, що дозволяє збалансувати витрати електроенергії під час його роботи та підвищити продуктивність крана.

У розробці [122] запропоновано застосування в крановому механізмі (як тягового) біротативного електродвигуна, що суттєво покращує характеристики системи при підйманні вантажу. Збільшити вантажопідйомність кранового механізму при тій же усталеній потужності можна шляхом включення декількох, залежно від маси вантажу, механізмів підйому вантажу одночасно. Даний пристрій не дозволяє коригування динамічного навантаження в механізмі підйому, що є його суттєвим недоліком.

Закон зміни гальмівного моменту для кранового механізму запропонований у розробці [145], згідно з якою в процесі гальмування запропоновано керування зміною величини гальмівного моменту. Проте дана

корисна модель не дозволяє задання зміни гальмівного моменту у часі залежно від характеру перехідного процесу в тяговому електроприводі.

Запропонована у корисній моделі [143] модифікація кранового механізму підіймання/опускання вантажу на основі ступеневого регулювання швидкості дозволяє досягти необхідної швидкості для періодів пуску, гальмування та руху з усталеною швидкістю. Проте у зв'язку з тим же ступеневим регулюванням швидкості виникають додаткові динамічні навантаження, які зменшують термін роботи троса та конструкції крана, що є суттєвим недоліком.

У розглянутих патентах [32], [149] запропоновано розв'язання проблеми виходу з ладу тягового електродвигуна в процесі підіймання/опускання вантажу шляхом використання синхронізувального вала, до якого приєднаний додатковий двигун. Це дозволяє продовжувати роботу під час ремонту основного двигуна або виведення крана в ремонт після опускання вантажу.

Патентами [128], [129], [138] вирішено проблему обмеження динамічних навантажень в крановому механізмі, які виникають в періоди пуску та гальмування. Так, у розробці [128] це досягається шляхом модифікації конструкції механізму підіймання вантажу. У другій роботі [129] пропонується розроблений спеціальної форми барабан, на який намотується трос, в даному патентному рішенні також досягнуто забезпечення плавності зміни кутової швидкості в моменти пуску. У патенті [138] для обмеження тих же динамічних навантажень пропонується для гасіння коливань вантажу застосовувати у підвісці такий демпфірувальний елемент, який створює додаткові сили внутрішнього тертя.

Важлива задача підвищення надійності вантажних тросів поставлена у розробці [60], яка вирішується шляхом побудови на крановому механізмі конструкції зі зрівнювальним блоком, по якому в процесі переміщення вантажу постійно рухається трос. При цьому розробка є складна для реалізації та зменшує ККД модифікованого крана.

Для баштового крана реалізовано технічне рішення в патенті [80], в якому пропонується на основі використання противаги, яка в процесі

підіймання/опускання вантажу рухається вздовж башти та з'єднана з вантажопідіймальним механізмом, отримання покращених характеристик щодо зменшення тягового моменту, що його створює електродвигун в процесі підіймання вантажу, та відповідно і зменшення електроспоживання.

В результаті аналізу патентних винаходів щодо розробки систем керування тяговим крановим електроприводом встановлено, що вони практично відсутні. Більшість розробок спрямовано на конструктивну модифікацію вантажопідіймального механізму крана.

1.5 Огляд оцінки перегріву тягових електродвигунів вантажопідіймальних машин

Однією з причин перегріву тягового електродвигуна вантажопідіймальних машин є перевантаження (технологічного походження) електродвигуна. Механічні перевантаження на валу двигуна викликає симетричне струмове перевантаження. Його значення безпосередньо пов'язане з режимами роботи двигуна і тепловим перевантаженням [28], [30], [33], [39], [148].

Перевантаження зазвичай не викликають перегрівання обмоток електродвигуна, що мають порівняно велику теплову інерцію. Однак при досить тривалій й неодноразовій повторності створюється небезпечний нагрів електродвигуна, на який має реагувати «захист» та відключати його [134].

В інших випадках, розглядаючи саме асинхронний двигун [36], оскільки він найчастіше використовується в кранових механізмах, напруга і фазні струми його тісно взаємопов'язані, бачимо, що будь-які, навіть невеликі, зміни напруги викликають значні зміни фазних струмів [64] (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Вплив відхилень показника якості електроенергії (ПЯЕ) на роботу асинхронного двигуна

Вид ПЯЕ	Характер зміни ПЯЕ, зміни в роботі АД	
	Зниження на 10% від U_n	Перевищення на 10% від U_n

Відхилення напруги	Момент двигуна знижується на 19%. Температура підвищується на 7 °С. Збільшується час пуску. Ковзання підвищується на 27,5%, струм ротора – на 14%, струм статора – на 10%.	Збільшення моменту двигуна служить причиною перевантаження валів, ремінних передач, збільшується пусковий удар. Пусковий струм підвищується на 12%, обертальний момент – на 21%, коефіцієнт потужності знижується на 5%
Несиметрія напруг у трифазній системі (перекіс фаз)	Недопустимий перекіс напруг по фазах викликає ті ж процеси, що і при відхиленні напруги. Тривала робота на межах коефіцієнтів при навантаженні менше номінальної знижує термін служби на 10–15%, при номінальному навантаженні – вдвічі. Якщо перекіс становить 50%, термін служби знижується в 5–10 разів.	
Несинусоїдальність напруги	При коефіцієнті несинусоїдальності 10%, сумарні втрати зростають на 10–15%. Зростає число гармонік зворотної послідовності, знижується коефіцієнт потужності. Перевищення допустимих значень коефіцієнтів 2-ї, 5-ї та 8-ї гармонік веде до значного зростання напруги зворотної послідовності, що призводять до перегріву двигуна і швидкого виходу його з ладу, виникнення зворотнообертових магнітних полів, що створюють паразитні моменти, які погіршують механічну характеристику. Перевищення допустимих значень гармонік кратним 3 (3 і 9) приводить до зростання напруги нульової послідовності, що викликає асиметрію напруг по фазах. При асиметрії більше 15% робочий і пусковий моменти знижується на 25%, зростає споживання з мережі реактивної потужності на 3–7%. Зростання допустимих значень гармонік прямої послідовності 4 і 7 призводить до зростання активного опору ротора і погіршення механічної характеристики.	

Для ефективного захисту асинхронного двигуна необхідно вимірювати фазні струми якомога точніше. Згідно з дослідженнями, тривала робота двигуна зі струмовим перевантаженням всього лише на 5% від номінального скорочує термін його служби в 10 разів. В зв'язку з суттєвою несинусоїдальністю кривої струму, особливо під час пусків, в ній присутня велика кількість гармонік вищого порядку, що істотно впливають на величину дійсного значення струму. Тому, якщо приймати рішення про роботу асинхронного двигуна не за обчисленими діючими значеннями струму, а за деякими усередненими сигналами або, ще

гірше, за піковими значеннями, це може привести до помилкових висновків про наявність чи відсутність струмового перевантаження [64].

Велика частина струмових аварій асинхронного двигуна пов'язана, в першу чергу, з пошкодженнями всередині самого двигуна, що приводять до несиметричного струмового перевантаження. Розглянемо основні види таких аварій (табл. 1.2) [64].

Таблиця 1.2 - Вплив внутрішніх пошкоджень на роботу асинхронного двигуна

Вид аварії	Зміни струмів		Характер зміни в роботі двигуна
Обрив 1 фази в обмотці статора	З'єднання обмотки зіркою	Струм в обірваній фазі відсутній. У двох інших – $1,5 \cdot I_n$	Поле з обертового перетворюється в пульсуюче. У двигуні, що працює при навантаженні, яке дорівнює $1/2$ номінального, робочі струми збільшуються на 15–20%, частота знижується незначно.
	З'єднання обмотки трикутником	Струм в обірваній фазі відсутній. У двох інших – значно більший номінального.	Момент близький до номінального, але, при сильному нагріванні двох робочих обмоток, I_1 в одному з живильних провідників буде в $\sqrt{3} = 1,7$ разів більший, ніж в двох інших.
Міжвиткові замикання у фазі обмоток статора	I_f , що підходить до пошкодженої фази зростає в багато разів (його величина визначається кількістю витків, замкнутих накоротко).		Двигун обертається з пониженою швидкістю.
Міжфазні замикання обмоток статора	Призводять до протікання по обмотках, мережі струмів короткого замикання, які в 10–100 разів перевищують номінальні струми.		Обмотки статора швидко нагріваються.

1.6 Висновки до першого розділу

За результатами проведеного дослідження всіх розглянутих робіт, скерованих 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 змотується 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 приведені системи стабілізації кутової швидкості «маскують» нестабільні лінійні швидкості підймання/опускання вантажів.

Для оцінювання перегріву тягових електродвигунів підйомного механізму, коли той працює майже в неперервному режимі з важкими вантажами, потрібно проводити вимірювання та контроль величини фазних струмів статора з використанням трансформатора струму.

Текст першого розділу дисертації складено з використанням авторських наукових публікацій [86].

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОДНОГО КЛАСУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

2.1 Загальне рівняння динаміки системи кранового механізму

Внаслідок намотування троса на барабан, жорстко зв'язаний з валом тягового електродвигуна, або змотування троса з цього барабана змінює в часі приведений момент інерції тягового електродвигуна. А внаслідок укорочення троса між барабаном та вантажем змінюється момент навантаження на тяговий електродвигун, тому для електроприводів цього класу електромеханічних систем для аналізу їх динаміки замість звичного рівняння [115]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(t) - M_w \quad (2.1)$$

в якому ω – кругова швидкість обертання вала тягового електродвигуна, J – приведений до цього валу момент інерції, $M(t)$ – тяговий момент, створюваний в часі t цим електродвигуном, а M_w – момент навантаження, створюваний підвішеним на тросу вантажем, для якого потрібно щоб виконувалися умови, що

$$\Delta M = \text{Const} \quad (2.2)$$

на ділянках розгону і гальмування та

$$\Delta M = 0 \quad (2.3)$$

на ділянці руху зі сталою кутовою швидкістю, а також

$$J = \text{Const} \quad (2.4)$$

на усіх ділянках, потрібно використовувати більш загальне рівняння динаміки

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M(t) - M_w(t), \quad (2.5)$$

еквівалентом якого після розкриття похідної від добутку двох функцій є рівняння

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = J(t) \frac{d\omega}{dt} + \omega(t) \frac{dJ}{dt} = M_{ed} - M_w(t) = \Delta M(t), \quad (2.6)$$

яке враховує і змінність в часі моменту інерції і змінність в часі моменту навантаження.

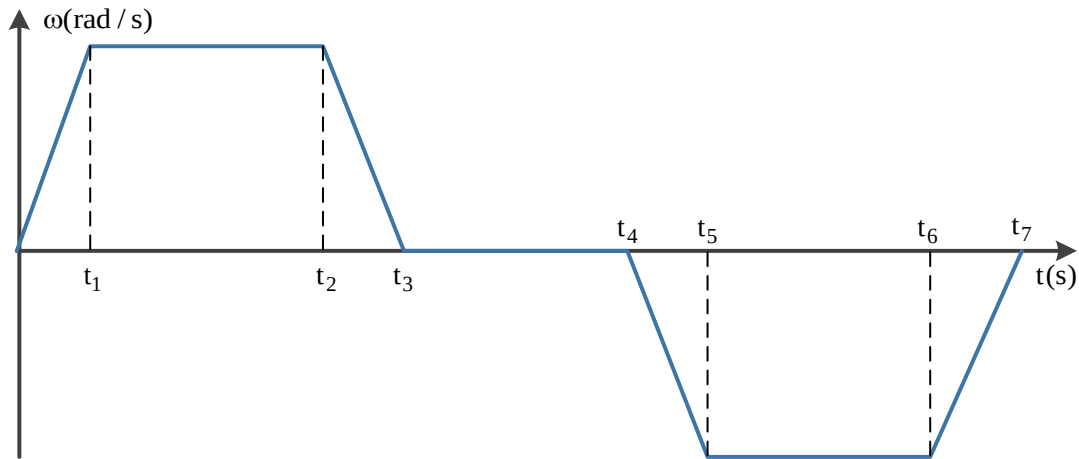
Тож саме це рівняння (2.6) необхідно використовувати як математичну модель динаміки системи електропривода при синтезі закону керування процесом підйому або опускання вантажу підйомним краном.

Але для того, щоб цю математичну модель (2.6) можна було використовувати при практичному синтезі відповідних законів керування, в ній необхідно конкретизувати функції $J(t)$, $\frac{dJ}{dt}$, $M_g(t)$. Тому далі в підрозділі 2.2 буде розглянута задача синтезу конкретизованих математичних моделей, придатних для аналізу процесів в електромеханічних системах вказаного класу, з використанням як базової математичну модель зі змінними параметрами (2.6).

Наведені матеріали із різним ступенем деталізації та визначення рівняння, з врахуванням умов [13], [87] отримання найбільшої точності при моделюванні, моменту створюваного тяговим електродвигуна опубліковано в роботі [12].

2.2 Синтез конкретизованих математичних моделей, придатних для аналізу процесів в електромеханічних системах одного класу

Розпочнемо вирішення поставленої задачі з розгляду типового графіка робочого циклу тягового електродвигуна підйомного крана в процесі підймання або опускання вантажу, побудова якого впливає з публікацій [27], [50], [115], наведеного на рис. 2.1.



Рисунку 2.1 Графік робочого циклу тягового електродвигуна підйомного крана в процесі підйому або опускання вантажу

Із цього графіка видно, що на відрізку часу $[0, t_1]$ від моменту пуску тягового електродвигуна до виходу у момент t_1 на сталу кругову швидкість ω_s обертання вала трос, на якому підвішений вантаж, намотується на барабан чи змотується з нього зі сталим кутовим прискоренням, тобто має місце залежність

$$\frac{d\omega}{dt} = \text{const}. \quad (2.7)$$

А це означає, що зі сталим прискоренням у часі буде змінюватись і приведений момент інерції J тягового електродвигуна, який при намотуванні троса на барабан буде збільшуватись, а при змотуванні троса з барабана буде зменшуватись, тобто матиме місце залежність

$$\frac{d^2 J}{dt^2} = \text{const}, \quad (2.8)$$

з якої подвійним інтегруванням отримаємо функцію

$$J(t) = J_0 + c_1 t + \frac{c_2}{2} t^2 \quad (2.9)$$

при намотуванні троса на барабан та функцію

$$J(t) = J_0 - c_1 t - \frac{c_2}{2} t^2 \quad (2.10)$$

- при змотуванні троса з барабана.

Аналогічно, на цьому ж відрізку часу $[0, t_1]$ зі сталим прискоренням у часі буде змінюватись і момент навантаження M_w на тяговий двигун, який при намотуванні троса на барабан буде зменшуватись, а при змотуванні троса з барабана буде збільшуватись, тобто, матиме місце залежність

$$\frac{d^2 M_w}{dt^2} = \text{const} \quad (2.11)$$

з якої подвійним інтегруванням отримаємо функцію

$$M_w(t) = M_{w0} - \alpha_1 t - \frac{\alpha_2}{2} t^2 \quad (2.12)$$

при намотуванні троса на барабан та функцію

$$M_w(t) = M_{w0} + \alpha_1 t + \frac{\alpha_2}{2} t^2 \quad (2.13)$$

- при змотуванні троса з барабана.

Підставляючи вирази (2.9) і (2.12) в рівняння (2.6), отримаємо рівняння

$$\begin{aligned} \left(J_0 + c_1 t + \frac{c_2}{2} t^2 \right) \frac{d\omega}{dt} + (c_1 + c_2 t) \omega = \\ = M(t) - M_{w0} + \alpha_1 t + \frac{\alpha_2}{2} t^2, \end{aligned} \quad (2.14)$$

яке являтиме собою математичну модель процесу в електромеханічній системі даного класу на відрізку $[0, t_1]$ при намотуванні троса на барабан, тобто при підйманні вантажу підйомним краном, а підставляючи вирази (2.10) і (2.13) в рівняння (2.6), отримаємо рівняння

$$\begin{aligned} \left(J_0 - c_1 t - \frac{c_2}{2} t^2 \right) \frac{d\omega}{dt} - (c_1 + c_2 t) \omega = \\ = M(t) - M_{w0} - \alpha_1 t - \frac{\alpha_2}{2} t^2, \end{aligned} \quad (2.15)$$

яке являтиме собою математичну модель процесу в електромеханічній системі даного класу на відрізку $[0, t_1]$ при змотуванні троса з барабана, тобто при опусканні вантажу підйомним краном.

Тепер розаглянемо відрізок часу $[t_1, t_2]$ на графіку робочого циклу, наведеному на рис. 2.1, на якому тяговий електродвигун працює зі сталою кутовою швидкістю ω_s обертання вала, тобто має місце залежність

$$\omega_s = \text{const} \quad (2.16)$$

А це означає, що зі сталою швидкістю у часі буде змінюватись і приведений момент інерції J тягового електродвигуна, який при намотуванні троса на барабан буде збільшуватись, а при змотуванні троса з барабана буде зменшуватись, тобто матиме місце залежність

$$\frac{dJ}{dt} = \text{const}, \quad (2.17)$$

з якої інтегруванням отримаємо функцію

$$J(t) = J_1 + c_1(t - t_1) \quad (2.18)$$

при намотуванні троса на барабан та функцію

$$J(t) = J_1 - c_1(t - t_1) \quad (2.19)$$

при змотуванні троса з барабана.

Аналогічно на цьому ж відрізку часу $[t_1, t_2]$ зі сталою швидкістю у часі буде змінюватись і момент навантаження M_w на тяговий двигун, який при намотуванні троса на барабан буде зменшуватись, а при змотуванні троса з барабана буде збільшуватись, тобто матиме місце залежність

$$\frac{dM_w}{dt} = \text{const}, \quad (2.20)$$

з якої інтегруванням отримаємо функцію

$$M_w(t) = M_{w1} - \alpha_1(t - t_1) \quad (2.21)$$

при намотуванні троса на барабан та функцію

$$M_w(t) = M_{w1} + \alpha_1(t - t_1) \quad (2.22)$$

при змотуванні троса з барабана.

Підставляючи вирази (2.18) і (2.21) в рівняння (2.6), отримаємо рівняння

$$(J_1 + c_1(t - t_1)) \frac{d\omega}{dt} + c_1\omega = M(t) - M_{w1} + \alpha_1(t - t_1) \quad (2.23)$$

Та, провівши відповідні перетворення отримаємо рівняння

$$(c_1 + c_2(t - t_1))\omega = M(t) - M_{w1} + \alpha_1(t - t_1), \quad (2.24)$$

яке являтиме собою математичну модель процесу в електромеханічній системі даного класу на відрізку $[t_1, t_2]$ при намотуванні троса на барабан, тобто при підйманні вантажу підйомним краном, а підставляючи вирази (2.19) і (2.22) в рівняння (2.6), отримаємо рівняння

$$(J_1 - c_1(t - t_1))\frac{d\omega}{dt} - c_1\omega = M(t) - M_{w1} - \alpha_1(t - t_1) \quad (2.25)$$

та, провівши відповідні перетворення,

$$-(c_1 + c_2(t - t_1))\omega = M(t) - M_{w1} - \alpha_1(t - t_1), \quad (2.26)$$

яке являтиме собою математичну модель процесу в електромеханічній системі даного класу на відрізку $[t_1, t_2]$ при змотуванні троса з барабана, тобто при опусканні вантажу підйомним краном.

А далі розглянемо відрізок часу $[t_2, t_k]$ на графіку робочого циклу, наведеному на рис. 2.1, на якому тяговий електродвигун зменшує свою кутову швидкість від ω_s до нуля для зупинки процесу підймання та опускання вантажу. Очевидно, що і на цьому відрізку будуть справедливими співвідношення (2.10), (2.8) та (2.11). А тому і математичні моделі процесів підймання вантажу та його опускання, які отримаємо на основі того ж ланцюга силогізмів, що використаний при розгляді відрізка $[0, t_1]$, будуть відрізнятись від математичних моделей (2.14) та (2.15) в загальному вигляді лише індексами при початкових значеннях моменту інерції і моменту навантаження та точками початку відліку часу, тобто ці математичні моделі матимуть вигляд

$$\begin{aligned} & \left(J_0 + c_1(t - t_2) + \frac{c_2}{2}(t - t_2)^2 \right) \frac{d\omega}{dt} + \\ & + (c_1 + c_2(t - t_2))\omega = M(t) - M_{w2} + \\ & + \alpha_1(t - t_2) + \frac{\alpha_2}{2}(t - t_2)^2 \end{aligned} \quad (2.27)$$

для процесу в електромеханічній системі даного класу на відрізку $[t_2, t_k]$ при намотуванні троса на барабан, тобто при підйманні вантажу підйомним краном,
і

$$\left(J_0 - c_1(t - t_2) - \frac{c_2}{2}(t - t_2)^2 \right) \frac{d\omega}{dt} - (c_1 + c_2(t - t_2))\omega = M(t) - M_{w2} - \alpha_1(t - t_2) - \frac{\alpha_2}{2}(t - t_2)^2 \quad (2.28)$$

для процесу в електромеханічній системі даного класу на відрізку $[t_2, t_k]$ при змотуванні троса з барабана, тобто при опусканні вантажу підйомним краном.

Для того, щоб здійснити ідентифікацію синтезованих математичних моделей, потрібно ще визначитись з виразами для моменту $M(t)$, створюваного тяговим електродвигуном, що буде виконано у підрозділі 2.3.

Текст даного підрозділу дисертації складено з використанням авторських наукових публікацій [12].

2.3 Метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами

Проведем трансформацію рівнянь (2.24) і (2.26) на відрізках часу $[t_1, t_2]$ і $[t_5, t_6]$. У зв'язку з тим, що на цих відрізках кутова швидкість обертання ротора тягового електродвигуна є величиною сталою, то похідна від неї дорівнює нулю, а тому математична модель (2.6) трансформується у рівняння (2.24) при підйманні вантажу та у рівняння (2.26) – при його опусканні за умови, що процес опускання теж віднесено до відрізка часу $[t_1, t_2]$.

А далі розглянемо питання, за яких умов доцільним є моделювання моменту навантаження M_w , створюваного вантажем, який піднімається чи опускається підйомним краном, та приведеного моменту інерції J системи кранового електропривода з використанням виразів (2.9), (2.12) та

$$M_w(t) = M_w(t_1) - \alpha_1(t - t_1), \quad (2.29)$$

$$M_w(t) = M_w(t_2) - \alpha_1(t - t_2) - \frac{\alpha_2}{2}(t - t_2)^2, \quad (2.30)$$

$$J(t) = J(t_1) + c_1(t - t_1), \quad (2.31)$$

$$J(t) = J(t_2) + c_1(t - t_2) + \frac{c_2}{2}(t - t_2)^2, \quad (2.32)$$

при підніманні вантажу, та виразів

$$M_w(t) = M_w(t_5) + \alpha_1(t - t_5), \quad (2.33)$$

$$M_w(t) = M_w(t_4) + \alpha_1(t - t_4) + \frac{\alpha_2}{2}(t - t_4)^2, \quad (2.34)$$

$$M_w(t) = M_w(t_6) + \alpha_1(t - t_6) + \frac{\alpha_2}{2}(t - t_6)^2, \quad (2.35)$$

$$J(t) = J(t_5) - c_1(t - t_5), \quad (2.36)$$

$$J(t) = J(t_4) - c_1(t - t_4) - \frac{c_2}{2}(t - t_4)^2, \quad (2.37)$$

$$J(t) = J(t_6) - c_1(t - t_6) - \frac{c_2}{2}(t - t_6)^2, \quad (2.38)$$

при опусканні вантажу.

Розглянемо спочатку вирази (2.29) та (2.33). Момент навантаження створюється силою ваги P_w вантажу масою m_w та масою m_T того відрізка троса, що міститься між вантажем та катушкою, на яку трос намотується при підйманні вантажу чи з якої трос розмотується при опусканні вантажу, перемноженою на радіус R_K кола намотки на катушку, тобто,

$$M_w = P_w R_K = m_w g R_K, \quad M_T = P_T R_K = m_T g R_K, \quad (2.39)$$

де g - прискорення вільного падіння.

Але, оскільки сила ваги за рахунок зміни маси троса, обумовленої скороченням цього відрізка при намотуванні троса на катушку або його збільшенням при розмотуванні троса з катушки, теж змінюється, то відповідно змінюється і навантажувальний момент. І якщо кутова швидкість обертання вала катушки є сталою в часі, то і зміна маси відрізка троса та зміна сили ваги і навантажувального моменту, нею створеного, отримують лінійний приріст в часі при опусканні вантажу або лінійне зменшення в часі при підйманні вантажу, що приводить до появи лінійних членів у виразах (2.29) та (2.33).

Що ж до відрізків часу на графіку, наведеному на рис. 2.1, на яких вантаж підіймається чи опускається зі сталим додатним або від'ємним кутовим

прискоренням, то у цьому випадку моделювати зміну в часі навантажувального моменту формально уже потрібно проводити з використанням виразів (2.9), (2.30) та (2.34), (2.35), в яких сталє кутове прискорення обумовлюватиме появу квадратичних членів.

А розглядаючи вирази (2.12), (2.31), (2.32) та (2.36), (2.37), (2.38), якими пропонується моделювати приведений момент інерції системи кранового електропривода з урахуванням змінної маси котушки, обумовленої намотуванням (розмотуванням) на неї тросу, то легко бачити, що формально лінійні члени в цих виразах зумовлені зміною маси та радіуса котушки при сталій кутовій швидкості обертання цієї котушки, а квадратичні – зміною маси та радіуса котушки при намотуванні чи розмотуванні з нього троса при сталому кутовому прискоренні.

Цілком зрозуміло, що моделювати процес підймання чи опускання вантажу підйомним краном з використанням математичних моделей (2.14), (2.15), (2.24), (2.26)–(2.28) можна лише після ідентифікації математичних моделей (2.9), (2.12), (2.29) – (2.38), якими описуються зміни в часі навантажувального моменту та приведенного моменту інерції махових мас кранового електропривода. Але, у свою чергу, ідентифікувати моделі (2.9), (2.12), (2.29)–(2.38) можна, лише використовуючи параметри конкретного підйомного крана та його електропривода. Однак для побудови алгоритму ідентифікації математичної моделі, придатної для розрахунку числових значень її параметрів при довільному виборі складових системи тягового електропривода підйомного крану, ми будемо задавати усі паспортні дані в загальному вигляді символічно, не конкретизуючи їх чисельно. А тому нехай функціонування підйомного крана характеризується такими параметрами: максимальна висота підймання вантажу дорівнює h , діаметр троса, до якого підвішується вантаж, D_T , маса його погонного метра дорівнює m_{MT} , діаметр котушки, на яку намотується трос під час підймання вантажу, D_K , маса котушки дорівнює m_K , передатне число редуктора, яким тягове зусилля від електродвигуна передається на котушку троса, дорівнює z , відстань між осями редуктора, одна з яких з'єднана з

валом тягового електродвигуна, а інша – з котушкою, на яку намотується трос, до якого підвішено вантаж, l , кількість паралельно розміщених осей у редукторі дорівнює $k = 5$, відстань між осями l_{ba} , радіус більшої шестерні на осі дорівнює r_{bg} , маса більшої шестерні на осі дорівнює m_{bg} , радіус меншої шестерні на осі дорівнює r_{sg} , маса меншої шестерні на осі дорівнює m_{sg} , а потрібні для ідентифікації паспортні характеристики тягового асинхронного електродвигуна становлять: номінальний момент дорівнює M_N , момент інерції дорівнює J^* , синхронна кутова швидкість обертання ротора дорівнює ω_c ; номінальне ковзання дорівнює s_N , критичне ковзання дорівнює s_{kr} , пусковий момент дорівнює $M_p = q_p M_N$, максимальний момент дорівнює $M_{max} = q_{max} M_N$, де, залежно від типу електродвигуна, $q_p \in [1,1 - 2]$, $q_{max} \in [1,5 - 2,5]$.

Зауважимо, що всі величини задаємо в одній і тій же системі одиниць СІ.

Нехай кран піднімає масу m_w на висоту h . Використовуючи наведені вище параметри та відомі з теоретичної механіки [103] і теорії електропривода [141] співвідношення, знайдемо, що момент навантаження M_w^* , створюваний цією масою при її підйманні, віднесений до осі котушки, на яку намотується трос, до якого підвішено вантаж, становитиме

$$M_w^* = P_w \frac{D_K}{2} = m_w g \frac{D_K}{2} \text{ (Нм)}, \quad (2.40)$$

а максимальний момент навантаження M_T^* , створюваний масою троса в нижній точці, з якої починається підймання вантажу, становитиме

$$M_T^* = m_{MT} h \cdot g \frac{D_K + D_T}{2} \text{ (Нм)}. \quad (2.41)$$

Тож у виразі (2.34) параметр $M_w(t_4)$ становитиме

$$M_w(t_4) = M_w^* \frac{\eta_N}{z} \text{ (Нм)}, \quad (2.42)$$

а у виразі (2.9) –

$$M_{w0} = (M_w^* + M_T^*) \frac{\eta_N}{z} \text{ (Нм)}. \quad (2.43)$$

В паспортах електричних двигунів часто кутову швидкість обертання вала задають в оборотах за хвилину n_c , а тому синхронна кутова швидкість ω_c обертання вала тягового електродвигуна для таких випадків становитиме

$$\omega_c = 2\pi \frac{n_c}{60} \text{ (рад/с)}, \quad (2.44)$$

а номінальна

$$\omega_N = \omega_c (1 - s_N) \text{ (рад/с)}. \quad (2.45)$$

Усталену кутову швидкість ω_{Ky} обертання котушки, на яку намотується трос, попередньо можна визначити як

$$\omega_{Ky} = \frac{\omega_c}{z} \text{ (рад/с)}, \quad (2.46)$$

що обумовлюватиме усталену лінійну швидкість v_T руху троса

$$v_T = \omega_{Ky} \frac{D_K}{2} \text{ (м/с)}. \quad (2.47)$$

Саме з такою лінійною швидкістю трос рухатиметься на відрізок часу $[t_1, t_2]$, зображеному на рис. 2.1.

При проведенні експерименту було встановлено, що кутова швидкість вала тягового електродвигуна після його запуску з вантажем, який знаходився у нижній точці (на поверхні землі), досягла усталеного значення протягом відрізка часу t_1 секунд, і за цей відрізок часу вантаж піднявся на висоту h_1 метрів.

Логічно припустити, що для зупинки підймання вантажу у момент часу t_3 процес гальмування потрібно запустити в момент часу t_2 за умови, що

$$t_{23} = t_3 - t_2 = t_1 \text{ (с)}, \quad (2.48)$$

а тому за час гальмування трос вкоротиться ще на h_{23} метрів. Тож за відрізок часу

$$t_{12} = t_2 - t_1 \text{ (с)}, \quad (2.49)$$

довжина троса вкорочуватиметься на

$$h_{12} = h - h_1 - h_{23} \text{ (м)}, \quad (2.50)$$

а тому момент навантаження, віднесений до осі котушки, в моменти часу t_1, t_2, t_3

набуватиме значень:

$$M_w^*(t_1) = M_w^* + m_{MT}(h - h_1)g \frac{D_K + D_T}{2} (H_M), \quad (2.51)$$

$$M_w^*(t_2) = M_w^* + m_{MT}(h - h_1 - h_{12})g \frac{D_K + D_T}{2} (H_M), \quad (2.52)$$

$$M_w^*(t_3) = M_w^* (H_M). \quad (2.53)$$

А віднесений до осі тягового електродвигуна цей момент навантаження у ці ж моменти часу набуватиме значень:

$$M_w(t_1) = M_w^*(t_1) \frac{\eta_N}{z} (H_M), \quad (2.54)$$

$$M_w(t_2) = M_w^*(t_2) \frac{\eta_N}{z} (H_M), \quad (2.55)$$

$$M_w(t_3) = M_w^*(t_3) \frac{\eta_N}{z} (H_M). \quad (2.56)$$

Оскільки на відрізку часу $[t_1, t_2]$ трос вкорочується зі сталою лінійною швидкістю, заданою виразом (2.47), то, з урахуванням виразу (2.50), маємо

$$t_{12} = \frac{h_{12}}{v_T} (c). \quad (2.57)$$

На цьому відрізку часу вираз (2.29) набуває вигляду

$$M_w(t) = M_w(t_1) - \alpha_1(t - t_1), \quad (2.58)$$

із якого маємо

$$M_w(t_2) = M_w(t_1) - \alpha_1 t_{12}. \quad (2.59)$$

Із рівняння (2.59) знайдемо, що

$$\alpha_1^* = \frac{M_w(t_1) - M_w(t_2)}{t_{12}}. \quad (2.60)$$

А для визначення параметра α_2^* використаємо вираз (2.9) з прив'язкою до моменту часу t_1 та вирази (2.43), (2.54), (2.60), завдяки чому отримаємо рівняння

$$M_w(t_1) = M_{w0} - \alpha_1^* t_1 - \alpha_2^* \frac{(t_1)^2}{2}, \quad (2.61)$$

із якого

$$\alpha_2^* = 2 \frac{M_{w0} - M_w(t_1) - \alpha_1^* t_1}{(t_1)^2}. \quad (2.62)$$

Підсумком наших розрахунків буде перехід від формально виписаних моделей моментів навантаження (2.9), (2.29), (2.30) при підйманні вантажу до конкретизованих моделей моментів для моделювання підймання вантажу масою m з нульової точки на висоту h у вигляді:

$$M_w(t) = M_{w0} - \alpha_1^* t - \frac{\alpha_2^*}{2} t^2 \quad (2.63)$$

– при розгоні тягового електродвигуна до усталеної кутової швидкості обертання ротора на відріжку часу $[0, t_1]$,

$$M_w(t) = M_w(t_2) - \alpha_1^* (t - t_2) - \frac{\alpha_2^*}{2} (t - t_2)^2 \quad (2.64)$$

– при гальмуванні тягового електродвигуна від усталеної кутової швидкості обертання ротора до її нульового значення на відріжку часу $[t_2, t_3]$,

$$M_w(t) = M_w(t_1) - \alpha_1^* (t - t_1) \quad (2.65)$$

– при підйманні вантажу тяговим електродвигуном з усталеною кутовою швидкістю обертання ротора на відріжку часу $[t_1, t_2]$.

Що ж до моделювання моментів навантаження при опусканні цього вантажу з висоти h до нульового її значення, то легко бачити, що вирази (2.63), (2.64) та (2.65) набувають вигляду:

$$M_w(t) = M_w(t_3) + \alpha_1^* (t - t_4) + \frac{\alpha_2^*}{2} (t - t_4)^2 \quad (2.66)$$

– при розгоні тягового електродвигуна до усталеної кутової швидкості обертання ротора на відріжку часу $[t_4, t_5]$,

$$M_w(t) = M_w(t_6) + \alpha_1^* (t - t_6) + \frac{\alpha_2^*}{2} (t - t_6)^2 \quad (2.67)$$

– при гальмуванні тягового електродвигуна від усталеної кутової швидкості обертання ротора до її нульового значення на відріжку часу $[t_6, t_7]$,

$$M_w(t) = M_w(t_5) + \alpha_1^* (t - t_5) \quad (2.68)$$

– при опусканні вантажу тяговим електродвигуном з усталеною кутовою швидкістю обертання ротора на відрізку часу $[t_5, t_6]$.

Тепер перейдемо до ідентифікації моделей приведених моментів інерції згідно з виразами (2.12), (2.31), (2.32), (2.36), (2.37), (2.38).

Почнемо з визначення значення параметра J , який характеризуватиме момент інерції усіх рухомих мас системи електропривода крана, приведений до вала тягового електродвигуна.

Визначатимемо цей параметр, використовуючи вирази, взяті з роботи [141] у вигляді:

$$J = J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + \sum_{l=1}^L m_l \rho_l^2, \quad (2.69)$$

$$z_i = \frac{\omega}{\omega_i}, \quad (2.70)$$

$$\rho_l = \frac{v_l}{\omega}, \quad (2.71)$$

де J^* – момент інерції тягового електродвигуна,

а ω – кутова швидкість обертання його вала,

J_i – момент інерції відповідної шестерні редуктора чи катушки, на яку намотується трос, до якого підвішено вантаж, відносно її осі,

а ω_i – кутова швидкість обертання цієї шестерні чи катушки,

m_l – маса вантажу, підвішеного до тросу, що намотується на катушку, або маса відрізка тросу, що намотується на цю катушку,

а v_l – поступальна лінійна швидкість руху цієї маси,

z_i – передатне число від відповідної шестерні чи катушки до вала тягового електродвигуна.

У свою чергу момент інерції J_i відповідної шестерні редуктора чи катушки, на яку намотується трос, до якого підвішено вантаж, відносно її осі, будемо визначати за рекомендаціями роботи [103], використовуючи вираз

$$J_i = \frac{1}{2} m_i R_i^2, \quad (2.72)$$

де m_i - маса цієї шестерні чи катушки,

R_i – її зовнішній радіус.

А момент інерції відрізка троса масою m_T , намотаного на катушку радіуса R_K , будемо визначати, використовуючи вираз

$$J_T = \frac{1}{2} m_T \left((R_K + \Delta R_T)^2 - R_K^2 \right), \quad (2.73)$$

де ΔR_T – приріст радіуса катушки за рахунок намотаного троса.

Із виразів (2.69)–(2.72) легко бачити, що обчислення складових у виразі (2.69), пов'язаних з шестернями редуктора, катушкою і масою вантажу, труднощів не викликають, а тому зупинимось більш детально лише на обчисленні складових цього виразу, пов'язаних з тросом, що намотується на катушку, чи розмотується з неї.

І під час підймання краном вантажу масою m_w , і під час опускання цього вантажу трос, на якому підвішено вантаж, буде створювати момент інерції J_T^* , який має дві складових, одна з яких J_{TK}^* буде створюватись тією частиною троса, яка уже намоталась на катушку, і обчислюється за виразом (2.73), а друга J_{TV}^* буде створюватись тією частиною троса, яка продовжує рухатись разом з вантажем поступально, і обчислюється за кінцевою складовою у виразі (2.69), тобто,

$$J_T^* = J_{TK}^* + J_{TV}^* \quad (2.74)$$

Розглянемо процес підймання вантажу масою m_w з нульової точки до верхньої кінцевої на висоті h , який почнемо з нульового моменту часу. Для цього випадку вираз (2.68) набере вигляду

$$\begin{aligned}
J &= J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + J_w + J_T^* = J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + m_w \left(\frac{\omega_K R_K}{\omega} \right)^2 + \\
&\quad + \beta_T t \frac{(R_K + \gamma_K t)^2 - R_K^2}{2z^2} + (m_T - \beta_T t) \left(\frac{\omega_K R_K}{\omega} \right)^2 = \\
&= J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + (m_w + m_T) \frac{R_K^2}{z^2} - \frac{\beta_T R_K^2}{z^2} t + \frac{\beta_T \gamma_K R_K}{z^2} t^2 + \frac{\beta_T \gamma_K^2}{2z^2} t^3 \approx \\
&\approx J_0^* - c_1^* t + \frac{c_2^*}{2} t.
\end{aligned} \tag{2.75}$$

У виразі (2.75) відкинуто кубічний член у зв'язку з тим, що, по-перше, і без нього цей вираз являтиме собою параболу, але квадратичну, а не кубічну, а по-друге, тому, що коефіцієнт при кубічному члені за рахунок γ_K^2 є величиною другого порядку малості порівняно з коефіцієнтом при квадратичному члені, тож неврахування кубічного члена не внесе в підсумковий результат похибки, що перевищуватиме похибку вимірювання тих параметрів цієї моделі, з використанням яких здійснюватиметься її ідентифікація. І одразу ж звертаємо увагу ще й на те, що математична модель приведенного моменту інерції, яку отримано у виразі (2.75), не збігається з постульованою попередньо моделлю, заданою для цього ж випадку виразом (2.12), оскільки мають місце різні знаки при коефіцієнті лінійного члена, що ми врахуємо у подальшому.

А тепер розглянемо процес опускання вантажу масою m_w з верхньої кінцевої точки на висоті h до нульової точки, який теж для спрощення синтезу моделі почнемо з нульового моменту часу, тобто, перенісши початок координат у точку t_4 зробивши її нулем. Для цього випадку вираз (2.69) набере вигляду

$$\begin{aligned}
J &= J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + J_w + J_T^* = \\
&= J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + m_w \left(\frac{\omega_K R_K}{\omega} \right)^2 + (m_T - \beta_T t) \frac{(R_K + R_K^* - \gamma_K t)^2 - R_K^2}{2z^2} + \\
&+ \beta_T t \left(\frac{\omega_K R_K}{\omega} \right)^2 = J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + \frac{m_w R_K^2 + m_T (R_K R_K^* + \frac{1}{2} (R_K^*)^2)}{z^2} + \\
&+ \frac{\beta_T R_K^2 - m_T \gamma_K (R_K + R_K^*) - \beta_T (R_K R_K^* + \frac{1}{2} (R_K^*)^2)}{z^2} t + \\
&+ \frac{\beta_T \gamma_K (R_K + R_K^*) + \frac{1}{2} m_T \gamma_K^2}{z^2} t^2 - \frac{\beta_T \gamma_K^2}{2z^2} t^3 \approx J_0^{**} + c_1^{**} t + \frac{c_2^{**}}{2} t^2,
\end{aligned} \tag{2.76}$$

де приріст радіуса котушки R_K^* обчислюється через діаметр троса $2R_T$ та кількість k шарів його намотування на котушку, тобто,

$$R_K^* = 2kR_T \tag{2.77}$$

І у цьому випадку потрібно звернути увагу ще й на те, що отримана математичну модель приведенного моменту інерції у вигляді (2.76) не збігається з постульованою попередньо моделлю, заданою для цього ж випадку виразом (2.37), оскільки мають місце різні знаки і при коефіцієнті лінійного члена, і при коефіцієнті квадратичного, що ми врахуємо у подальшому.

Використовуючи параметри тягового електродвигуна, редуктора, троса та вантажу, знайдемо, що

$$J_0^* = J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + (m_w + m_T) \frac{R_K^2}{z^2}, \tag{2.78}$$

$$J_0^{**} = J^* + \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_i^2} J_i + \frac{m_w R_K^2 + m_T (R_K R_K^* + \frac{1}{2} (R_K^*)^2)}{z^2}. \tag{2.79}$$

А далі пропонуємо задати еквівалентну математичну модель механічної характеристики $\omega = f(M)$ тягового асинхронного електродвигуна у вигляді

$$M = M_p (1 + k_1 \omega - k_2 \omega^2), \tag{2.80}$$

яка буде описувати цю залежність в робочому діапазоні її значень тим точніше,

чим більшим буде відношення $\frac{M_{\max}}{M_N}$ порівняно з відношенням $\frac{M_P}{M_N}$. В цьому легко переконатись, аналізуючи графік типової механічної характеристики асинхронного електродвигуна, наведеної, наприклад, у роботі [141]. Аналіз цієї характеристики показав, що її еквівалентна математична модель (2.81) адекватно задає її в робочому діапазоні значень параметрів режиму за умови, що

$$\frac{M_{\max}}{M_N} : \frac{M_P}{M_N} \geq 2, \quad (2.81)$$

а тому прийнято, що для вибраного тягового асинхронного електродвигуна вона виконується.

Підставляючи у вираз (2.81) паспортні параметри вибраного електродвигуна, отримаємо систему двох рівнянь для визначення невідомих параметрів k_1, k_2 у вигляді

$$\begin{cases} M_P(1 + k_1\omega_N - k_2\omega_N^2) = M_N, \\ M_P(1 + k_1\omega_{kr} - k_2\omega_{kr}^2) = M_{\max}, \end{cases} \quad (2.82)$$

або -

$$\begin{cases} M_P(1 + k_1\omega_N - k_2\omega_N^2) = M_N, \\ M_P(1 + k_1\omega_c(1 - s_{kr}) - k_2\omega_c^2(1 - s_{kr})^2) = M_{\max}, \end{cases} \quad (2.83)$$

розв'язуючи яку, знайдено, що

$$\begin{cases} k_1 = k_1^*, \\ k_2 = k_2^* \end{cases} \quad (2.84)$$

А оскільки в момент часу t_1 для того, щоб на відрізок часу $[t_1, t_2]$ вал електродвигуна обертався з усталеною кутовою швидкістю ω_y , потрібно виконання рівності тягового моменту і навантажувального, тобто, виконання рівності

$$M(t_1) = M_w(t_1), \quad (2.85)$$

то, підставляючи у вираз (2.85) паспортні дані та значення відповідних параметрів із виразів (2.54) та (2.84), отримаємо квадратне рівняння

$$M_w(t_1) = M_P(1 + k_1^*\omega_y - k_2^*\omega_y^2), \quad (2.86)$$

з якого, використовуючи додатний корінь, знайдемо, що

$$\omega_y = \omega_y^* \text{ (рад/с)}. \quad (2.87)$$

А тепер повернемося до розгляду виразу (2.24), який після підстановки в нього виразів (2.85) та (2.87) набуває вигляду

$$(-c_1 + c_2(t - t_1))\omega_y^* = \alpha_1(t - t_1), \quad (2.88)$$

який виконуватиметься і при $t = t_2$, тож для цього моменту часу з рівняння (2.88), з використанням виразів (2.48), (2.60) та (2.87), матимемо

$$c_1 = -\frac{\alpha_1^* t_{21}}{\omega_y^*} + c_2 t_{21} = -c_{1*} + c_2 t_{21}. \quad (2.89)$$

А далі, використовуючи вирази (2.75) та (2.78), ми маємо право записати

$$\begin{cases} J(t_1) = J_0^* - c_1^* t_1 + \frac{c_2^*}{2} t_1^2, \\ J(t_2) = J(t_1) - c_1^* t_{21} + \frac{c_2^*}{2} t_{21}^2, \\ J(t_3) = J(t_2) - c_1^* t_{32} + \frac{c_2^*}{2} t_{32}^2 = J_0^{**} \end{cases} \quad (2.90)$$

Використовуючи вираз (2.89), із співвідношень (2.90), шляхом вилучення проміжних значень, знайдемо, що

$$J_0^{**} - J_0^* = -(c_{1*} - t_{21} c_2^*)(t_1 + t_{21} + t_{32}) + \frac{c_2^*}{2}(t_1^2 + t_{21}^2 + t_{32}^2). \quad (2.91)$$

А з виразу (2.91) матимемо

$$c_2^* = \frac{2(J_0^{**} - J_0^* - c_{1*}(t_1 + t_{21} + t_{32}))}{t_1^2 + t_{21}^2 + t_{32}^2 - 2t_{21}(t_1 + t_{21} + t_{32})} = c_2^{**}, \quad (2.92)$$

що вже має вигляд числа, більшого нуля.

У свою чергу, підставляючи вираз (2.92) у вираз (2.89), матимемо

$$c_1^* = -c_{1*} + c_2^{**} t_{21}, \quad (2.93)$$

що вже теж має вигляд числа, більшого нуля.

А далі розв'язуємо диференціальне рівняння (2.14) на відрізку часу $[0, t_1]$ з граничними умовами

$$\begin{cases} \omega(0) = 0, \\ \omega(t_1) = \omega_y^*, \end{cases} \quad (2.94)$$

використавши еквівалент цього диференціального рівняння у вигляді

$$\left(J_0^* - c_1^* t + \frac{c_2^*}{2} t^2 \right) \frac{d\omega}{dt} = M_p (1 + k_1 \omega - k_2 \omega^2) - M_w(t_1), \quad (2.95)$$

що є допустимим в зв'язку з тим, що члени $(c_1 + c_2 t)\omega$, $\alpha_1 t + \frac{\alpha_2}{2} t^2$ є величинами другого порядку малості на вибраному відрізку інтегрування, а тому ними можна знехтувати. Але перед тим, як інтегрувати рівняння (2.95), приведемо його до вигляду

$$\frac{d\omega}{(a_\omega \omega^2 + b_\omega \omega + c_\omega)} = \frac{dt}{(a_t t^2 + b_t t + c_t)}, \quad (2.96)$$

де

$$\begin{cases} a_t = \frac{c_2^*}{2}, \\ b_t = -c_1^*, \\ c_t = J_0^*, \\ \Delta_t = 4a_t c_t - b_t^2 = 2c_2^* J_0^* - (c_1^*)^2; \end{cases} \quad (2.97)$$

$$\begin{cases} a_\omega = -M_p k_2, \\ b_\omega = M_p k_1, \\ c_\omega = M_p - M_w(t_1), \\ \Delta_\omega = 4a_\omega c_\omega - b_\omega^2 = -4M_p k_2 (M_p - M_w(t_1)) - (M_p k_1)^2 \end{cases} \quad (2.98)$$

Підставляючи у вирази (2.97), (2.98) конкретні значення паспортних даних системи тягового електропривода та визначені з попередніх розрахунків значення усіх параметрів, легко переконатись, що завжди матимемо

$$\begin{cases} \Delta_t > 0, \\ \Delta_\omega < 0, \end{cases} \quad (2.99)$$

а тому, інтегруючи диференціальне рівняння (2.96) з використанням взятих із роботи [25] табличних інтегралів, отримаємо його розв'язок на відрізку часу $[0, t_1]$ у вигляді

$$\frac{1}{\sqrt{-\Delta_\omega}} \ln \frac{2a_\omega \omega + b_\omega - \sqrt{-\Delta_\omega}}{2a_\omega \omega + b_\omega + \sqrt{-\Delta_\omega}} = \frac{2}{\sqrt{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t t + b_t}{\sqrt{\Delta_t}} + \frac{1}{\sqrt{-\Delta_\omega}} \ln C, \quad (2.100)$$

або

$$\frac{\omega + \frac{b_\omega - \sqrt{-\Delta_\omega}}{2a_\omega}}{\omega + \frac{b_\omega + \sqrt{-\Delta_\omega}}{2a_\omega}} = C e^{\sqrt{\frac{-4\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t t + b_t}{\sqrt{\Delta_t}}} \quad (2.101)$$

Підставивши у вираз (2.101) ліву граничну умову з (2.94), знайдемо, що стала інтегрування C матиме вигляд числа

$$C = \frac{b_\omega - \sqrt{-\Delta_\omega}}{b_\omega + \sqrt{-\Delta_\omega}} e^{-\sqrt{\frac{-4\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{b_t}{\sqrt{\Delta_t}}}, \quad (2.102)$$

підставляючи яке у вираз (2.101) та спрощуючи цей вираз після підстановки, матимемо розв'язок диференціального рівняння (2.14), приведеного до еквівалентної форми (2.95), на відрізку часу $[0, t_1]$ у вигляді

$$\omega = \frac{(b_\omega^2 - \Delta_\omega) \left(e^{\sqrt{\frac{-4\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} t}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t t}} - 1 \right)}{2a_\omega \left(b_\omega (1 - e^{\sqrt{\frac{-4\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} t}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t t}}) + \sqrt{-\Delta_\omega} (1 + e^{\sqrt{\frac{-4\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} t}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t t}}) \right)}, \quad (2.103)$$

на завершальному етапі ідентифікації якого у вираз (2.103) потрібно підставити числові значення параметрів, визначені виразами (2.97), (2.98).

За критерій адекватності математичної моделі (2.103) процесу на відрізку часу $[0, t_1]$ доцільно використати праву граничну умову, задану виразом (2.94).

Що ж до гальмування від усталеного значення кутової швидкості тягового електродвигуна ω_y^* до нуля на відрізку часу $[t_2, t_3]$, то цей процес, за умови його реалізації шляхом противключення, теж може бути описаний диференціальним рівнянням, аналогічним рівнянню (2.95), але у вигляді

$$\left(J(t_2) - c_1^*(t - t_2) + \frac{c_2^*}{2}(t - t_2)^2 \right) \frac{d\omega}{dt} =, \quad (2.104)$$

$$= -M(t_2)(1 + k_1\omega - k_2\omega^2) - M_w(t_2)$$

з граничними умовами

$$\begin{cases} \omega(t_2) = \omega_y^*, \\ \omega(t_3) = 0, \end{cases} \quad (2.105)$$

яке теж приводиться до вигляду (2.96) та до розв'язання у вигляді, аналогічному (2.103), але зі змінами, зумовленими зсувом у часі, тобто, у вигляді

$$\omega = \omega_y^* - \frac{(b_\omega^2 - \Delta_\omega) \left(e^{\sqrt{-\frac{4\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} (t-t_2)}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t (t-t_2)}} - 1 \right)}{2a_\omega \left(b_\omega (1 - e^{\sqrt{-\frac{4\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} (t-t_2)}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t (t-t_2)}}) + \sqrt{-\Delta_\omega} (1 + e^{\sqrt{-\frac{\Delta_\omega}{\Delta_t}} \operatorname{arctg} \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} (t-t_2)}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t (t-t_2)}}) \right)}, \quad (2.106)$$

в якому параметри визначаються не виразами (2.97), (2.98), а виразами

$$\begin{cases} a_t = \frac{c_2^*}{2}, \\ b_t = -c_1^*, \\ c_t = J(t_2), \\ \Delta_t = 4a_t c_t - b_t^2 = 2c_2^* J(t_2) - (c_1^*)^2; \end{cases} \quad (2.107)$$

$$\begin{cases} a_\omega = M(t_2)k_2, \\ b_\omega = -M(t_2)k_1, \\ c_\omega = -M(t_2) - M_w(t_2), \\ \Delta_\omega = 4a_\omega c_\omega - b_\omega^2 = -4M(t_2)k_2(M(t_2) + M_w(t_2)) - (M(t_2)k_1)^2. \end{cases} \quad (2.108)$$

Що ж до моделювання процесу опускання вантажу з верхньої точки до нуля по висоті, то після пуску електропривода і аж до досягнення валом його електродвигуна усталеного значення ω_y^* кутової швидкості цей процес на відрізку часу $[t_4, t_5]$ буде описуватись диференціальним рівнянням

$$\left(J(t_3) + c_1^*(t - t_4) + \frac{c_2^*}{2}(t - t_4)^2 \right) \frac{d\omega}{dt} = -M_p(1 + k_1\omega - k_2\omega^2) - M_w(t_3), \quad (2.109)$$

з граничними умовами

$$\begin{cases} \omega(t_4) = 0, \\ \omega(t_5) = -\omega_y^{**}, \end{cases} \quad (2.110)$$

на відрізку часу $[t_5, t_6]$ цей процес за умови проти включення електродвигуна для забезпечення рівності

$$M(t_5) - M_w(t_3) = 0 \quad (2.111)$$

буде описуватись рівнянням

$$(c_1 + c_2(t - t_5))\omega_y^{**} = -\alpha_1(t - t_5), \quad (2.112)$$

а на відрізку часу $[t_6, t_7]$ процес описуватиметься диференціальним рівнянням

$$\left(J(t_6) + c_1^*(t - t_6) + \frac{c_2^*}{2}(t - t_6)^2 \right) \frac{d\omega}{dt} = M_p(1 + k_1\omega - k_2\omega^2) - M_w(t_3) \quad (2.113)$$

з граничними умовами

$$\begin{cases} \omega(t_6) = -\omega_y^{**}, \\ \omega(t_7) = 0. \end{cases} \quad (2.114)$$

Легко бачити, що диференціальні рівняння (2.106) та (2.113) теж приводяться до вигляду (2.96), а тому їх розв'язками будуть ті ж вирази (2.103) та (2.106), які уже отримані раніше при моделюванні процесу підймання вантажу, але зі змінами знаків на протилежні перед дробами та перед значенням усталеного значення кутової швидкості. Ідентифікація і цих моделей теж здійснюється аналогічно з використанням виразів (2.97), (2.98) та (2.107), (2.108) з відповідною корекцією знаків у них.

Розроблений метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами наведений у роботі [89].

2.4 Моделювання режимів роботи системи керування електроприводом підйомного крану з врахуванням змін в часі моменту інерції махових мас

Відповідно до графіка робочого циклу електродвигуна кранового механізму для процесу підймання/опускання вантажу наведеного на рис. 2.1 із загальних рівнянь динаміки (2.14) та (2.15), з урахуванням залежності (2.10), інтегруванням $\frac{d\omega}{dt}$ отримуємо функцію

$$w(t) = w_0 \pm \varepsilon \cdot t, \quad (2.115)$$

при розмотуванні/змотуванні троса на барабан відповідно, де ε – кутове прискорення при обертання вала електродвигуна, w_0 – початкове значення кутової швидкості.

Розглянемо варіант, у якому в початковий момент часу значення

$$J_0, c_1, w_0, \alpha_1 = 0 \quad (2.116)$$

система перебуває в стані спокою.

З урахуванням (2.12) та (2.13), для моменту пуску/гальмування електродвигуна відповідно рівняння (2.11) під час підймання/опускання вантажу запишеться

$$\frac{3}{2} c_2 \cdot \varepsilon \cdot t^2 = M(t) - M_{w0} - \frac{\alpha_2}{2} \cdot t^2, \quad (2.117)$$

$$\frac{3}{2} c_2 \cdot \varepsilon \cdot t^2 = M(t) - M_{w0} + \frac{\alpha_2}{2} \cdot t^2. \quad (2.118)$$

Тепер розглянемо другу ділянку від моменту виходу тягового електродвигуна на сталу кутову швидкість до моменту початку гальмування, для якої будуть справедливими вирази (2.16)–(2.22), а рівняння (2.9) під час підймання для даного періоду часу запишеться як

$$(J_1 + c_1 t_1) \cdot \omega = M(t) - M_{g1} - \alpha_1 t_1, \quad (2.119)$$

під час опускання

$$-(J_1 + c_1 t_1) \cdot \omega = M(t) - M_{g1} + \alpha_1 t_1. \quad (2.120)$$

З урахуванням (2.116), рівняння (2.119) та (2.120) перепишуться

$$J_1 \cdot \omega = M(t) - M_{w1}. \quad (2.121)$$

$$-J_1 \cdot \omega = M(t) - M_{w1}. \quad (2.122)$$

Розглянемо третій відрізок часу від початку гальмування до зупинки, для якого загальне рівняння динаміки матиме вигляд, аналогічний ділянці розгону тільки з протилежними знаками.

Як показано в роботах [15], [104], [113], [151], за тягові електродвигуни в системах електроприводів підйомних кранів та скіпових лебідок різної підйомної спроможності використовуються електродвигуни постійного струму як з незалежним, так і з послідовним збудженням, а також асинхронні електродвигуни як короткозамкнуті, так і з фазним ротором.

За отриманими загальними рівняннями динаміки та з урахуванням наведених в [12] співвідношень для визначення обертових моментів електродвигунів побудовані імітаційні моделі в ППП Matlab з використанням ПП Simulink:

асинхронного електродвигуна КМ АИР250М, зображеного на рис. 2.2,

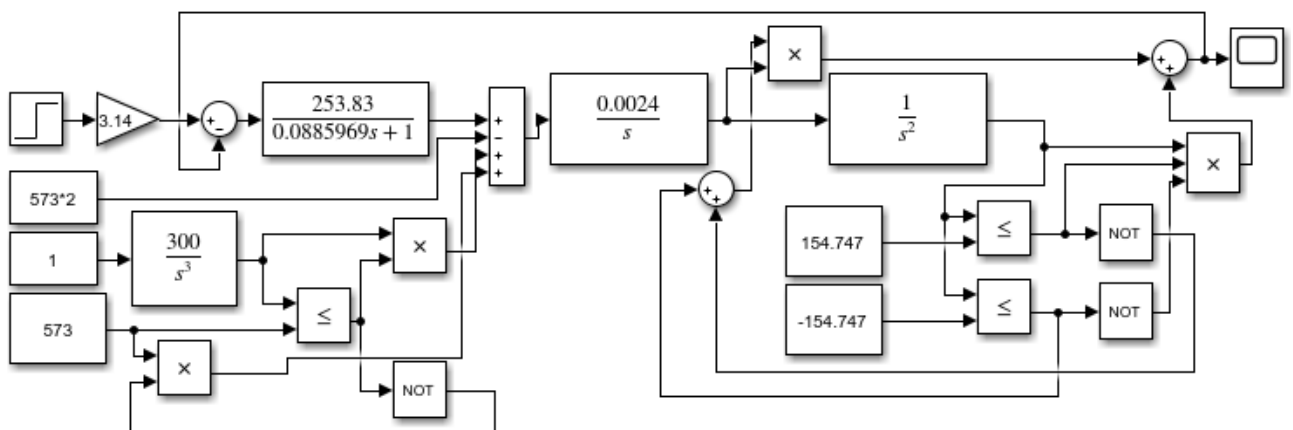


Рисунок 2.2 – Імітаційна математична модель тягового асинхронного двигуна кранового механізму АИР250М

з параметрами: $P = 90$ кВт; $U = 380$ В; $I_H = 163,6$ А; $M_H = 573$ Нм;

$J = 1,1$ кг·м²; $n_c = 1500$ об/хв; $\cos \varphi_H = 0,89$; $\eta_H = 94$ %; $s_H = 1,5$ %; $\frac{M_{\max}}{M_H} = 2,5$.

Результати моделювання даної моделі можна оцінити за графіком кутової швидкості обертання вала асинхронного електродвигуна (рис. 2.3), на якому зображено моделювання процесів підймання, зупинки та опускання вантажу з номінальним навантаженням на вал та в режимі холостого ходу.

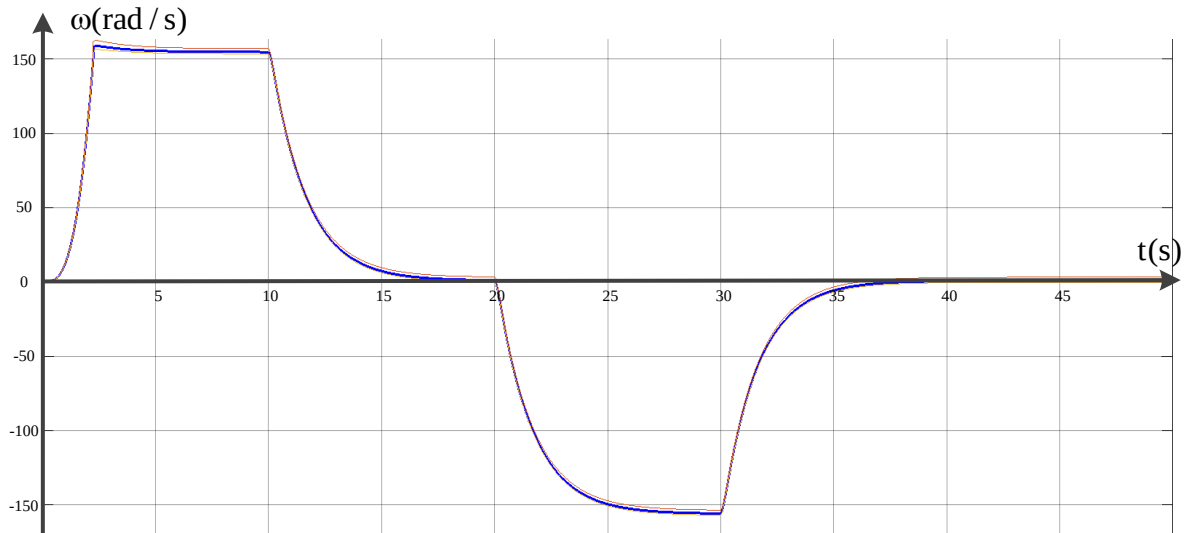


Рисунок 2.3 – Графік кутової швидкості обертання вала тягового асинхронного електродвигуна КМ АИР250М системи електропривода підйомного крана, отриманий на основі імітації в ПП Simulink математичної моделі (2.9)

Наведені в даному розділі результати моделювання опубліковані в тезах міжнародної конференції [91] та в науковому виданні [90].

2.5 Висновки до другого розділу

1. Показано, що класичне рівняння динаміки електропривода не може використовуватись для аналізу процесів в електромеханічних системах підйомних кранів, оскільки основні параметри цього класу систем в процесі підймання та опускання вантажів змінюються в часі.

2. Синтезовано математичні моделі зі змінними параметрами, які адекватно описують процеси в класі електромеханічних систем, до якого відносять системи електроприводів підйомних кранів та скіпових лебідок шахт.

3. Конкретизовано характеристики моментів в правих частинах синтезованих математичних моделей електромеханічних систем даного класу зі змінними параметрами при використанні в електроприводах цих електромеханічних систем як тягових асинхронних електродвигунів.

4. Шляхом порівняння графіків, наведених на рис. 2.1 та 2.3, показано, що для описання процесів, що мають місце при підйманні та опусканні вантажів підйомними кранами, не завжди можна використовувати рівняння динаміки електропривода у вигляді (2.1), оскільки зі зростанням лінійної швидкості вантажу та збільшенням висоти його підйому і зменшенням передатного числа редуктора, що зумовлює зміни у часі приведення моменту інерції махових мас та моменту навантаження, використання рівняння (2.1) приводить до значних похибок, наслідком яких може стати руйнування вантажу чи місця його приземлення, а тому більш доцільно при моделюванні цих процесів використовувати рівняння (2.5).

5. Розроблено метод ідентифікації математичних моделей, якими описуються процеси підймання і опускання вантажів підйомними кранами, з детальною покроковою реалізацією його алгоритму.

Текст другого розділу дисертації складено з використанням авторських наукових публікацій [12], [89], [90], [91].

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ, В ЯКИХ ВРАХОВУЄТЬСЯ ЗМІННІСТЬ ПАРАМЕТРІВ В ЧАСІ ТА У ПРОСТОРІ

3.1 Постановка задачі оцінювання динамічної системи з параметрами, змінними в часі та у просторі

Наведена в розділі 2 модель (2.9) синтезована на основі моделі (2.1) і є її розширенням, а наведений в розділі 2 метод ідентифікації параметрів неповно описує особливості функціонування такої складної динамічної системи, якою є підйомний кран, оскільки не враховує повздовжні коливання, що виникають в тросах, на яких підвішуються вантажі для їх переміщення вгору чи вниз. Тож для системного аналізу процесів функціонування підйомного крана при переміщенні вантажів і цю модель потрібно вдосконалити шляхом такого її узагальнення, яке надавало б можливість оцінювати не лише залежність параметрів системи в часі, але й створювало б можливість оцінювання і повздовжніх коливань, що виникають в тросах, для яких, при відсутності зовнішньої сили, справедливою є модель, що наведена, наприклад, в роботі [94] і має вигляд

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} - nm \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (3.1)$$

або

$$\frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial x^2} - nm \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2)$$

де $v(x, t), F(x, t)$ – відповідно, лінійна швидкість руху троса питомою масою m $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ і податливістю n $\left(\frac{\text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}}\right)$ та сила, що має місце в його перерізі на відстані x від початку відліку просторової координати вздовж троса в момент часу t .

Створенню математичної моделі, яка увібрала б в себе властивості моделей (2.1), (2.9), (3.1), (3.2) і була спроможна реалізувати системний підхід до аналізу

процесів переміщення вантажів підйомними кранами, і буде присвячений даний розділ, розглядатиметься саме така задача.

3.2 Системний підхід до аналізу процесів переміщення вантажів підйомним краном

Коли вантаж опускається на майданчик його встановлення, то трос уже натягнутий і коливання у ньому уже затухли [130], [137], тож найбільшу небезпеку для вантажів, що переміщуються вертикально, та майданчиків, на які ці вантажі встановлюються, створюють повздовжні коливання, що виникають в тросах, при підйманні вантажу і відриві його від майданчика встановлення. А тому далі буде розглянуто саме процес підймання вантажу, граничні умови для якого записані з використанням графіка, наведеного на рис. 2.1, очевидно матимуть вигляд

$$\begin{cases} \omega(0) = 0, \\ \omega(t_3) = 0, \end{cases} \quad (3.3)$$

або -

$$\begin{cases} v(0) = 0, \\ v(t_3) = 0, \end{cases} \quad (3.4)$$

де

$$v = \frac{R}{k_p} \omega, \quad (3.5)$$

а k_p та R – відповідно, передатне число редуктора, через який вал тягового електродвигуна зв'язаний з валом барабана, на який намотується трос, та радіус цього барабана.

Як показано у розділі 2, для процесу підймання вантажу з нижньої точки до визначеної висоти на відрізку часу $[0, t_3]$, тобто, після пуску електропривода і аж до зупинки вала його електродвигуна, були знайдені розв'язки диференціальних рівнянь (2.95), (2.104), з урахуванням граничних умов (2.94) та

(2.105), наведені у (2.97), (2.98), (2.103) та (2.106)–(2.108).

Аналізуючи рівняння (2.95) та (2.104), видно, що функціонально внести в них залежність процесу підймання вантажу від повздовжніх коливань, що виникають в тросі, до якого підвішено вантаж, можна лише через момент навантаження M_w , визначивши його не лише як функцію часу $M_w(t)$, але ще й як функцію повздовжньої просторової координати x , тобто, як функцію $M_w(x, t)$. Тож далі наведено, як це можна зробити.

Оскільки для використання рівнянь (2.95), (2.104) в системному аналізі процесу підймання вантажу (з майданчика його попереднього розміщення) підйомним краном потрібно внести в них момент навантаження у вигляді функції $M_w(x, t)$

$$M_w(x, t) = R \cdot F(x, t), \quad (3.6)$$

де R – радіус барабана, на який намотується трос в процесі підймання вантажу, а $F(x, t)$ – сила, що виникає в перерізі цього троса в момент часу t на відстані x від початку відліку цієї просторової координати вздовж троса, то для врахування повздовжніх коливань, що виникають в тросі, доповнено рівняння (2.95), (2.104) рівнянням (3.2), в якому ця сила і фігурує, трансформувавши його до вигляду

$$\frac{1}{nm} \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial t^2}, \quad (3.7)$$

а потім до вигляду

$$\frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{nm} \left(\frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial x^2} + \frac{G_w + G_T(x, t)}{S} \right), \quad (3.8)$$

де G_w – сила ваги вантажу, $G_T(x, t)$ – сила ваги відрізка троса між вантажем та барабаном намотування, а S – площа поперечного перерізу троса.

Зауважимо, що у рівнянні (3.8) членом $\frac{G_w + G_T(x, t)}{S}$, згідно з рекомендаціями, викладеними у фундаментальній роботі [67], враховується причина появи примусової складової повздовжніх коливань сили в тросі, зумовленої віднесеною до поперечного перерізу кожного волокна троса силою

ваги вантажу та силою ваги відрізка троса між вантажем та барабаном намотування, яка в процесі намотування троса змінюється, тобто, є функцією просторової координати та часу.

Розв'язуючи рівняння (3.8), підставляючи цей розв'язок у співвідношення (3.6), підставляючи яке після цього, у свою чергу, в рівняння (2.95), (2.104) і розв'язуючи останні за цих умов, буде отримано розв'язки цих рівнянь, що враховуватимуть і повздовжні коливання троса.

А почнемо розв'язування рівняння (3.8) з визначення початкових і граничних умов для нього. А вони, вочевидь, будуть такими: початкові умови:

$$\begin{cases} F(x, t)|_{t=0} = f_1(x), \\ \frac{\partial F(x, t)}{\partial t}|_{t=0} = f_2(x), \end{cases} \quad (3.9)$$

граничні умови:

$$\begin{cases} F(x, t)|_{x=0} = G_w, \\ F(x, t)|_{x=l} = G_w + G_T, \end{cases} \quad (3.10)$$

де

$$G_T = mlSg, \quad (3.11)$$

l – довжина відрізка троса між барабаном намотування та майданчиком встановлення вантажу і g – прискорення вільного падіння.

Оскільки граничні умови (3.11) не є однорідними, то для розв'язання рівняння (3.8) не можна використати такий потужний метод розв'язання диференціальних рівнянь в частинних похідних, яким є метод Фур'є [67]. Але, як показано у тій же роботі [67], цей метод можна використати, якщо від рівняння (3.8) перейти до такого ж рівняння, яке подається, використовуючи позначення змінних і параметрів, як і у роботі [67], тобто до рівняння

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + g(x, t), \quad (3.12)$$

в якому $u(x, t)$ – зміщення перерізу троса з просторовою координатою x в момент часу t вздовж вертикальної осі цього троса,

$$a^2 = \frac{1}{nm} = \frac{E}{m}, \quad (3.13)$$

E – модуль пружності матеріалу, з якого виготовлено трос (модуль Юнга), і який є величиною, оберненою до податливості n , а $g(x, t)$ – прискорення, яке пов'язане з силою ваги вантажу та силою ваги відрізка троса між барабаном намотування і вантажем співвідношенням

$$g(x, t) = \frac{G_w + G_T(x, t)}{mlS}, \quad (3.14)$$

яке, з урахуванням того, що в кожному мить

$$\frac{x}{t} = a = \sqrt{\frac{E}{m}} \Rightarrow t = \frac{x\sqrt{m}}{\sqrt{E}}, \quad (3.15)$$

легко приводиться до вигляду

$$g_1\left(x, \frac{x}{a}\right) = \frac{G_w + G_T^*\left(x, \frac{x}{a}\right)}{mlS}, \quad (3.16)$$

або

$$g_1(at, t) = \frac{G_w + G_T^*(at, t)}{mlS}. \quad (3.17)$$

Оскільки один кінець троса є защемленим на барабані намотування, а інший, на якому підвішено вантаж, є вільним, то, як показано в роботі [67], граничні умови для рівняння (3.12) мають вигляд

$$\begin{cases} u(x, t)|_{x=0} = 0, \\ \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}|_{x=l} = 0, \end{cases} \quad (3.18)$$

а початкові умови - вигляд

$$\begin{cases} u(x, t)|_{t=0} = 0, \\ \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}|_{t=0} = 0. \end{cases} \quad (3.19)$$

В роботі [67] показано, що розв'язок рівняння (3.8) з граничними умовами (3.18) та початковими умовами (3.19) має вигляд

$$u(x, t) = \frac{g_{11}x(2l-x)}{2a^2} - \frac{16g_{11}l^2}{\pi^3a^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^3} \left[\sin \frac{(2k+1)\pi x}{2l} \cos \frac{(2k+1)\pi at}{2l} \right], \quad (3.20)$$

де

$$g_{11} = g_1(x)|_{x=l}. \quad (3.21)$$

Використовуючи співвідношення (3.15), вираз (3.20) можна записати і так

$$u(t) = \frac{g_{11}at(2l-at)}{2a^2} - \frac{16g_{11}l^2}{\pi^3a^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^3} \left[\sin \frac{(2k+1)\pi at}{2l} \cos \frac{(2k+1)\pi at}{2l} \right]. \quad (3.22)$$

Оскільки, як відомо з теорії сигналів [20], 95% енергії сигналу переносять постійна складова та 5 гармонік, то у виразі (3.20) при його практичному застосуванні варто верхню границю приймати рівною не ∞ , а 5.

Двічі диференціюючи вираз (3.22) за часом, з урахуванням наведеного вище зауваження та формули для синуса подвійного аргументу, отримано

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -g_{11} + \frac{2g_{11}}{\pi} \sum_{k=0}^5 \frac{1}{2k+1} \left[\sin \frac{(2k+1)\pi at}{l} \right]. \quad (3.23)$$

Цілком очевидно, що, помноживши рівняння (3.23) на сумарну масу вантажу та відрізка троса між барабаном намотування та точкою підвішування вантажу, буде отримано силу, яка виникає в перерізі цього троса й викликає повздовжні коливання в ньому, у вигляді

$$F(x, t) = \left(\frac{G_w + G_T(x, t)}{g} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{G_w + G_T(x, t)}{g} \right) g_{11} \left(-1 + \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^5 \frac{1}{2k+1} \left[\sin \frac{(2k+1)\pi at}{l} \right] \right), \quad (3.24)$$

та яка в момент відриву вантажу від майданчику попереднього встановлення дорівнюватиме

$$F(l, 0) = - \left(\frac{G_w + G_T(l, 0)}{g} \right) g_{11}. \quad (3.25)$$

Саме підстановкою цього значення сили, заданого виразом (3.25), у вираз (3.6) буде отримано значення моменту навантаження $-M_{w0}$ в рівнянні (2.14). Розв'язувати ж рівняння (2.95) в загальному вигляді потрібно, підставляючи в

нього замість $-M_w(t_1)$ вираз

$$\begin{aligned} -M_w(t_1, t) = R \left(\frac{G_w + G_T(1, 0)}{g} \right) \cdot \\ \cdot g_{11} \left(-1 + \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^5 \frac{1}{2k+1} \left[\sin \frac{(2k+1)\pi a t}{l} \right] \right) + \alpha_1 t_1 + \frac{\alpha_2}{2} t_1^2. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Що ж до моменту навантаження $-M_w(t_2)$, то замість нього в рівняння (2.104), з урахуванням виразів (3.24) та (3.6), потрібно підставляти вираз

$$\begin{aligned} -M_w(t_2, t) = R \left(\frac{G_w + G_T(a t_2, t_2)}{g} \right) \cdot \\ \cdot g_{11} \left(-1 + \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^5 \frac{1}{2k+1} \left[\sin \frac{(2k+1)\pi a t}{l} \right] \right) + \alpha_1 (t_2 - t_1). \end{aligned} \quad (3.27)$$

Цілком очевидно, що зміниться і рівняння (2.24), яке, у зв'язку з виникненням повздовжніх коливань в тросі, набуде вигляду

$$\begin{aligned} (c_1 + c_2(t - t_1))\omega_y^* = \alpha_1(t - t_1) + \\ + R \left(\frac{G_w + G_T(a t_1, t_1)}{g} \right) g_{11} \left(\frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^5 \frac{1}{2k+1} \left[\sin \frac{(2k+1)\pi a t}{l} \right] \right). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Далі доведемо, як зміняться розв'язки рівнянь (2.95) та (2.104) у зв'язку з тим, що в цих рівняннях вирази для моменту навантаження набудуть вигляду (3.26) та (3.27).

Легко бачити, що в разі конкретизації значення часу, тобто, задаючи $t = t_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, q$ у виразі (3.26), є можливість за цим виразом отримати конкретні числа $-M_w(t_1, t_i)$, що дозволяє використовувати вираз (2.103) для отримання значення кутової швидкості у цей момент часу $t = t_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, q$ у вигляді

$$\begin{aligned} \omega_i = \frac{(b_\omega^2 - \Delta_\omega^{(i)}) \left(e^{\sqrt{\frac{4\Delta_\omega^{(i)}}{\Delta_t}} \arctg \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} t_i}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t t_i}} - 1 \right)}{2a_\omega \left(b_\omega (1 - e^{\sqrt{\frac{4\Delta_\omega^{(i)}}{\Delta_t}} \arctg \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} t_i}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t t_i}}) + \sqrt{-\Delta_\omega^{(i)}} (1 + e^{\sqrt{\frac{\Delta_\omega^{(i)}}{\Delta_t}} \arctg \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} t_i}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t t_i}}) \right)}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

$i = 0, 1, \dots, q$

де

$$\begin{cases} a_t = \frac{c_2^*}{2}, \\ b_t = -c_1^*, \\ c_t = J_0^*, \\ \Delta_t = 4a_t c_t - b_t^2 = 2c_2^* J_0^* - (c_1^*)^2; \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\begin{cases} a_\omega = -M_p k_2, \\ b_\omega = M_p k_1, \\ c_\omega^{(i)} = M_p - M_w(t_1, t_i), \\ \Delta_\omega^{(i)} = 4a_\omega c_\omega^{(i)} - b_\omega^2 = -4M_p k_2 (M_p - M_w(t_1, t_i)) - (M_p k_1)^2. \end{cases} \quad (3.31)$$

Звертаю увагу на те, що у цьому випадку нижня нерівність у виразі (2.95) може набувати протилежного характеру, що приводитиме до появи комплексних чисел у виразі (3.29), перетворення яких у цьому виразі буде приводити до появи у ньому коливальних складових.

Аналогічно в разі конкретизації значення часу, тобто, задаючи $t = t_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, q$ у виразі (3.27), за цим виразом будуть отримані конкретні числа $-M_w(t_2, t_i)$, що дозволяє використовувати вираз (2.103) для отримання значення кутової швидкості у цей момент часу $t = t_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, q$ у вигляді

$$\omega_i = \omega_y^* - \frac{\left(b_\omega^2 - \Delta_\omega^{(i)} \right) \left(e^{\sqrt{-\frac{4\Delta_\omega^{(i)}}{\Delta_t}} \arctg \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} (t_i - t_2)}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t (t_i - t_2)}} - 1 \right)}{2a_\omega \left(b_\omega (1 - e^{\sqrt{-\frac{4\Delta_\omega^{(i)}}{\Delta_t}} \arctg \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} (t_i - t_2)}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t (t_i - t_2)}}) + \sqrt{-\Delta_\omega^{(i)}} (1 + e^{\sqrt{-\frac{\Delta_\omega^{(i)}}{\Delta_t}} \arctg \frac{2a_t \sqrt{\Delta_t} (t_i - t_2)}{\Delta_t + b_t^2 + 2a_t b_t (t_i - t_2)}}) \right)}, \quad (3.32)$$

де

$$\begin{cases} a_t = \frac{c_2^*}{2}, \\ b_t = -c_1^*, \\ c_t = J(t_2), \\ \Delta_t = 4a_t c_t - b_t^2 = 2c_{2*}^* J(t_2) - (c_1^*)^2; \end{cases} \quad (3.33)$$

$$\begin{cases} a_\omega = M(t_2)k_2, \\ b_\omega = -M(t_2)k_1, \\ c_\omega^{(i)} = -M(t_2) - M_w(t_2, t_i), \\ \Delta_\omega^{(i)} = 4a_\omega c_\omega^{(i)} - b_\omega^2 = -4M(t_2)k_2 (M(t_2) + M_w(t_2, t_i)) - (M(t_2)k_1)^2. \end{cases} \quad (3.34)$$

Поява коливальних складових у виразі (3.32) і у цьому випадку зумовлена тим, що нижня нерівність у виразі (2.95) може набувати протилежного характеру, що приводить до появи комплексних чисел у виразі (3.32), перетворення яких буде приводити до появи у ньому синусоїд.

Зрозуміло, що використання виразів (3.29) та (3.32) приводить до формування зубчастої згинаючої на тренді кутової швидкості, обумовленої дискретними змінами не лише часу, але і параметрів $\Delta_\omega^{(i)}$, яка при зменшенні параметра дискретизації часу буде наближатись до гладкої кривої тренду.

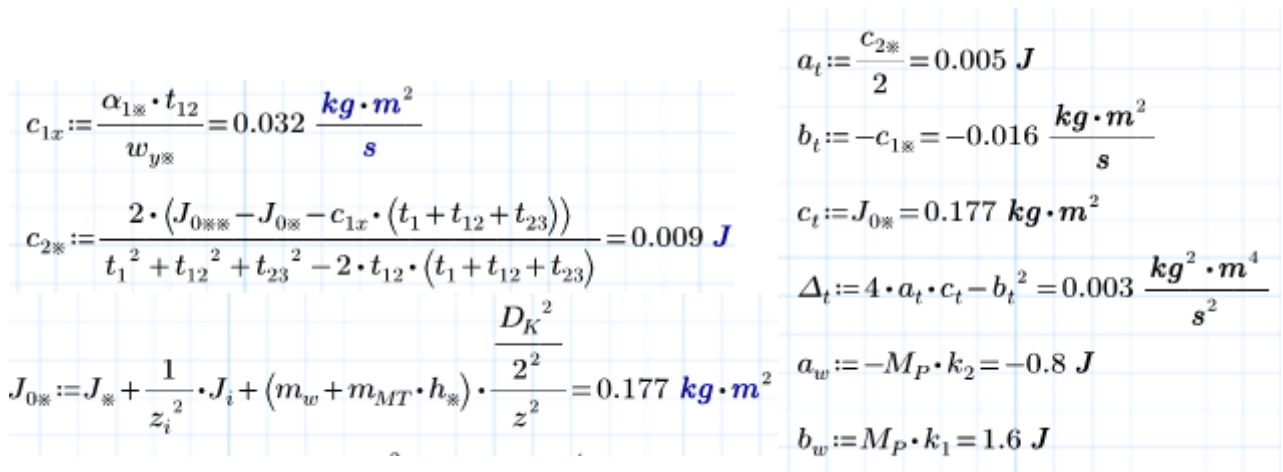
Текст підрозділів 3.1 – 3.2 дисертації складено з використанням авторських наукових публікацій [93].

3.3 Моделювання системи підйомного механізму як об'єкта з класу динамічних з параметрами, змінними в часі та у просторі

Усі наведені вище математичні моделі будуть служити вихідними передумовами для синтезу імітаційної моделі процесів, що мають місце у системі кранового електропривода, вибраного як типовий динамічний об'єкт з параметрами, що змінюються як у часі, так і у просторі. А сама імітаційна модель буде використана для перевірки наведених вище теоретичних результатів на адекватність шляхом їх комп'ютерного моделювання з використанням реальних параметрів конкретного підйомного крана та його системи електропривода.

Синтез імітаційної моделі для моделювання процесів у системі електропривода підйомного крана як об'єкта з класу динамічних з параметрами, змінними в часі та у просторі здійснено на прикладі кранової установки з асинхронним електроприводом, якою реалізується процес підймання вантажу масою $m_w = 400(\text{kg})$ на висоту $h = 10(\text{m})$. Інші потрібні параметри обраної кранової установки з асинхронним електроприводом наведені в підрозділі 2.2.

Лістинг розрахунку параметрів математичної моделі в ПП Mathcad для визначеного класу динамічних об'єктів з параметрами, змінними у часі та у просторі, зображено на рис. 3.1. А синтезована в програмному середовищі Matlab Simulink з використанням числових значень цих параметрів імітаційна модель динамічного моменту системи, яким задається права частина в математичній моделі (2.9), зображена на рис. 3.2.



$$c_{1x} := \frac{\alpha_{1*} \cdot t_{12}}{w_{y*}} = 0.032 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$$

$$c_{2*} := \frac{2 \cdot (J_{0**} - J_{0*} - c_{1x} \cdot (t_1 + t_{12} + t_{23}))}{t_1^2 + t_{12}^2 + t_{23}^2 - 2 \cdot t_{12} \cdot (t_1 + t_{12} + t_{23})} = 0.009 \text{ J}$$

$$J_{0*} := J_* + \frac{1}{z_i^2} \cdot J_i + (m_w + m_{MT} \cdot h_*) \cdot \frac{D_K^2}{z^2} = 0.177 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$a_t := \frac{c_{2*}}{2} = 0.005 \text{ J}$$

$$b_t := -c_{1*} = -0.016 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$$

$$c_t := J_{0*} = 0.177 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\Delta_t := 4 \cdot a_t \cdot c_t - b_t^2 = 0.003 \frac{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^4}{\text{s}^2}$$

$$a_w := -M_P \cdot k_2 = -0.8 \text{ J}$$

$$b_w := M_P \cdot k_1 = 1.6 \text{ J}$$

Рисунок 3.1 – Лістинг розрахунку параметрів математичної моделі системи електропривода підйомного крана для імітаційної моделі процесів підймання вантажів цим краном та їх опускання

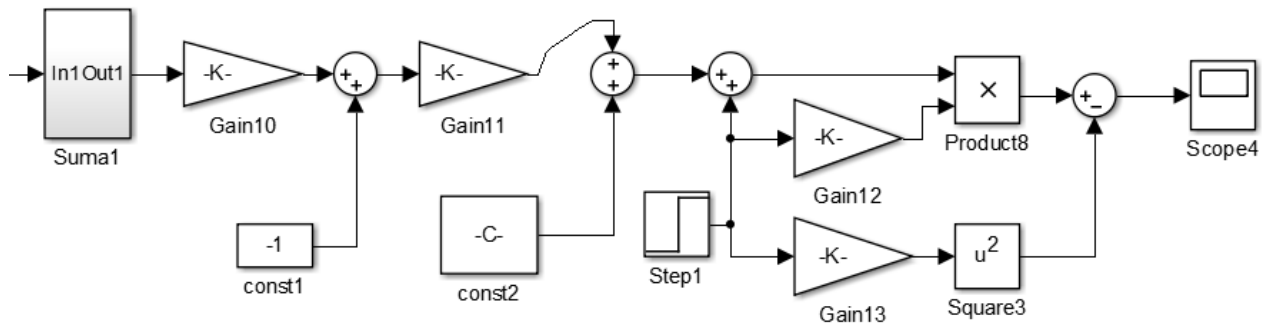
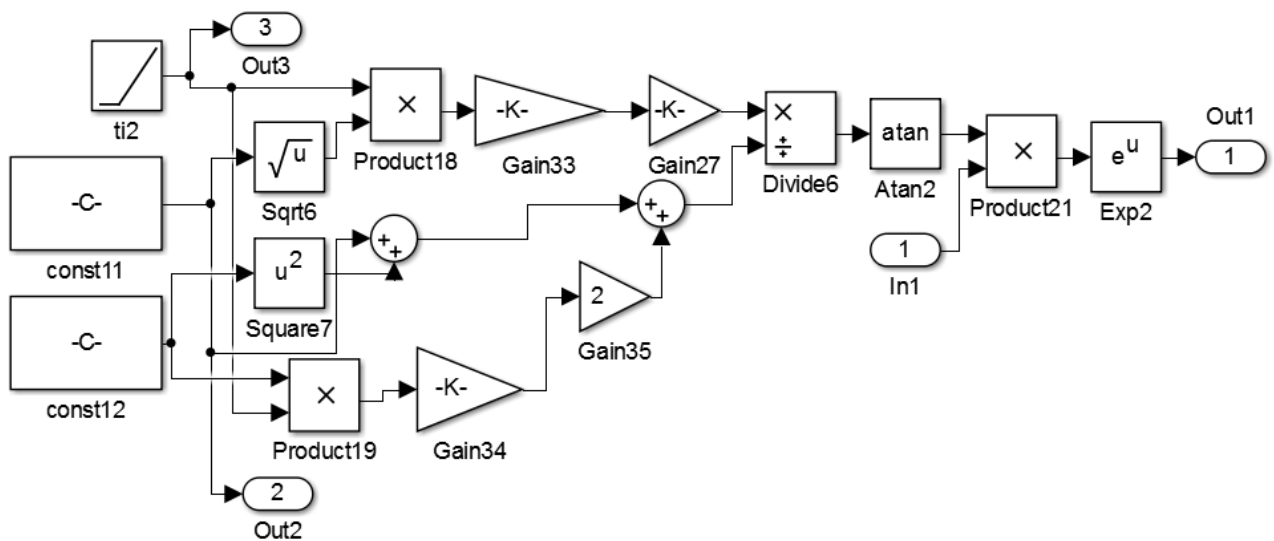


Рисунок 3.2 – Імітаційна модель динамічного моменту на валу тягового електродвигуна системи електропривода підйомного крана

Результат моделювання динамічного моменту за допомогою зображеної на рис. 3.2 імітаційної моделі наведено на рис. 3.6.

На рис. 3.3–3.5 наведена синтезована імітаційна модель, за допомогою якої промодельовано роботу системи за типовою тахограмою для кранових механізмів, наведеної на рис. 2.1.



Рисунку 3.3 – Перша частина імітаційної моделі до блока «Exp2» системи електропривода підйомного крана з урахуванням поздовжніх коливань вантажу при його переміщенні

Для моделювання повного циклу підймання підйомним краном вантажу було враховано, що рівняння динаміки (2.9) для періоду руху електропривода з усталеною кутовою швидкістю, як показано в підрозділі 3.2, набуває вигляду (3.28), а для періоду гальмування системи під час підймання рівняння зміни моменту навантаження набуває вигляду (3.27).

Результати моделювання динамічних процесів за допомогою зображеної на рис. 3.3–3.5 імітаційної моделі також наведено у наступному підрозділі цієї роботи (рис. 3.7 та 3.8), який присвячено аналізу усієї сукупності отриманих результатів.

3.4 Результати моделювання роботи кранового механізму з урахуванням поздовжніх коливань у тросі, змін у часі приведенного моменту інерції махових мас та моменту навантаження

На рис. 3.6 наведено графік зміни в часі динамічного моменту, що діє на вході системи, отриманий за допомогою імітаційної моделі, зображеної на рис. 3.2. Із цього графіка чітко проглядається суттєва залежність цього моменту від змінних у часі та просторі параметрів цієї системи. Нагадаємо, що зміна в часі параметрів обумовлена зміною в часі приведенного моменту інерції махових мас, викликаного зміною радіуса барабана намотування та змінною масою як тієї частини троса, який намотується на барабан, так і тією, яка скорочується чи видовжується між барабаном і вантажем в процесі переміщення останнього. А зміна в просторі параметрів цієї системи зумовлена повздовжніми коливаннями, які виникають в тросі в процесі переміщення вантажу після його відриву від платформи, а також при будь-якій зміні кутової швидкості тягового електродвигуна.

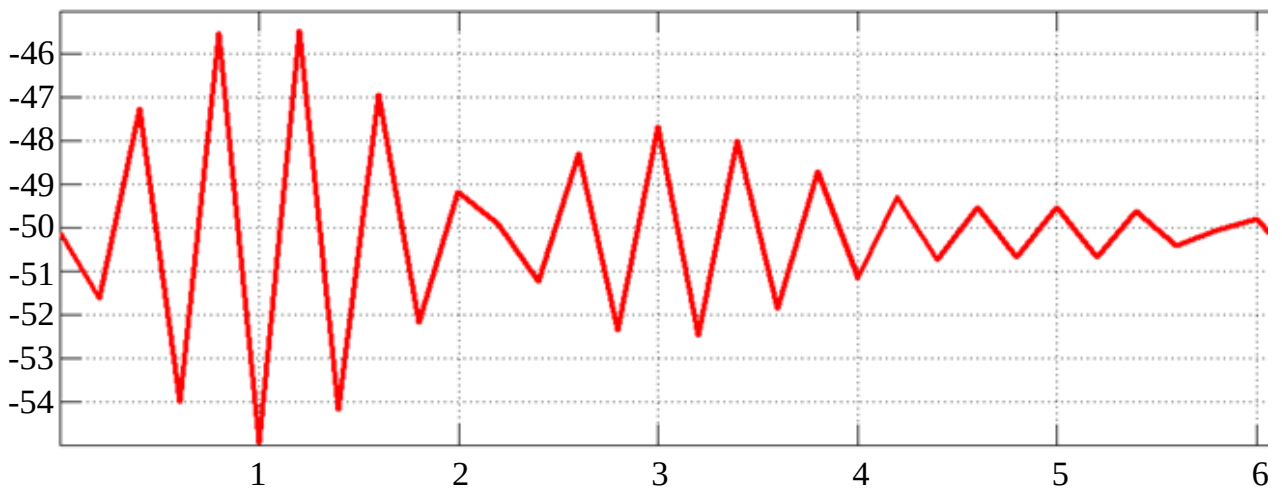


Рисунок 3.6 – Результати моделювання зміни динамічного моменту системи електропривода підйомного крана

А на рис. 3.7 зображено графік наростання кутової швидкості обертання вала тягового електродвигуна після запуску на підймання вантажу, отриманий за допомогою імітаційної моделі, показаної на рис. 3.3–3.5. Як бачимо, коливання кутової швидкості на цьому графіку є суттєво меншим за коливання динамічного моменту, оскільки кутова швидкість є віднесеним до приведенного моменту інерції інтегралом від динамічного моменту, тобто система електропривода відіграє у нашому випадку роль фільтра високих частот. Але, навіть не зважаючи на фільтрацію, на графіку кутової швидкості отримано коливання в межах 10%, викликані змінами параметрів системи електропривода у часі та просторі. Для більш наочного подання коливань на цьому ж рис. 3.7 на нижній кривій відображено той же графік, що і на верхній, але у збільшеному масштабі і лише в діапазоні, близькому до усталеної швидкості.

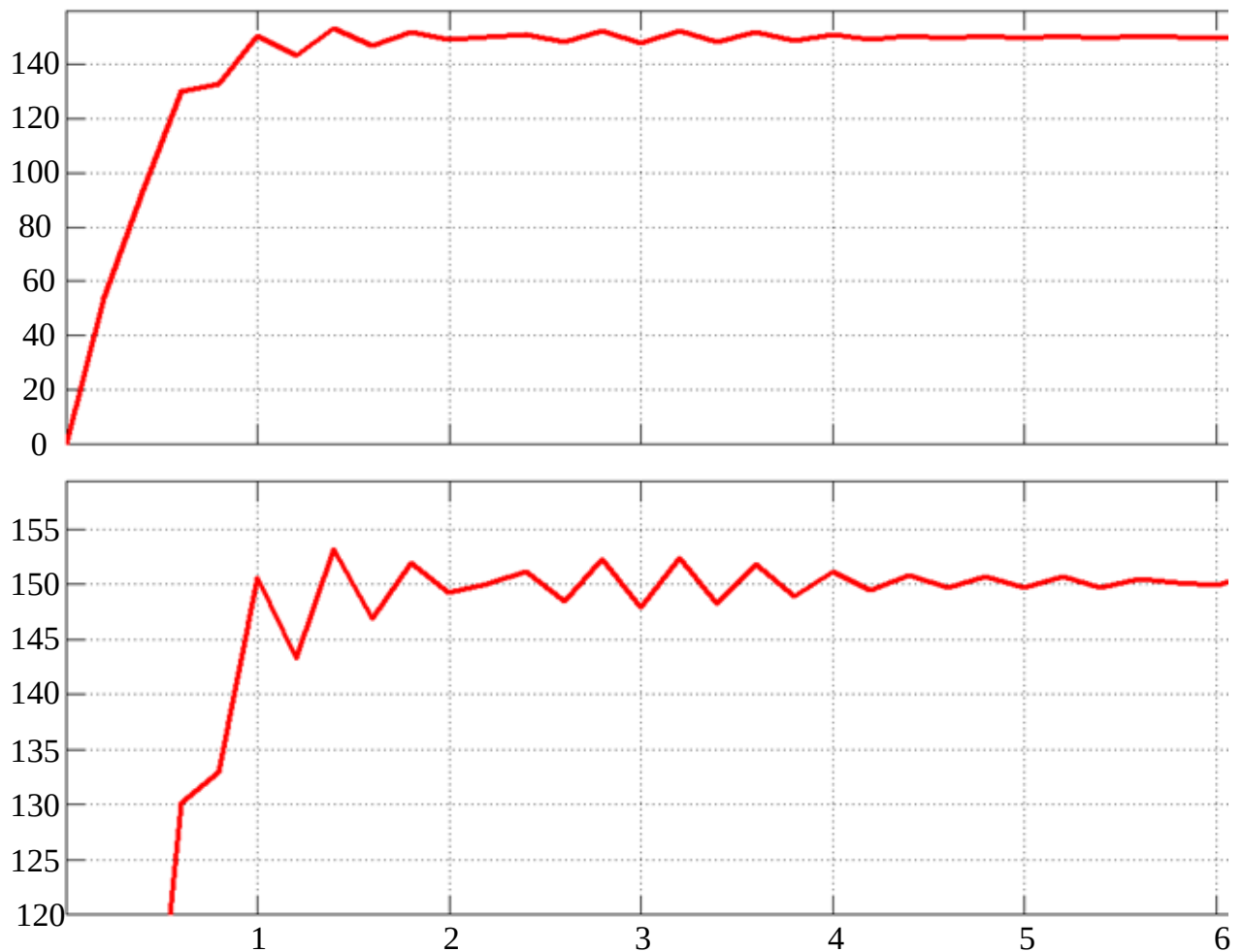


Рисунок 3.7 – Результати моделювання зміни кутової швидкості кранового механізму, а саме процесу підймання вантажу з урахуванням поздовжніх коливань у тросі

На рис. 3.8 зображено повний цикл моделювання, яким охоплено і процес зменшення кутової швидкості при підйманні вантажу на завершальній ділянці траєкторії руху. З цього графіка легко бачити, що за рахунок змінних параметрів системи коливання виникають і у завершальній фазі підймання вантажу, що може призвести до небажаних контактів вантажу зі стрілою чи естакадою підйомного крана.

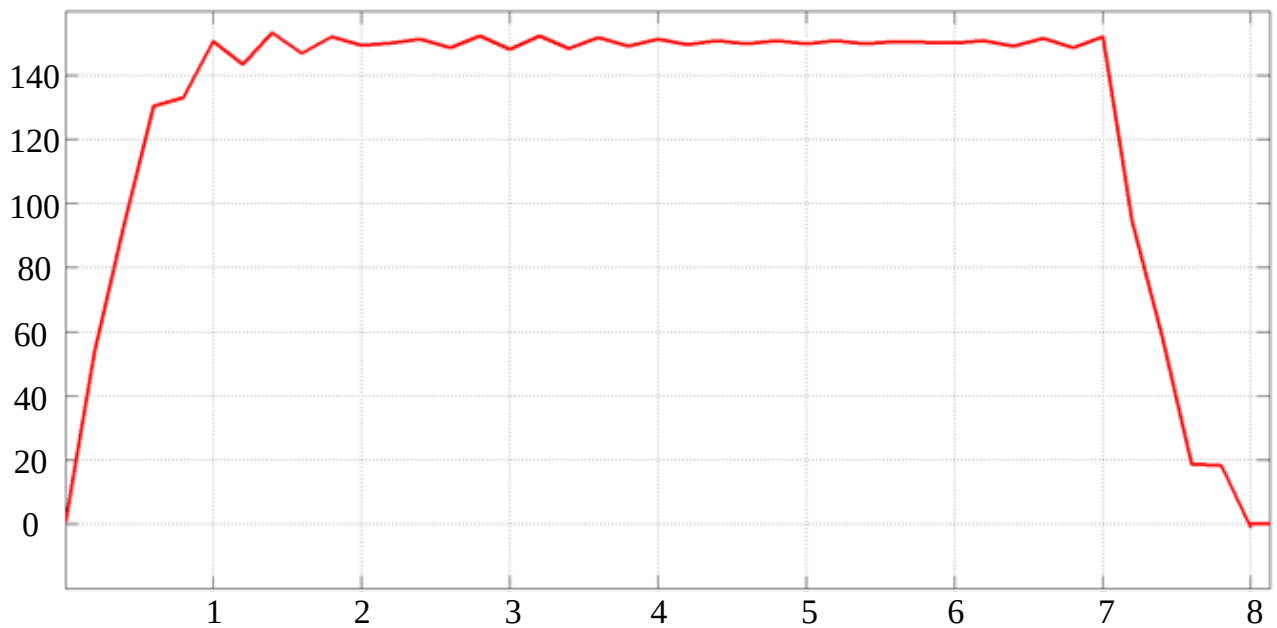


Рисунок 3.8 – Графік повного циклу зміни кутової швидкості електропривода підйомного крана під час підймання вантажу з урахуванням поздовжніх коливань у тросі та змін у часі приведенного моменту інерції махових мас

Якщо графіки процесів в системі електропривода підйомного крана, які наведені на рис. 3.6–3.8 та які отримані шляхом імітаційного моделювання з використанням синтезованих у розділах 2 та 3 математичних моделей, що враховують змінні в часі і у просторі параметри, зіставити з графіками процесів в системі електропривода підйомного крана з приблизно однаковими характеристиками, які отримані експериментально авторами роботи [78] і наведені у цій роботі на рис. 9.1 (с. 240, 241), на рис. 9.2 (с. 245) та на рис. 9.3 (с. 247), то побачимо, що вони мають однаковий характер і лише незначно відрізняються масштабами, що свідчить про адекватність наведених математичних моделей реальним процесам, які мають місце в цьому класі динамічних систем. І в той же час, якщо графіки процесів, що наведені в роботі [78] на рис. 3.2 (с. 68), на рис. 3.3 (с. 73), на рис. 3.4 (с. 75) та на рис. 3.5 (с. 78), які отримані авторами роботи [78] з використанням математичних моделей зі сталими і в часі, і в просторі параметрами за двомасовою структурою об'єкта, з їх же експериментально отриманими графіками, наведеними на згаданих вище рис. 9.1, 9.2 та 9.3, то легко переконаємось у тому, що вони мають різний

характер, що є свідченням неадекватності математичних моделей зі сталими параметрами реальним процесам, які мають місце в цьому класі динамічних систем.

Текст підрозділів 3.3 – 3.4 дисертації складено з використанням авторських наукових публікацій [11].

3.5 Висновки до третього розділу

1. Обґрунтовано необхідність системного підходу до аналізу процесів переміщення вантажів підйомним краном, який враховував би і зміну параметрів цього процесу у часі, зумовлену змінами приведенного моменту інерції системи електропривода та моменту навантаження, і вплив повздовжніх коливань, які виникають у тросі, на який підвішується вантаж.

2. З використанням структури звичайного диференціального рівняння зі змінними в часі параметрами та структури диференціального рівняння в частинних похідних 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 повздовжніх коливань, які виникають у тросі, на який підвішується вантаж.

3. Запропоновано алгоритм практичну реалізацію синтезованої системної математичної моделі процесу переміщення вантажу підйомним краном, який дозволяє покроково оцінити цей процес в темпі його протікання.

4. Адекватність математичних моделей одного класу об'єктів зі змінними в часі та просторі параметрами доведена шляхом порівняння результатів імітаційного моделювання, виконаного у даному розділі, з результатами експериментального дослідження цього ж класу об'єктів іншими авторами.

Текст третього розділу дисертації складено з використанням авторських наукових публікацій [11], [93].

РОЗДІЛ 4

ЗАКОН ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ОДНИМ КЛАСОМ ОБ'ЄКТІВ З ПАРАМЕТРАМИ, ЗМІННИМИ У ЧАСІ ТА ПРОСТОРИ

4.1 Синтез закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі

Як наведено у попередніх розділах, синтезуючи математичну модель системи електропривода підйомного крана, слід потрібно враховувати ще й процес виникнення повздовжніх коливань у тросі, який описується диференціальним рівнянням в частинних похідних (3.8).

Задача даного розділу полягає у тому, щоб, використавши усі викладені вище вихідні передумови, синтезувати систему оптимального керування тяговим електроприводом підйомного крана як об'єкта з параметрами, змінними у часі та просторі, за критерієм мінімуму амплітуди повздовжніх коливань, які виникають в тросі, до якого підвішений вантаж, під час розгону електродвигуна від нульової швидкості до усталеної ω_y , тобто під час відриву вантажу від майданчика його встановлення, аби запобігти руйнуванню як вантажу, так і майданчика, яке може статися за наявності повздовжніх коливань в тросі.

Із рис. 2.1 легко бачити, що на пусковій ділянці кутова швидкість тягового електродвигуна підйомного крана змінюватиметься за лінійним законом

$$\omega(t) = \frac{\omega_y}{t_1} t \quad (4.1)$$

Але ж, як уже показано у попередніх розділах, через наявність у підйомного крана троса, до якого підвішується вантаж, та наявність барабана, на який цей трос намотується при підйманні вантажу, реальна кутова швидкість $\omega^*(t)$ тягового електродвигуна системи електропривода цього крана на пусковому відрізку часу $[0, t_1]$ описується виразом (3.29) за умови, що в ньому дискретні значення часу $t_i, i=0,1,2,\dots$ замінені на неперервні, тобто, якщо в

загальному вигляді вираз (3.29) записується як

$$\omega^*(t) = \phi(t, M_p, M_w(t_1, t)). \quad (4.2)$$

Одразу ж зауважимо, що, виписуючи загальну модель (4.2), було залишено в ній, окрім незалежної змінної t , ще й момент навантаження $M_w(t_1, t)$ та пусковий момент M_p , тому що від першого з них залежить характер змін кутової швидкості тягового електродвигуна системи електропривода підйомного крана, а на другий з них є можливість впливати у випадку використання його як тяговий асинхронний електродвигун з частотним регулюванням кутової швидкості обертання вала його ротора. Показано, як можна здійснювати цей вплив. В 19-му розділі 2-го тому «Енергоіздатівського» електротехнічного довідника від 1982 року, присвяченому електричним машинам змінного струму, наведені типові механічні характеристики асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором, які зв'язують кутову швидкість обертання вала ротора з моментом, який створюється на валі, тобто сімейство залежностей $\omega = \omega(M)$, кожна крива графіка яких бере початок на осі кутової швидкості зі значення синхронної швидкості

$$\omega_c = 2\pi f_c, \quad (4.3)$$

де f_c – частота змінного струму джерела живлення статора асинхронного електродвигуна, а закінчується значенням пускового моменту M_p на осі моментів, яке відповідає даному значенню f_c . Тож, взявши за основу це сімейство та вираз (4.3), нескладно побудувати залежність пускового моменту M_p від синхронної частоти f_c змінного струму джерела живлення статора асинхронного електродвигуна, тобто залежність $M_p = M_p(f_c)$, графік якої у відносних одиницях, тобто у вигляді $M = M(f)$, де $M = \frac{M_p}{M_{\max}}$, $f = \frac{f_c}{50}$ для асинхронного електродвигуна КМ АИР250М (паспортні характеристиками якого наведено в розділі 2), зображено на рис. 4.1.

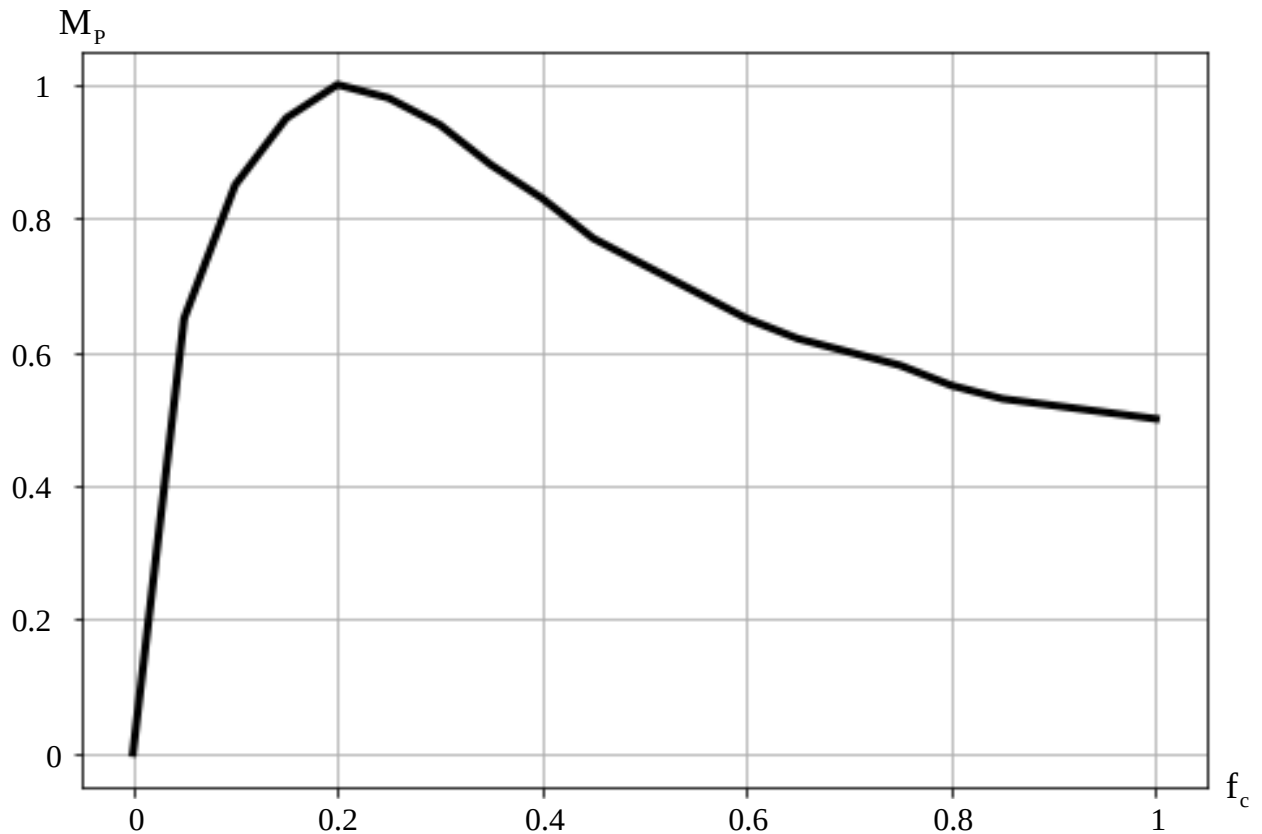


Рисунок 4.1 – Графік залежності у відносних одиницях пускового моменту M_p від синхронної частоти f_c змінного струму джерела живлення статора асинхронного електродвигуна

Дивлячись на графік залежності $M_p = M_p(f_c)$, легко побачити, що ця залежність може бути апроксимована виразом

$$M_p = af_c^{\frac{1}{2}} + bf_c - cf_c^2 \quad (4.4)$$

коефіцієнти a, b, c якого найбільш доцільно, для кожного конкретного асинхронного електродвигуна, паспортні характеристики якого відрізнятимуться від тих, що використані при побудові графіка на рис. 4.1, визначати методом найменших квадратів, на стандартній процедурі якого в даному розділі зупинятись не будемо, а будемо вважати ці коефіцієнти уже чисельно визначеними.

Підставляючи у вирази (3.31) пусковий момент у вигляді (4.4), буде отримано кутову швидкість, що наведена виразом (3.29), а в загальному вигляді – виразом (4.2), у вигляді функції, залежної уже від двох змінних t, f_c , тобто

залежністю

$$\omega^*(t, f_c) = \phi^*(t, f_c, M_w(t_1, t)) \quad (4.5)$$

з якої видно, що, змінюючи числове значення f_c , ми будемо отримувати різні числові значення кутової швидкості ω^* .

А тепер сформуємо функціонал J_{cr} у вигляді інтегралу від квадрата різниці лінійної, заданої виразом (4.1), та реальної, заданої виразом (4.5), кутових швидкостей, тобто у вигляді

$$J_{cr} = \int_0^{t_1} (\omega(t) - \omega^*(t, f_c, M_w(t_1, t)))^2 dt \quad (4.6)$$

Очевидно, що чим менше будуть відрізнятись числові значення реальної кутової швидкості, заданої виразом (4.5), яка має коливальний характер, від кутової швидкості, заданої лінійним законом (4.1), що визначаються в одні і ті ж моменти часу на відрізок $[0, t_1]$, тим меншою буде амплітуда коливань і меншим буде числове значення функціонала (4.6). А тому функціонал (4.6) доцільно використати як критерій оптимізації при синтезі системи оптимального керування тяговим електроприводом підйомного крана, за допомогою якої досягатиметься мінімум відхилення кривої наростання реальної кутової швидкості від кутової швидкості, що наростає за лінійним законом.

А як обмеження доцільно використати функціонал

$$J_{ob} = \int_0^{t_1} \omega^*(t, f_c, M(t_1, t)) dt, \quad (4.7)$$

яким визначається висота підйому вантажу, виражена в радіанах, за час t_1 , який в разі відпущення верхньої границі перетворюється у функцію

$$\psi(t) = \int_0^t \omega^*(\theta, f_c, M(\theta_1, \theta)) d\theta. \quad (4.8)$$

Після вибору функціонала (4.6) за критерій оптимізації, а функціонала (4.7) як обмеження задача синтезу системи оптимального керування тяговим електроприводом підйомного крана, за допомогою якої досягатиметься мінімум відхилення кривої наростання реальної кутової швидкості від кутової швидкості,

що наростає за лінійним законом, зводиться до ізопериметричної задачі оптимізації, алгоритм якої можна запозичити, наприклад, з роботи [10], згідно з яким потрібно знайти таку функцію $f_c = f_c(t)$, яка доставляє мінімум функціонала (4.6) за наявності обмеження (4.7), тобто яка насправді буде екстремаллю для функціонала (4.6).

А фізична інтерпретація цієї задачі полягає у тому, що потрібно знайти такий закон зміни в часі частоти струму джерела живлення обмотки статора асинхронного електродвигуна системи електропривода підйомного крана, який доставлятиме мінімум амплітуді коливальної складової в процесі наростання кутової швидкості обертання ротора цього електродвигуна після його пуску і до досягнення цієї кутовою швидкістю усталеного значення.

Функція Лагранжа для даної задачі матиме вигляд

$$L(t, f_c, M(t_1, t)) = \left(\frac{\omega_y}{t_1} t - \omega^*(t, f_c, M(t_1, t)) \right)^2 + \lambda(t)(\psi'(t) - \omega^*(t, f_c, M(t_1, t))), \quad (4.9)$$

а рівняння Ейлера-Лагранжа –

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\bullet)}{\partial f_c} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\bullet)}{\partial f'_c} \right) = 0, \\ \frac{\partial L(\bullet)}{\partial \psi} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\bullet)}{\partial \psi'} \right) = 0. \end{cases} \quad (4.10)$$

Підставляючи вираз (4.9) в рівняння (4.10), матимемо

$$\begin{cases} 2 \left(\frac{\omega_y}{t_1} t - \omega^*(\bullet) \right) \left(-\frac{\partial \omega^*(\bullet)}{\partial f_c} \right) - \lambda(t) \left(\frac{\partial \omega^*(\bullet)}{\partial f_c} \right) = 0, \\ -\frac{d\lambda(t)}{dt} = 0. \end{cases} \quad (4.11)$$

Систему рівнянь (4.11) можна подати і так:

$$\begin{cases} \left(\omega^*(\bullet) + \lambda(t) - \frac{\omega_y}{t_1} t \right) \left(\frac{\partial \omega^*(\bullet)}{\partial f_c} \right) = 0, \\ \lambda(t) = -\lambda_0 \end{cases}$$

або так

$$\begin{cases} \left(\omega^*(\bullet) + \lambda_0 - \frac{\omega_y}{t_1} t \right) = 0, \\ \left(\frac{\partial \omega^*(\bullet)}{\partial f_c} \right) = 0. \end{cases} \quad (4.12)$$

Для розв'язання системи рівнянь (4.12) застосований рекурентний алгоритм, запропонований у роботі [11], який для даної системи рівнянь набуде вигляду

$$\begin{cases} \omega^*(t[n], f_c[n], M(t_1, t[n])) = \omega^*(t[n-1], f_c[n-1], M(t_1, t[n-1])) - \\ - \gamma_\omega[n] \left(\omega^*(t[n-1], f_c[n-1], M(t_1, t[n-1])) + \lambda_0 - \frac{\omega_y}{t_1} t[n-1] \right), \\ f_c[n] = f_c[n-1] - \gamma_f[n] \left(\frac{\partial \omega^*(\bullet)}{\partial f_c} \right) \Big|_{\bullet=t[n-1], f_c[n-1], M(t_1, t[n-1])} \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (4.13)$$

4.2 Аналіз отриманого закону оптимального керування

Почнемо аналіз із зауваження, що в отриманому законі оптимального керування, який подано у вигляді рівнянь (4.13), для його практичного застосування необхідно брати частинну похідну від виразу (3.29) з урахуванням співвідношень між параметрами цього виразу, заданих, у свою чергу, виразами (3.30) і (3.31). Дивлячись на ці вирази (3.29), (3.30), (3.31), легко бачити, що формула для цієї похідної в разі її безпосереднього обчислення виявиться надзвичайно складною, тож її реалізувати на мікропроцесорі, включеному в структуру системи оптимального керування, теж буде надзвичайно складно. Тому є сенс подати цю похідну наближено, замінивши її відношенням приросту кутової швидкості до приросту частоти струму джерела живлення системи електропривода підйомного крана, тобто подати її у вигляді

$$\left(\frac{\partial \omega^*(\bullet)}{\partial f_c} \right) \Big|_{\bullet=t[n-1], f_c[n-1], M(t_1, t[n-1])} \approx \frac{\omega^*(t[n], f_c[n], M(t_1, t[n])) - \omega^*(t[n-1], f_c[n-1], M(t_1, t[n-1]))}{f_c[n] - f_c[n-1]} \quad (4.14)$$

Цілком очевидно, що чим на меншому відрізку часу

$$\Delta t[n] = t[n] - t[n-1] \quad (4.15)$$

реалізувати наближену рівність (4.14), тим ступінь цього наближення буде вищим, й, відповідно, і вищою буде точність відтворення закону оптимального керування (4.13).

Другий аспект, на який потрібно звернути увагу при практичній реалізації закону оптимального керування (4.13), полягає у правильному підборі вагових коефіцієнтів $\gamma_\omega[n]$, $\gamma_f[n]$, які можуть бути як константами, так і залежними від номера ітерації, але завжди меншими одиниці (найчастіше їх вибирають константами, оскільки це спрощує обчислення).

Третій аспект, який додає ускладнень при реалізації закону оптимального керування (4.13) навіть при використанні спрощення (4.14), полягає у необхідності приведення комплексних чисел, які виникають у виразі (3.29) після підстановки в нього виразів (3.30), (3.31), в область дійсних чисел у вигляді періодичних функцій з класу тригонометричних.

Ну і останній аспект, на який потрібно звернути увагу, аналізуючи закон оптимального керування (4.13), полягає у тому, що швидкість його реалізації з прийнятною точністю суттєво залежатиме від того, наскільки вдало вибрано константу γ_0 , від якої, як видно з першого рівняння системи рівнянь (4.12), залежить наскільки близькою буде траєкторія реальної кутової швидкості приводного електродвигуна (4.2) до ідеальної траєкторії у вигляді прямої лінії (4.1), тобто наскільки вдається шляхом реалізації закону оптимального керування (4.13) «погасити» повздовжні коливання, що виникають в тросі під час відриву вантажу від майданчика, на якому цей вантаж було встановлено. Очевидно, що чим меншим буде взяте числове значення цієї константи, тим

меншою буде амплітуда повздовжніх коливань, але при цьому на досягнення оптимальної траєкторії необхідно буде витратити більшу кількість ітерацій.

Більш детально наведений у підрозділах 4.1–4.2 закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі, описаний у роботі [92].

4.3 Побудова структурної схеми мікропроцесорної системи автоматичного керування

На рис. 4.2 наведено структурну схему мікропроцесорної системи автоматичного керування, яка реалізує отриманий закон оптимально керування (4.13), розв'язок якого, з урахуванням рівнянь (4.14) та (4.15), матиме вигляд

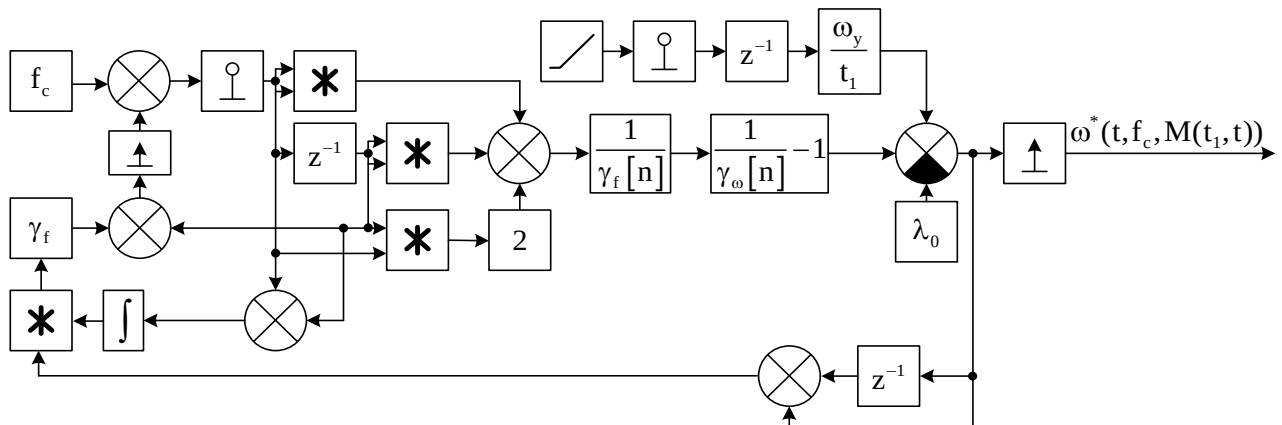


Рисунок 4.2 – Структурна схема мікропроцесорної системи автоматичного керування, яка реалізує синтезовані закони оптимального керування

$$\begin{aligned} \omega^*(t[n], f_c[n], M(t_1, t[n])) = \\ = \frac{(f_c[n])^2 - 2 \cdot f_c[n] \cdot f_c[n-1] + (f_c[n-1])^2}{\gamma_f[n]} \cdot \left(\frac{1}{\gamma_\omega[n]} - 1 \right) - \lambda_0 + \frac{\omega_y}{t_1} t[n-1] \end{aligned} \quad (4.16)$$

З урахуванням необхідності контролю динамічного моменту на валу та швидкості обертання тягового електродвигуна кранового механізму наведено приклад застосування отриманого закону оптимального керування в системі керування з асинхронним двигуном на перетворювачі частоти з автономним

інвертором струму, виконаної на основі узагальнення матеріалів робіт [42], [82], [109–111]. В зазначеній системі з частотно-струмовим керуванням стабілізація моменту на валу тягового електродвигуна здійснюється пропорційного струму, що вимагає вимірювання фазних струмів в обмотках статора за допомогою трансформаторів струму. Керування здійснюється мікропроцесорною системою шляхом задання на випрямлячі фазного струму статора і на автономному інверторі струму частоти напруги живлення. Керування ґрунтується на пропорційності магнітного потоку фазного струму статора і абсолютного ковзання та динамічного моменту на валу. На рис. 4.3 наведена структура системи з частотно-струмовим керуванням тяговим електродвигуном, яка дозволяє реалізувати отримані синтезовані закони оптимального керування.

Наведена система має два канали регулювання: канал регулювання струму статора з впливом на силовий випрямляч (СВ), що забезпечує задання та стабілізацію магнітного потоку, і канал регулювання частоти з впливом на автономний інвертор струму (АІС), що забезпечує задання та стабілізацію швидкості обертання асинхронного тягового електродвигуна (АД).

Сигнал струму зніматися пропорційно фазному струму статора АД але вимагає забезпечення високої точності вимірювання та фільтрації вихідного сигналу. Силовий випрямляч керується мікроконтролером (МК) за зворотним зв'язком за струмом в режимі стабілізації струму і разом з АІС являє собою джерело струму. В цьому випадку при керуванні силовим випрямлячем з урахуванням зворотного сигналу, який формується на операційно сумуючому підсилювачі (ОСП) з сигналів фільтра струму (ФС) та функціонального перетворювача (ФП), забезпечується така вихідна напруга, при якій струм навантаження СВ залишається постійним. Знімання та оброблення значення фазних струмів статора виконується трансформаторами струму (ТС) та датчиком струму (ДС) відповідно. Автономний інвертор струму керується мікроконтролером з урахуванням зворотного сигналу за швидкістю, який формується на ОСП, з сигналів датчика швидкості (ДШ) та формувача імпульсів (ФІ). Пристрій захисту (ПЗ) забезпечує швидкодійне вимкнення силового комутаційного автомата (СКА) та інформування мікроконтролера про проблему, яка виникла згідно з отриманими сигналами від: ДС, ДШ та вузла захисних кіл, датчиків струму й напруги (ЗК і Д), що забезпечує захист силових елементів перетворювача й електропривода в цілому від перенапруг, струмів короткого замикання в колі постійного струму.

4.4 Висновки до четвертого розділу

1. Синтезовано закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часі та просторі, до якого належить система електропривода підйомного крана, оскільки у цій системі електропривода мають

місце і зміна характеристик процесу переміщення вантажів у часі, обумовлена 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.

2. Як критерій оптимізації використано функціонал у вигляді інтеграла від квадрата відхилень реальної кутової швидкості приводного електродвигуна підйомного крана від її ідеальної траєкторії.

3. 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.

4. Запропоновано алгоритм практичної реалізації синтезованого закону оптимального керування системою електропривода підйомного крана як динамічного об'єкта з параметрами, змінними у часі та просторі.

5. Побудовано структурну схему мікропроцесорної системи автоматичного керування, яка реалізує отриманий закон оптимально керування.

6. Наведено функціональну схему системи з частотно-струмовим керуванням тяговим електродвигуном, яка дозволяє реалізувати отримані синтезовані закони оптимального керування. Зазначено, що для керування силовим випрямлячем за зворотним зв'язком по струму статора необхідно забезпечити високу точність вимірювання та фільтрацію вихідного сигналу.

Текст четвертого розділу дисертації складено з використанням авторської наукової публікації [92].

РОЗДІЛ 5

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТРУМУ, ЩО ПРОТІКАЄ У ВТОРИННИХ ОБМОТКАХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ОДНОКАСКАДНИХ ТА ДВОКАСКАЖНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ СТРУМУ

5.1 Аналіз фізичних процесів, що відбуваються у вимірювальному трансформаторі струму

Як було встановлено у розділах 1 і 4, вимірювання та контроль величини фазних струмів статора є необхідним як для оцінювання перегріву асинхронного двигуна підйомного механізму, коли той працює майже в неперервному режимі з важкими вантажами, так і для стабілізації моменту на валу електродвигуна, який встановлюється пропорційно тому ж струму статора. А тому виникає необхідність розглянути характеристики процесів у вимірювальних трансформаторах струму та їх математичних моделей.

Вимірювальні трансформатори струму є невід'ємною складовою електричних мереж та електротехнічних комплексів зі значними струмами змінного характеру, де є необхідність у встановленні релейного захисту або вимірюванні виробленої чи спожитої електричної потужності. Принцип їх роботи та детальний аналіз режимів функціонування і моделювання, як в усталених, так і в перехідних режимах, викладені в роботах [57], [123] та в нормативному документі ГОСТ 7746-78. Трансформаторы тока. Общие технические требования, а популярний виклад – в роботі [29]. Узагальнені характеристики матеріалу, викладеного в роботах [57], [123], наведені в роботі [35], з використанням якої і буде формуватися вихідна передумова. І почнемо з посилання на рис. 25-14, на якому показана графічна інтерпретація струмів, електрорушійних сил і потокозчеплення, що мають місце в трансформаторі струму в усталеному режимі його функціонування. Оскільки посилання на ці графіки гратимуть роль першої вихідної передумови для даного дослідження, то

їх буде наведено на рис. 5.1, дещо уточнивши графіку порівняно з тією, що виконана на рис. 25-14.

На цьому рисунку (в позначеннях роботи [35]):

i_1 – струм у первинній обмотці вимірювального трансформатора струму, яка має w_1 витків, тобто, той струм, який потрібно виміряти; i_2^* – струм у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму, яка має w_2 витків, приведений до первинної обмотки; i_0 – струм намагнічування магнітопроводу вимірювального трансформатора струму, значення якого, як впливає з балансу магніторухливих сил,

$$i_1 w_1 = i_2 w_2 + i_0 w_1, \quad (5.1)$$

який дорівнює

$$i_0 = i_1 - i_2^*; \quad (5.2)$$

Ψ – потокозчеплення, яке дорівнює кількості витків первинної обмотки, помножених на результуючий магнітний потік, що їх перетинає, тобто

$$\Psi = w_1 \Phi, \quad (5.3)$$

де

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2, \quad (5.4)$$

Φ_1, Φ_2 – протилежно спрямовані магнітні потоки, створювані струмами i_1, i_2 ;

e_2 – електрорушійна сила, створювана у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму результуючим магнітним потоком відповідно до закону електромагнітної індукції, тобто

$$e_2 = \frac{d\Psi}{dt} = w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (5.5)$$

γ_1, γ_2 – відповідно, кут, за якого магнітопровід вимірювального трансформатора струму входить в режим насичення та виходить з нього.

Наведені співвідношення (5.1)–(5.5) дозволяють без додаткових пояснень зрозуміти, чому графіки, зображені на рис. 5.1, мають саме такий вигляд, а тому не будемо витрачати час на їх трактування. Звернемо увагу лише на те, що на рис. 5.1 як доповнення до того, що зображено на рис. 25-14 в роботі [35], додано

штриховою лінією залежність приведеної до первинної обмотки аперіодичної складової і струму у вторинній обмотці, який виникає в момент переходу магнітопроводу в стан насичення.

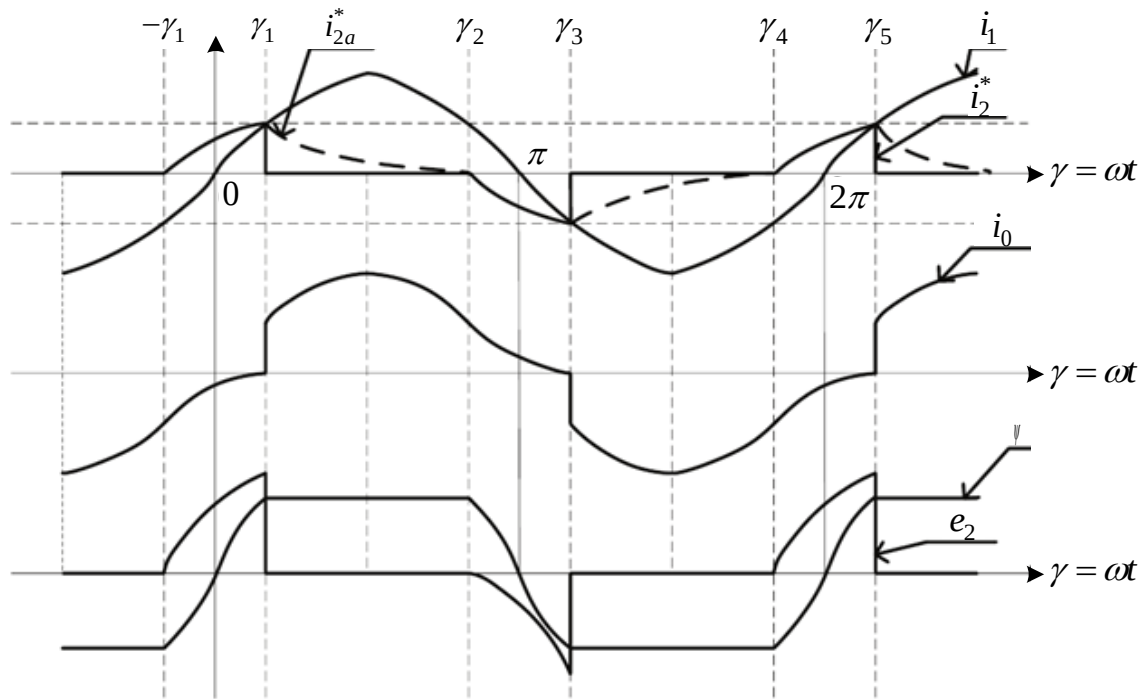


Рисунок 5.1 – Графіки струму i_1 в первинній обмотці вимірювального трансформатора струму, приведенного струму i_2^* у його вторинній обмотці, струму намагнічування i_0 , потокозчеплення Ψ та е.р.с. e_2 , що наводиться у вторинній обмотці

Як вказано в ГОСТ 7746-78, вимірювальні трансформатори струму потрібно експлуатувати, не виходячи суттєво за номінальні значення струму в обох обмотках I_{1nom}, I_{2nom} (дійсні значення), що дало право укладачам нормативних документів їх відношенням задавати коефіцієнт трансформації K_{TT} вимірювального трансформатора струму у вигляді

$$K_{TT} = \frac{I_{1nom}}{I_{2nom}}. \quad (5.6)$$

Нагадаємо, що в усіх вимірювальних трансформаторах струму, що серійно випускаються електротехнічною промисловістю для встановлення в

електричних мережах і комплексах, $I_{2\text{ном}} = 5(A)$, а шкала первинних номінальних струмів стандартизована в межах до 40 000 А.

Співвідношення (5.6) при розв'язанні даної задачі, сформульованої нижче, буде відігравати роль другої вихідної передумови.

Як третю вихідну передумову використаємо рекомендований нормативними документами вираз для визначення похибки ε вимірювання струму вимірювальним трансформатором у вигляді

$$\varepsilon(\%) = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_{\text{ТТ}} i_2(t) - i_1(t))^2 dt}. \quad (5.7)$$

Четверту вихідну передумову теж візьмемо з роботи [35], використавши рис. 23-15 та 23-16, на першому з яких зображені графіки залежності ступеня насичення $A_z = B_s / B_n$ магнітопроводу вимірювального трансформатора струму від $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$, а на другому – графіки залежності похибки вимірювання $\varepsilon(\%)$ від ступеня насичення A_z магнітопроводу. Ці графіки не будуть наведені, тому що з них потрібні лише крайні точки, на першому з яких показано, що ненасиченим ($A_z = 1$) магнітопровід стає лише тоді, коли $\Delta\gamma = 0$, а повністю насиченим ($A_z = 0$), коли $\Delta\gamma = 180^\circ$, а на другому показано, що похибка вимірювання $\varepsilon(\%)$ дорівнює нулю, якщо магнітопровід ненасичений ($A_z = 1$), і дорівнює 100%, якщо магнітопровід повністю насичений ($A_z = 0$).

Нагадаємо, що B_n – це розрахункове значення магнітної індукції для даного магнітопроводу, за якого він ще буде ненасиченим, а B_s – це поточне робоче значення магнітної індукції в магнітопроводі, а також те, що магнітний потік – це відношення магнітної індукції до площі поперечного перерізу магнітопроводу.

За п'яту вихідну передумову використаємо той факт, що про дійсне значення I_{lkz} струму, який має місце в електричній мережі у разі виникнення короткого замикання у ній, судять, орієнтуючись на показання вимірювальних трансформаторів струму, встановлених у лініях електропередачі у цій мережі та

орієнтованих на вимірювання струмів усталених режимів, які суттєво не перевищують номінальні значення для цієї мережі, тобто, орієнтованих на справедливість співвідношень (5.6), (5.7) в усьому діапазоні вимірювань.

Сформулювавши усі вихідні передумови даного дослідження, підійшли до формулювання задачі цього дослідження, яка полягає у тому, щоб, спираючись на перші три вихідні передумови, довести чи спростувати справедливість четвертої вихідної передумови, від якої суттєво залежить адекватність результатів, отриманих за використання п'ятої вихідної передумови, в разі невиконання якої суттєво знижується надійність електричної мережі, оскільки, як показано в роботі [41], комутаційний ресурс вимикачів мережі суттєво залежить від значення струму, який вони відключають, і вимикач, який за паспортними характеристиками здатний здійснити 80 вимкнень лінії з номінальним струмом, лінію, на різних ділянках якої виникають короткі замикання, здатен вимкнути суттєво меншу кількість разів. І саме задля правильного оцінювання залишкового ресурсу вимикачів після здійснення ними чергового вимкнення потрібно якнайточніше визначати дійсне значення струму у лінії, що вимикається, тобто, якомога точніше визначати дійсне значення струму I_1 у первинній обмотці вимірювального трансформатора струму, орієнтуючись на дійсне значення I_2 струму у вторинній обмотці цього трансформатора, яке вимірюється включеним у цю обмотку вимірювачем струму.

5.2 Метод аналізу електромагнітних процесів в однокаскадних трансформаторів струму

Почнемо з аналізу графіків, зображених на рис. 5.1.

Оскільки е.р.с. e_2 , яка наводиться у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму і пов'язана з потокозчепленням Ψ та магнітним потоком Φ в магнітопроводі співвідношенням (5.5), пов'язана ще й зі струмом i_1 у первинній обмотці співвідношенням

$$e_2 = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt}(Mi_1) = M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt}, \quad (5.8)$$

де M — взаємна індуктивність первинної та вторинної обмоток, то, коли магнітопровід не насичений, ця е.р.с. буде визначатись виразом (5.8), а коли магнітопровід входить в насичення, в стані якого

$$\Psi = w_2 \Phi = \text{const}, \quad (5.9)$$

а
$$\omega t_1 = \gamma_1, \quad \omega t_{-1} = -\gamma_1, \quad \omega t_2 = \gamma_2, \quad (5.10)$$

то, згідно з виразами (5.5), (5.8)–(5.10), в моменти часу $t \in [t_{-1}, t_2]$ мають місце рівності:

$$e_2(t) = \begin{cases} e_2(t) = \omega M I_{1m} \cdot \cos(\omega t) + \frac{dM}{dt} I_{1m} \cdot \sin(\omega t), & \forall t \in \left(-\frac{\gamma_1}{\omega}, \frac{\gamma_1}{\omega}\right); \\ e_2(t) = 0, & \forall t \in \left(\frac{\gamma_1}{\omega}, \frac{\gamma_2}{\omega}\right); \end{cases} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} M \neq 0, \quad \frac{dM}{dt} \neq 0, \quad \forall t \in \left(-\frac{\gamma_1}{\omega}, \frac{\gamma_1}{\omega}\right); \\ M = 0, \quad \frac{dM}{dt} = 0, \quad \forall t \in \left(\frac{\gamma_1}{\omega}, \frac{\gamma_2}{\omega}\right). \end{aligned} \quad (5.12)$$

З графіка, показаного на рис. 5.1, випливає, що при $t = t_{-1} = \frac{-\gamma_1}{\omega}$ маємо

$$e_2(t_{-1}) = 0, \quad (5.13)$$

а з виразу (5.13), з урахуванням виразу (5.8), випливає, що

$$\omega M I_{1m} \cdot \cos(\gamma_1) - \frac{dM}{dt} I_{1m} \cdot \sin(\gamma_1) = 0. \quad (5.14)$$

Рівняння (5.14) можна переписати і так

$$\frac{dM}{M} = \frac{\omega \cdot \cos(\gamma_1)}{\sin(\gamma_1)} dt. \quad (5.15)$$

Інтегруючи рівняння (5.15), матимемо

$$\ln M = (\omega \cdot \text{ctg}(\gamma_1))t + \ln C, \quad (5.16)$$

звідки

$$M(t) = C \cdot e^{(\omega \cdot \text{ctg}(\gamma_1))t}. \quad (5.17)$$

Оскільки при виведенні залежності (5.17) використано верхнє співвідношення з (5.11) на його лівій границі, то для визначення сталої інтегрування C в залежності (5.17) використаємо верхнє співвідношення з виразу (5.11) на його правій границі.

Тож, підставляючи залежність (5.17) у верхнє співвідношення виразу (5.11), на його правій границі матимемо

$$e(t_1) = \omega I_{1m} C \cdot e^{(\omega \cdot \text{ctg}(\gamma_1))t_1} \cdot \cos(\omega t_1) + I_{1m} C (\omega \cdot \text{ctg}(\gamma_1)) e^{(\omega \cdot \text{ctg}(\gamma_1))t_1} \cdot \sin(\omega t_1). \quad (5.18)$$

А з виразу (5.18) матимемо

$$C = \frac{e_2(t_1)}{2\omega I_{1m} e^{\gamma_1 \cdot \text{ctg}(\gamma_1)} \cdot \cos(\gamma_1)}. \quad (5.19)$$

Підставляючи вираз (5.19) у (5.17), отримаємо математичну модель для взаємної індуктивності на ділянці ненасиченого стану магнітопроводу у вигляді

$$M(t) = \frac{e_2(t_1) \cdot e^{(\omega \cdot \text{ctg}(\gamma_1))t_1}}{2\omega I_{1m} e^{\gamma_1 \cdot \text{ctg}(\gamma_1)} \cdot \cos(\gamma_1)}. \quad (5.20)$$

Тож, беручи до уваги те, що повний опір кола вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму Z_2 обчислюємо за формулою

$$Z_2 = \sqrt{(r_{2\text{ТГ}} + r_2)^2 + (x_{2\text{ТГ}} + x_2)^2}, \quad (5.21)$$

де $r_{2\text{ТГ}}, x_{2\text{ТГ}}$ – активний та реактивний опори вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму, а r_2, x_2 — активний та реактивний опори обмоток вимірювальних приладів, включених у коло вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму, та, беручи до уваги вирази (5.8) і (5.20), отримаємо, що при ненасиченому магнітопроводі на часовому відрізку $[t_{-1}, t_1]$ математична модель струму у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму матиме вигляд

$$i_2^{(1)}(t) = \frac{e_2(t)}{Z_2} = \frac{e_2(t_1)}{2Z_2} \left(\frac{\cos(\omega t) + \text{ctg}(\gamma_1) \cdot \sin(\omega t)}{\cos(\gamma_1)} \right) \cdot e^{-\gamma \cdot \text{ctg}(\gamma_1) + (\omega \cdot \text{ctg}(\gamma_1))t} \quad (5.22)$$

А тепер визначимо струм у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму на часовому відрізку $[t_1, t_2]$, тобто, в діапазоні кутів $[\gamma_1, \gamma_2]$, зображених на рис. 5.1.

Згідно зі співвідношенням (5.22) на лівій границі цього часового відрізка маємо

$$i_2^{(1)}(t_1) = \frac{e_2(t_1)}{Z_2}, \quad (5.23)$$

а у внутрішніх точках відрізка $[t_1, t_2]$, згідно з нижньою рівністю зі співвідношення (5.11), маємо е.р.с. у вторинній обмотці, що дорівнює нулеві. Це означає, що у колі вторинної обмотки, яке являє собою послідовне з'єднання активного опору $r_{2TT} + r_2$ з індуктивністю $L_{2TT} + L_2$, виникає аперіодична складова струму $i_2^{(2)}(t)$, яка є розв'язком однорідного диференціального рівняння

$$(L_{2TT} + L_2) \frac{di_{2a}^{(2)}}{dt} + (r_{2TT} + r_2) i_{2a}^{(2)} = 0 \quad (5.24)$$

або, що те ж саме,

$$T_2 \frac{di_{2a}^{(2)}}{dt} + i_{2a}^{(2)} = 0, \quad (5.25)$$

де

$$T_2 = \frac{L_{2TT} + L_2}{r_{2TT} + r_2} \quad (5.26)$$

за початкової умови (5.23), і яка (як легко показати) має вигляд затухаючої експоненти.

$$i_{2a}^{(2)}(t) = \frac{e_2(t_1)}{Z_2} e^{-\frac{t-t_1}{T_2}} \quad (5.27)$$

А тепер синтезуємо математичну модель струму $i_2(t)$ у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму на часовому відрізку $[t_2, t_3]$, або, що одне і те ж, в кутовому діапазоні $[\gamma_2, \gamma_3]$ графіка на рис. 5.1.

З графіка, показаного на рис. 5.1, випливає, що при $t = t_2 = \frac{\gamma_2}{\omega}$ маємо

$$e_2(t_2) = 0, \quad (5.28)$$

а з виразу (5.28), з урахуванням виразу (5.8), випливає, що

$$\omega I_{1m} M \cdot \cos(\gamma_2) + \frac{dM}{dt} I_{1m} \cdot \sin(\gamma_2) = 0. \quad (5.29)$$

Рівняння (5.29) можна переписати і так

$$\frac{dM}{M} = -\frac{\omega \cdot \cos(\gamma_2)}{\sin(\gamma_2)} dt. \quad (5.30)$$

Інтегруючи рівняння (5.30), матимемо

$$\ln M = -(\omega \cdot c \operatorname{tg}(\gamma_2))t + \ln C, \quad (5.31)$$

звідки

$$M(t) = C \cdot e^{-(\omega \cdot c \operatorname{tg}(\gamma_2))t}. \quad (5.32)$$

Підставляючи вираз (5.32) у (5.8) на правій границі t_3 цього часового діапазону, отримаємо

$$\begin{aligned} e_2(t_3) &= \omega I_{1m} C \cdot e^{-(\omega \operatorname{ctg}(\gamma_2))t_3} \cdot \cos(\omega t_3) + \\ &+ I_{1m} C (-\omega \operatorname{ctg}(\gamma_2)) \cdot e^{-(\omega \operatorname{ctg}(\gamma_2))t_3} \cdot \sin(\omega t_3), \end{aligned} \quad (5.33)$$

звідки

$$C = \frac{e_2(t_3)}{\omega I_{1m} \cdot e^{-\gamma_3 \operatorname{ctg}(\gamma_2)} (\cos(\gamma_3) - \operatorname{ctg}(\gamma_2) \cdot \sin(\gamma_3))}. \quad (5.34)$$

Підставляючи вираз (5.34) у (5.32), отримаємо математичну модель для взаємної індуктивності на ділянці ненасиченого стану магнітопроводу в часовому діапазоні $[t_2, t_3]$ у вигляді

$$M(t) = \frac{e_2(t_3) \cdot e^{-(\omega \operatorname{ctg}(\gamma_2))t}}{\omega I_{1m} e^{-\gamma_3 \operatorname{ctg}(\gamma_2)} (\cos(\gamma_3) - \operatorname{ctg}(\gamma_2) \cdot \sin(\gamma_3))}. \quad (5.35)$$

А беручи до уваги вирази (5.8) і (5.35), отримаємо, що при ненасиченому магнітопроводі на часовому відрізку $[t_2, t_3]$ математична модель струму у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму матиме вигляд

$$i_2^{(3)}(t) = \frac{e_2(t)}{Z_2} = \frac{e_2(t_3)}{Z_2} \left(\frac{\cos(\omega t) - \operatorname{ctg}(\gamma_2) \cdot \sin(\omega t)}{\cos(\gamma_3) - \operatorname{ctg}(\gamma_2) \cdot \sin(\gamma_3)} \right) \cdot e^{\gamma_3 \operatorname{ctg}(\gamma_2) - (\omega \operatorname{ctg}(\gamma_2))t}. \quad (5.36)$$

А тепер визначимо струм у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму на часовому відрізку $[t_3, t_4]$, тобто в діапазоні кутів $[\gamma_3, \gamma_4]$, зображених на рис. 5.1.

Згідно зі співвідношенням (5.36) на лівій границі цього часового відрізка маємо

$$i_2^{(3)}(t_3) = \frac{e_2(t_3)}{z_2}, \quad (5.37)$$

а у внутрішніх точках відрізка $[t_3, t_4]$, у зв'язку з виконанням і на ньому нижніх рівностей із співвідношень (5.12), маємо е.р.с. у вторинній обмотці, що дорівнює нулеві.

Тож далі, реалізуючи алгоритм, викладений в процесі отримання виразів (5.24)–(5.27), знайдемо, що на часовому проміжку $[t_3, t_4]$ у колі вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму струм $i_{2a}^{(4)}$ змінюватиметься згідно з математичною моделлю

$$i_{2a}^{(4)}(t) = \frac{e_2(t_3)}{z_2} e^{-\frac{t-t_3}{T_2}}. \quad (5.38)$$

Ну і, нарешті, для прикінцевого часового проміжку $[t_4, t_5]$ в межах одного періоду струму у первинній обмотці вимірювального трансформатора струму, який на рис. 5.1 відображається відповідним кутовим проміжком $[\gamma_4, \gamma_5]$, діючи за вищевикладеним алгоритмом стосовно двох попередніх часових проміжків, на яких магнітопровід не насичений, знайдемо, що математична модель струму у вторинній обмотці цього вимірювального трансформатора на цьому часовому проміжку матиме вигляд

$$i_2^{(5)}(t) = \frac{e_2(t)}{z_2} = \frac{e_2(t_5)}{z_2} \left(\frac{\cos(\omega t) - \operatorname{ctg}(\gamma_4) \cdot \sin(\omega t)}{\cos(\gamma_5) - \operatorname{ctg}(\gamma_4) \cdot \sin(\gamma_5)} \right) \cdot e^{\gamma_5 \operatorname{ctg}(\gamma_4) - (\omega \operatorname{ctg}(\gamma_4))t}. \quad (5.39)$$

Оскільки дійсне значення I_2 змінного струму з періодом T у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму, на вимірювання якого налагоджена більшість приладів для вимірювання струму, – це

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_2(t))^2 dt}, \quad (5.40)$$

то для можливості використання формули (5.40) потрібно в межах періоду T коректно об'єднати усі часткові формули, отримані для різних часових проміжків, упродовж яких магнітопровід знаходився або в ненасиченому стані, або в стані насичення. Це можна зробити, лише використавши поняття одиничної функції, для якої справедливими є такі вирази:

$$\begin{cases} 1(t) = \begin{cases} 1 \text{ для } \forall t \in [0, \infty); \\ 0 \text{ для } \forall t < 0; \end{cases} \\ 1(t - \tau) = \begin{cases} 1 \text{ для } \forall t \in [\tau, \infty); \\ 0 \text{ для } \forall t < \tau, \end{cases} \end{cases} \quad (5.41)$$

графічна інтерпретація яких дана на рис. 5.2.

З урахуванням співвідношень (5.41) структурна модель струму $i_2(t)$ у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму, заданого на часовому відрізку $[0, T]$, який дорівнює одному періоду T струму $i_1(t)$ у його первинній обмотці, матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} i_2(t) = & i_2^{(1)}(t)[1(t) - 1(t - t_1)] + \\ & + i_{2a}^{(2)}(t - t_1)[1(t - t_1) - 1(t - t_2)] + i_2^{(3)}(t - t_2)[1(t - t_2) - 1(t - t_3)] + \\ & + i_{2a}^{(4)}(t - t_3)[1(t - t_3) - 1(t - t_4)] + i_2^{(5)}(t - t_4)[1(t - t_4) - 1(t - t_5)]. \end{aligned} \quad (5.42)$$

Щоб розвернути структурно задану модель (5.42) в повну математичну модель, потрібно у вираз (5.42) із виразів (5.22), (5.27), (5.36), (5.38), (5.39) підставити синтезовані на відрізках $[t_{-1}, t_1]$, $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, $[t_3, t_4]$, $[t_4, t_5]$ всі складові $i_2^{(1)}(t)$, $i_{2a}^{(2)}(t)$, $i_2^{(3)}(t)$, $i_{2a}^{(4)}(t)$, $i_2^{(5)}(t)$, замінивши в них аргумент t на аргумент $(t - t_{q-1})$, $q = 1, 2, 3, 4, 5$, де q – це порядковий номер часового відрізка, на якому синтезовано часткову модель, та, врахувавши, що для інтегрального часового відрізка $[0, T]$ перший зсув за часом $t_0 = 0$.

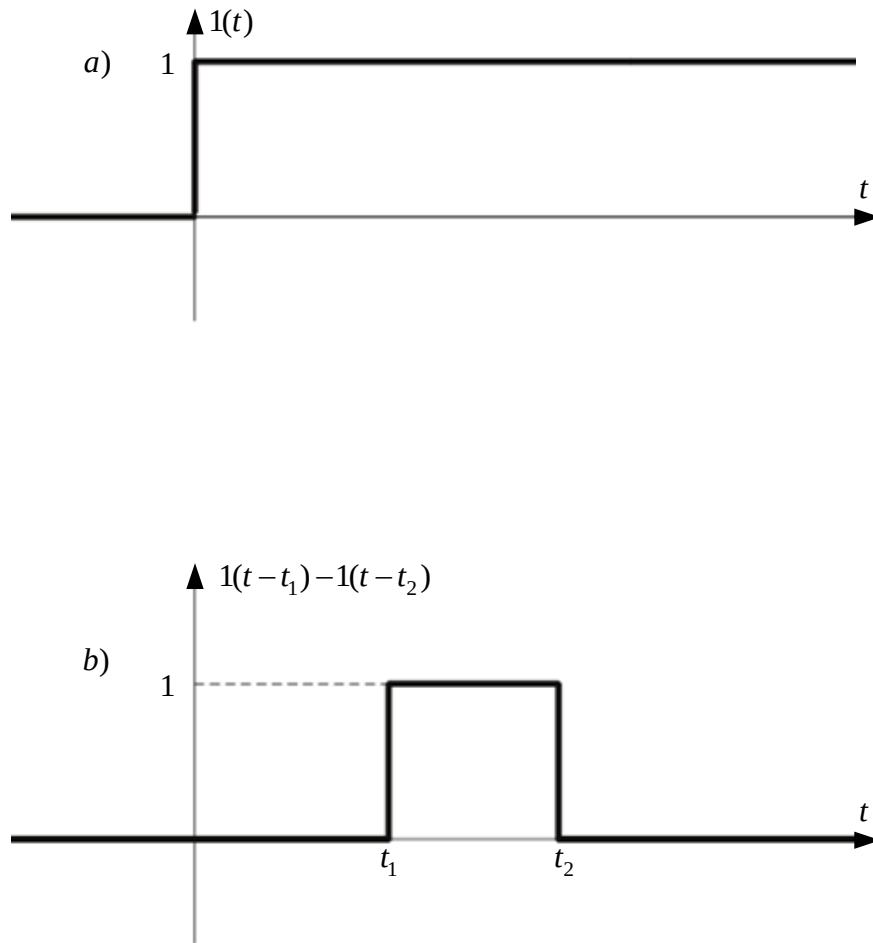


Рисунок 5.2 – Графіки функцій: а) $1(t)$, б) $1(t-t_1)-1(t-t_2)$

А тепер уважно придивимось до виразів (5.22), (5.27), (5.36), (5.38), (5.39), якими задаються складові $i_2^{(1)}(t), i_{2a}^{(2)}(t), i_2^{(3)}(t), i_{2a}^{(4)}(t), i_2^{(5)}(t)$ для моделі $i_2(t)$ згідно з виразом (5.42).

У перші два з них – вирази (5.22), (5.27) – входить множник $e_2(t_1)$, який, згідно з виразом (5.18), є функцією від амплітуди I_{1m} синусоїдального струму $i_1(t)$, що має місце у первинній обмотці вимірювального трансформатора струму. А у вирази (5.36), (5.38) входить множник $e_2(t_3)$, який, згідно з виразом (5.33), теж є функцією від амплітуди I_{1m} синусоїдального струму $i_1(t)$. Ну і, нарешті, у вираз (5.39) входить множник $e_2(t_5)$, який, фактично, є зсунутим вздовж осі ωt множником $e_2(t_1)$, а тому теж є функцією від амплітуди I_{1m}

синусоїдального струму $i_1(t)$, що має місце у первинній обмотці вимірювального трансформатора струму. А, як відомо з основ електротехніки [3], дійсне значення I_1 синусоїдального струму пов'язане з його амплітудним значенням I_{1m} співвідношенням

$$I_{1m} = \sqrt{2}I_1. \quad (5.43)$$

Тож, підставляючи вираз (5.43) спочатку у вирази (5.22), (5.27), (5.36), (5.38), (5.39), а потім підставляючи результати цієї підстановки у вираз (5.42), отримаємо математичну модель для струму $i_2(t)$ у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму, в кожен структурну складову якого входить як параметр дійсне значення синусоїдального струму I_1 . А в разі підстановки ідентифікованої у такий спосіб математичної моделі струму $i_2(t)$ у вираз (5.40) та відповідного інтегрування, яке найпростіше здійснити чисельним методом, використовуючи потрібний пакет прикладних програм, отримаємо залежність $I_2 = f(I_1)$, яка, фактично, є реальною вихідною статичною характеристикою вимірювального трансформатора струму, орієнтовний графік якої має вигляд, зображений на рис. 5.3.

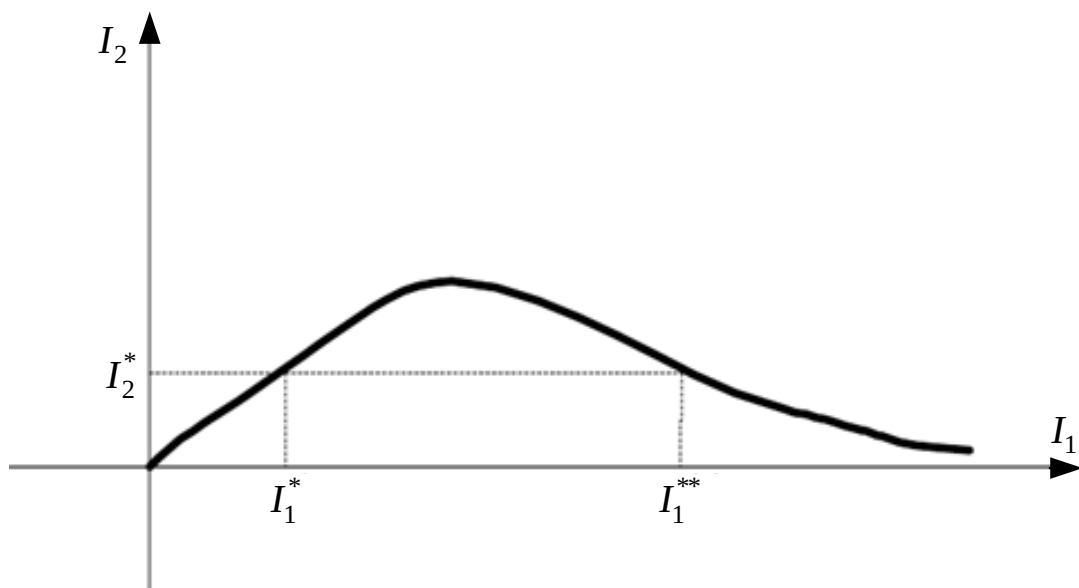


Рисунок 5.3 – Орієнтовний графік реальної вихідної статичної характеристики $I_2 = f(I_1)$ вимірювального трансформатора струму

А для доведення того, що цей графік має саме такий характер, використаємо як першу, так і другу, третю та четверту вихідні передумови в сукупності.

Почнемо з використання першої вихідної передумови. З графіків, показаних на рис. 5.1, бачимо, що зі зростанням амплітуди I_{1m} синусоїдального струму $i_1(t)$ у первинній обмотці вимірювального трансформатора струму площа, яку обмежує графік струму $i_2(t)$ та його квадрат, зростає допоки магнітопровід не насичений і $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 = \gamma_4 - \gamma_3 = 0$, а тому і дійсне значення I_2 струму у вторинній обмотці, яке є коренем квадратним з інтеграла від квадрата цього струму, зваженого довжиною періоду, теж пропорційно зростає. Тож маємо ділянку пропорційного зростання на початку характеристики $I_2 = f(I_1)$. Але за перших проявів насичення магнітопроводу, що супроводжуються малими значеннями $\Delta\gamma$, дійсне значення струму I_2 зі зростанням I_{1m} хоч і продовжує зростати, але уже не пропорційно, оскільки на часовому проміжку насичення магнітопроводу підноситься до квадрата уже не синусоїда, а експонента, що швидко спадає, площа під якою та її квадратом є суттєво меншою від площі синусоїди та її квадрата на цьому ж часовому проміжку. А зі збільшенням часового проміжку перебування магнітопроводу в насиченому стані заміна частини синусоїди експонентою, що швидко спадає, приводить уже не до збільшення I_2 зі зростанням I_{1m} , а, навпаки, – до зменшення. Тож в середній частині характеристика $I_2 = f(I_1)$ має параболічний характер з «розпливчатим» екстремумом, «розпливчатість» якого обумовлена «розпливчатістю» навантаження на вторинну обмотку. А при значному насиченні магнітопроводу, який супроводжується значеннями $\Delta\gamma$, близькими до π радіанів, площі під відрізком синусоїди в $i_2(t)$ та її квадратом стає дуже мало, та й площа під спадною експонентою та її квадратом через зменшення початкового значення експоненти теж суттєво зменшується, що приводить до подальшого зменшення I_2 . Тож в прикінцевій частині характеристика $I_2 = f(I_1)$ продовжує спадати,

асимптотично наближаючись до горизонтальної осі, на якій відкладаються значення I_1 , що пов'язані зі значеннями амплітуди I_{1m} співвідношенням (5.43).

А тепер звернемось до 2-ї, 3-ї та 4-ї передумов. Якщо спроектувати зміст 4-ї передумови на 2-гу та 3-тю, то, скориставшись виразом (5.6) за умови виконання виразу (5.5), легко переконатись, що похибка ε (%) може стати рівною 100%, лише за умови, що нульовим протягом усього періоду T буде струм $i_2(t)$ у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму. А цей струм може стати нульовим лише за умови, якщо значення $\Delta\gamma$ досягне 180 градусів або π радіанів, а параметр A_z досягає нульового значення, що є характерним для повного насичення магнітопроводу. А через те, що у разі зменшення ділянок насичення магнітопроводу і відповідного зростання значень A_z та зменшення значень $\Delta\gamma$, відбувається і зменшення значень похибки ε (%), що, згідно з виразом (5.6), може мати місце лише в результаті збільшення площі під графіком струму $i_2(t)$, заданого виразом (5.42). А збільшення цієї площі, у свою чергу, згідно з виразом (5.40), приводить до збільшення дійсного значення струму I_2 , що характеризує спадний характер залежності $I_2 = f(I_1)$ при зростанні I_1 після початку входження магнітопроводу вимірювального трансформатора струму в стан насичення.

Тож, згідно з реальною вихідною характеристикою $I_2 = f(I_1)$ для кожного вимірювального трансформатора струму характерним є те, що, як показано на рис. 5.3, одному і тому ж дійсному значенню I_2^* його вихідного струму відповідають два дійсні значення I_1^*, I_1^{**} його вхідного струму, виміряти який є його функцією. Тож виникає запитання: «А як, маючи виміряне значення I_2^* , розрізнити, яке зі значень I_1^*, I_1^{**} зумовило цей вимір?»

Відповідь на це запитання виявилася простою – оскільки вимірювальні трансформатори струму вибираються для забезпечення роботи в усталеному режимі електричної мережі без похибок вимірювання, тобто, без входження в

режим насичення магнітопроводу, то усім виміряним значенням I_2^* , що мають місце в усталеному режимі роботи мережі, в якій встановлені ці вимірювальні трансформатори струму, відповідають значення I_1^* . Якщо ж в мережі виникло коротке замикання, яке завжди супроводжується значними струмами, через які коротко замкнута лінія одразу з відключається релейним захистом, то виміряному значенню I_2^* потрібно ставити у відповідність значення I_1^{**} .

Офіційну документацію до вимірювальних трансформаторів струму обов'язково потрібно доповнити вихідною статичною характеристикою $I_2 = f(I_1)$, яку потрібно або визначати експериментально на заводі, що їх виготовляє, або розраховувати, використовуючи запропоновані нами математичні моделі.

5.3 Математична модель оцінювання струму, що протікає у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму

Розглядаючи в системах релейного захисту застосування двокаскадних трансформаторів струму [22], [35], принципова схема яких зображена на рис. 5.4, взятого з роботи [35], бачимо, що вони мають два окремих магнітопроводи й чотири обмотки і являють собою, фактично, симбіоз двох однокаскадних трансформаторів струму, первинною обмоткою одного з яких є лінія електропередачі, струм якої I_1 вимірюється, а первинна обмотка другого послідовно з'єднана з вторинною обмоткою першого зі струмом I_2 .

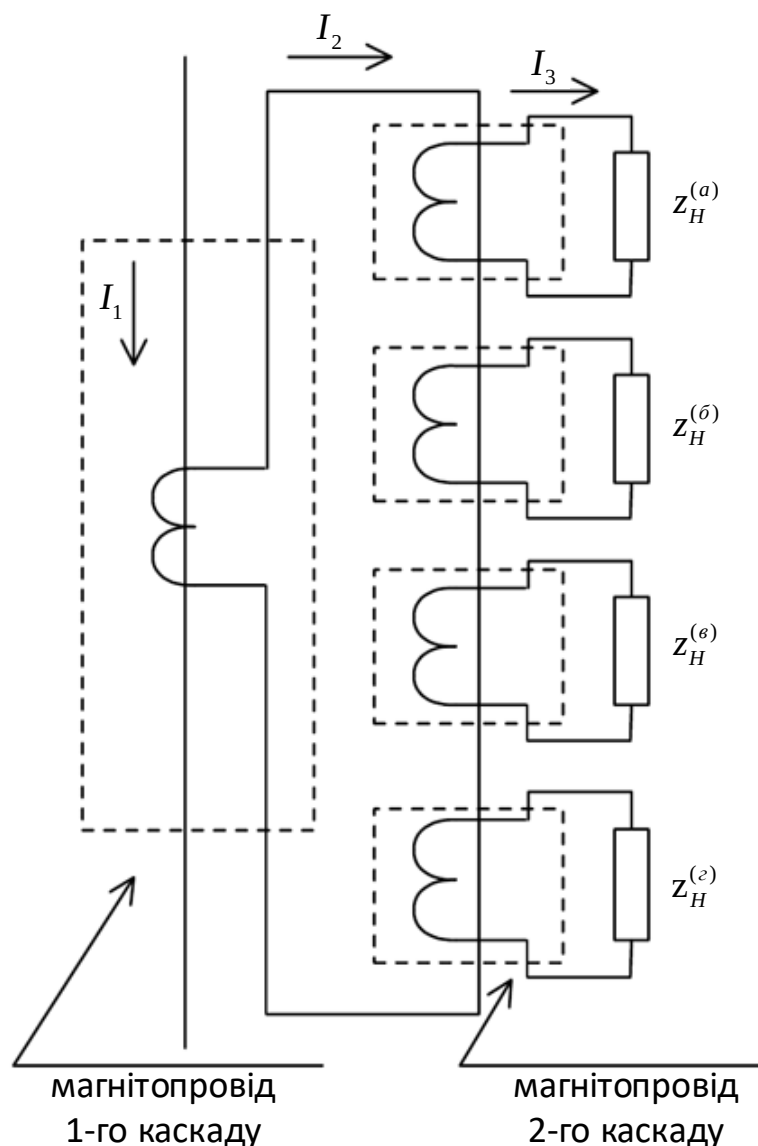


Рисунок 5.4 – Принципова схема двокаскадного трансформатора струму

Аналіз режимів роботи двокаскадних трансформаторів струму описано в роботі [58], а на особливості їх роботи в перехідних режимах звернено увагу в роботі [49]. В роботі [95], згаданій в підрозділі 5.2 показано, що стандартні методи аналізу режимів роботи однокаскадних трансформаторів струму приводять до результатів, неадекватних реальним процесам в них, і запропоновано новий підхід до побудови математичних моделей цих режимів, оснований на аналізі безпосередньо електромагнітних процесів в трансформаторах струму. Завдяки цьому підходу побудовані математичні моделі, за допомогою яких отримано реальну характеристику «вхід-вихід» однокаскадного трансформатора струму, тобто, залежність $I_2 = f(I_1)$.

У цьому підрозділі буде показано – і це буде першим завданням дослідження, – що запропонована у роботах інших авторів, процитованих вище, заступна схема двокаскадного трансформатора струму, наведена, наприклад, на рис. 23-19 у роботі [2] і повторена в даному підрозділі на рис. 5.5, оскільки на неї доведеться надалі посилається, в разі її використання в розрахунках режимів не приводить до отримання результатів, придатних для практичного застосування.

Крім того, у цій роботі запропоновано на аналіз режимів роботи двокаскадних трансформаторів струму розповсюдити той же підхід, оснований на безпосередньому аналізі електромагнітних процесів, який застосовано у підрозділі 5.2 при синтезі математичних моделей однокаскадного трансформатора [95] – і це буде другим завданням дослідження. В результаті застосування цього підходу отримані нові моделі режимів і характеристика «вхід-вихід» $I_3 = f_2(I_1)$ двокаскадного трансформатора струму, які є адекватними процесам в ньому і мають суттєві відмінності від відомих моделей і характеристик цього класу електричних апаратів.

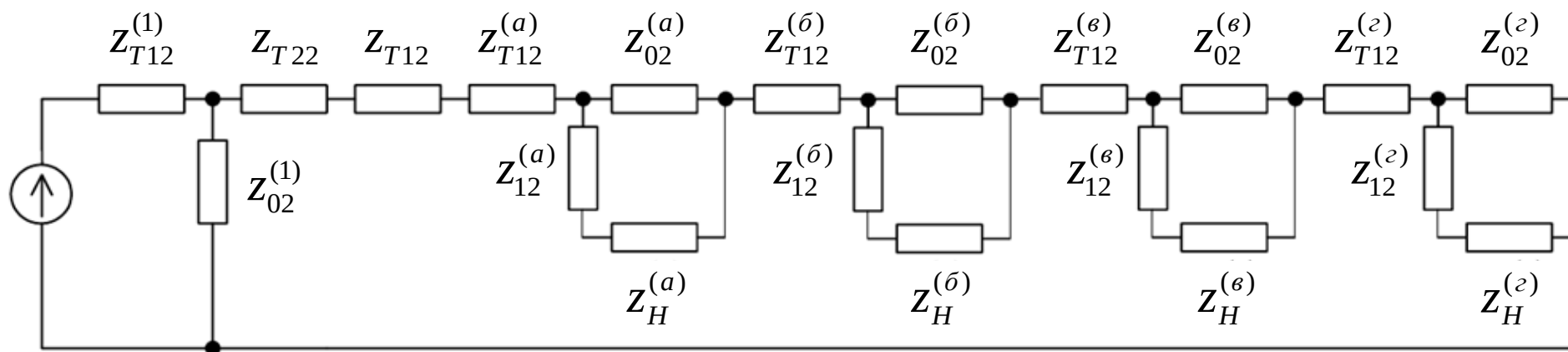


Рисунок 5.5 Заступна схема двокаскадного трансформатора струму, що використовується в існуючій методиці розрахунку його режимів роботи

Як і у підрозділі 5.2, почнемо з посилання на рис. 25-14 з роботи [35], на якому показана графічна інтерпретація струмів, електрорушійних сил і потокозчеплення, що мають місце в однокаскадному трансформаторі струму в усталеному режимі його функціонування. Оскільки ці графіки будуть справедливими і для першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, то, внівши тільки в позначення параметрів, які розглядаються для першого каскаду трансформатора струму, індекс k , для усунення повторюваності з визначеними параметрами однокаскадного трансформатора струму у підрозділі 5.2, розглянемо їх на рис. 5.6 – це верхні чотири графіки, на яких:

i_{1k} – струм у первинній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, яка має w_{1k} витків, тобто, той струм, який потрібно виміряти;

i_{2k}^* – струм i_{2k} у вихідній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, яка має w_{2k} витків, приведений до первинної обмотки цього каскаду для забезпечення можливості відображення його на одному рисунку зі струмом i_{1k} ;

Ψ_{1k} – потокозчеплення, яке дорівнює кількості витків первинної обмотки першого каскаду, помноженій на результуючий магнітний потік Φ_{1k} , що їх перетинає, тобто

$$\Psi_{12k} = w_{1k} \Phi_{12k}, \quad (5.44)$$

де
$$\Phi_{12k} = \Phi_{1k} - \Phi_{2k}, \quad (5.45)$$

а Φ_{1k}, Φ_{2k} , – протилежно спрямовані магнітні потоки, створювані струмами у магнітопроводі першого каскаду двокаскадного трансформатора струму;

e_{2k} – електрорушійна сила, створювана у вторинній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму результуючим магнітним потоком Φ_{12k} у магнітопроводі першого каскаду згідно з законом електромагнітної індукції, тобто

$$e_{2k} = \frac{d\Psi_{12k}}{dt} = w_{2k} \frac{d\Phi_{12k}}{dt}; \quad (5.46)$$

γ_{1k}, γ_{2k} – відповідно, кут, за якого магнітопровід першого каскаду двокаскадного трансформатора струму входить в режим насичення та виходить з нього.

А на нижніх трьох графіках, наведених на рис. 5.6, зображена графічна інтерпретація потокозчеплення, е.р.с. та струму, що мають місце у другому каскаді двокаскадного трансформатора струму, при цьому:

i_3^* – струм i_3 у вихідній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, яка має w_4 витків, приведений до первинної обмотки першого каскаду двокаскадного трансформатора струму для забезпечення можливості відображення його на одному рисунку зі струмами i_{1k}, i_{2k}^* ;

Ψ_{34}^* – потокозчеплення Ψ_{34} , яке дорівнює кількості витків w_3 первинної обмотки другого каскаду, помноженій на результуючий магнітний потік Φ_{34k} , що їх перетинає, тобто

$$\Psi_{34} = w_3 \Phi_{34}, \quad (5.47)$$

де

$$\Phi_{34} = \Phi_3 - \Phi_4, \quad (5.48)$$

а Φ_3, Φ_4 – протилежно спрямовані магнітні потоки, створювані струмами i_{2k}, i_3 у магнітопроводі другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, приведені до первинної обмотки першого каскаду для забезпечення можливості відображення його на одному рисунку з потокозчепленням Ψ_{12k} ; e_3^* – електрорушійна сила e_3 , створювана у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму результуючим магнітним потоком Φ_{34} у магнітопроводі другого каскаду згідно з законом, що характеризує роботу двокаскадного трансформатора струму електромагнітної індукції, тобто,

$$e_3 = \frac{d\Psi_{34}}{dt} = w_4 \frac{d\Phi_{34}}{dt}; \quad (5.49)$$

γ_{12}, γ_{22} – відповідно, кут, при якому магнітопровід другого каскаду двокаскадного трансформатора струму входить в режим насичення та виходить з нього.

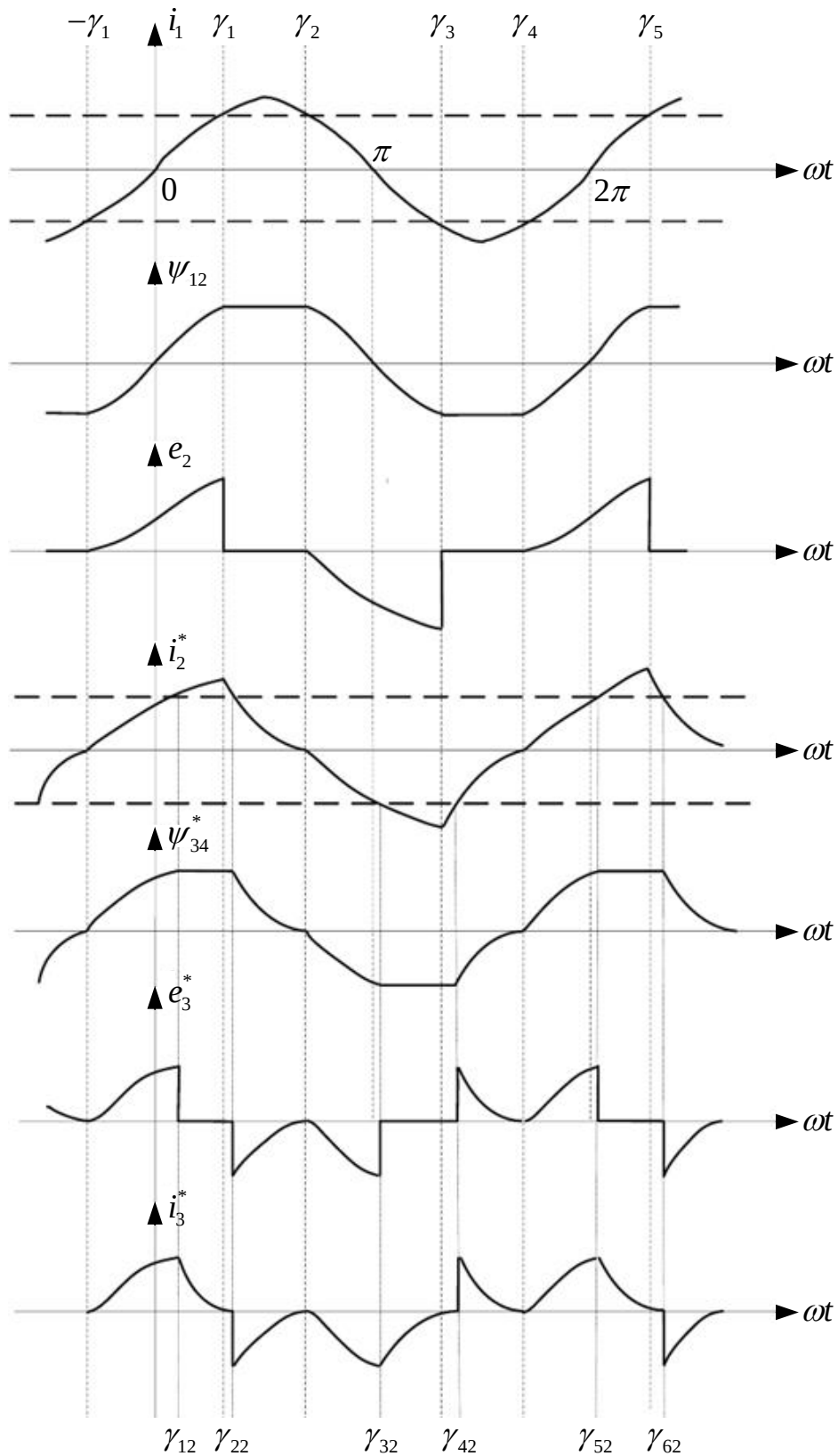


Рисунок 5.6 – Графіки струмів i_{1k}, i_{2k}^*, i_3^* , потокозчеплень Ψ_{12k}, Ψ_{34}^* та е.р.с. e_2, e_3^*

У підрозділі 5.2 [95] отримано математичну модель струму i_2 у вторинній обмотці трансформатора струму у вигляді (5.42).

Графік струму $i_2(t)$, отриманого згідно з моделлю (5.42) і приведенного до первинної обмотки у вигляді $i_2^*(t)$ для зіставлення зі струмом $i_1(t)$ на їх порівнювальних графіках, зображений на рис. 5.1. З цього графіка та з формул (5.22), (5.27), (5.37)–(5.39), які його описують, видно, що на трьох відрізках осі абсцис, на яких цей струм описується виразами (5.22), (5.37), (5.39), він має синусоїдально-косинусоїдальний характер, а на двох відрізках цієї осі, на яких цей струм описується виразами (5.27), (5.38), він має експоненціальний характер. А це означає, що такий самий характер на усіх вищезгаданих відрізках осі абсцис буде мати і магнітний потік Φ_{34} у магнітопроводі другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, створюваний струмом $i_{2k}(t)$, що протікає і по вихідній обмотці першого каскаду трансформатора струму, і по входній обмотці його другого каскаду, оскільки

$$\Phi_{34} = k_\Phi i_{2k}, \quad (5.50)$$

де k_Φ – тангенс кута нахилу характеристики намагнічування $\Phi = \Phi(i)$ магнітопроводу другого каскаду двокаскадного трансформатора струму.

А тому, згідно з виразом (5.46), такий самий характер буде мати і потокозчеплення Ψ_{34} , графік якого на рис. 5.6 для можливості зіставлення з графіком потокозчеплення Ψ_{12k} першого каскаду теж представлений як графік потокозчеплення Ψ_{34}^* , приведенного до первинної обмотки двокаскадного трансформатора струму. На графіку Ψ_{34}^* бачимо, що над відрізками $[\gamma_{11}, \gamma_{22}]$, $[\gamma_{32}, \gamma_{42}]$, $[\gamma_{52}, \gamma_{62}]$ осі абсцис, у зв'язку з тим, що магнітний потік Φ_{34} згідно з характеристикою намагнічування $\Phi = \phi(i)$ магнітопроводу другого каскаду на цих відрізках входить в зону насичення, ми маємо ділянки, на яких

$$\begin{cases} \Psi_{34} = \text{const}; \\ \frac{d\Psi_{34}}{dt} = 0, \end{cases} \quad (5.51)$$

а тому, згідно з виразом (5.49) і е.р.с. e_3 , що наводиться у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, на цих відрізках осі

абсцис буде дорівнювати нулю, як це показано на рис. 5.6 на графіку цієї е.р.с., котра для графічного зіставлення з е.р.с. e_{2k} першого каскаду зображена на цьому графіку теж у вигляді е.р.с. e_3^* , приведеної до першого каскаду. А, як було показано у підрозділі 5.2 [95], на відрізках осі абсцис, на яких маємо рівною нулю е.р.с., струм в обмотці, до якої прикладена ця е.р.с. (у нашому випадку е.р.с. e_3) буде або експоненціально спадати (як на відрізках $[\gamma_{11}, \gamma_{22}]$, $[\gamma_{52}, \gamma_{62}]$), або експоненціально наростати (як на відрізку $[\gamma_{32}, \gamma_{42}]$). Це показано на рис. 5.6 на графіку струму i_3 , що протікає у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, і який, для забезпечення можливості зіставлення з графіками інших струмів у обмотках цього трансформатора, на графіку зображений у приведеному до першого каскаду вигляді i_3^* .

Аналізуючи цей графік, бачимо, що в межах одного періоду з кутом від 0 до 2π лише в діапазоні кутів $[0, \gamma_{12}]$, $[\gamma_2, \gamma_{32}]$, $[\gamma_4, 2\pi]$ струм i_3 , повторюючи е.р.с., змінюється за синусоїдальним законом, а в діапазоні усіх інших кутів – $[\gamma_{12}, \gamma_{22}]$, $[\gamma_{22}, \gamma_2]$, $[\gamma_{32}, \gamma_{42}]$, $[\gamma_{42}, \gamma_4]$ – цей струм змінюється за експоненціальним законом, а тому він не може розраховуватись з використанням заступної схеми двокаскадного трансформатора струму у вигляді, показаному на рис. 5.5, на якому було повторено заступну схему, наведену в основоположній роботі [35], адже лише при синусоїдальному струмові $i = I_m \sin(\omega t)$ у вихідній обмотці з індуктивністю L та активним опором r матимемо балансове рівняння прикладеної напруги $u = U_m \sin(\omega t + \phi)$

$$\begin{aligned} ri + L \frac{di}{dt} &= rI_m \cdot \sin(\omega t) + L \frac{d}{dt}(I_m \cdot \sin(\omega t)) = \\ &= (rI_m) \cdot \sin(\omega t) + (\omega LI_m) \cdot \cos(\omega t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \phi) = \\ &= U_m \cdot (\sin(\omega t) \cdot \cos(\phi) + \cos(\omega t) \cdot \sin(\phi)) = \\ &= (U_m \cdot \cos(\phi)) \sin(\omega t) + (U_m \cdot \sin(\phi)) \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (5.52)$$

з якого випливає, що

$$U_m \cdot \cos(\phi) = rI_m; \quad (5.53)$$

$$U_m \cdot \sin(\phi) = \omega L I_m \quad (5.54)$$

та що після піднесення до квадрата рівнянь (5.53) і (5.54) та їх додавання маємо

$$U_m^2 = (r^2 + (\omega L)^2) I_m^2 \quad (5.55)$$

або
$$U_m^2 = z^2 I_m^2, \quad (5.56)$$

де
$$z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \quad (5.57)$$

– повний опір обмотки синусоїдальному струму.

І саме цей повний опір z використовується у відомій заступній схемі двокаскадного трансформатора струму, наведеній на рис. 5.5, визначений за виразом (5.57) для кожного елемента принципової схеми цього трансформатора, показаної на рис. 5.4, що є справедливим лише при синусоїдальному характері струму в цих елементах. А як показано вище, такий характер струм має лише в трьох діапазонах, прив'язаних до осі абсцис, а в чотирьох діапазонах струм має експоненціальний характер, для якого поняття кругової частоти ω не існує в принципі, тому і заступну схему, наведену на рис. 5.5, яка оперує з повними опорами z елементів принципової схеми в усьому кутовому діапазоні $[0, 2\pi]$, для розрахунку значень цього струму теж, в принципі, не можна використовувати. Цим висновком буде завершено розв'язання першого з поставлених завдань цього дослідження.

А далі перейдемо до розв'язання другого з поставлених завдань дослідження, тобто, застосувавши метод, розроблений для визначення струму i_2 у вторинній обмотці однокаскадного трансформатора струму у підрозділі 5.2 [95], розглянемо як, застосовуючи цей метод, розраховувати струм i_3 у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму.

Як, на підставі виразів (5.22), (5.27), (5.37)–(5.39), (5.42) за співвідношенням (5.40) розрахувати дійсне значення I_{2k} змінного струму з періодом T у вторинній обмотці першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, коректно об'єднуючи в межах періоду T усі часткові формули (5.22), (5.27), (5.37)–(5.39), отримані для різних часових проміжків, упродовж яких

магнітопровід першого каскаду знаходився або в ненасиченому стані, або в стані насичення, це показано у підрозділі 5.2 [95]. Тож на цьому етапі розрахунків зупинятись не будемо і вважатимемо, що і математичну модель для струму $i_2(t)$ у вигляді виразу (5.42) з деталізацією за допомогою виразів (5.22), (5.27), (5.37)–(5.39), і характеристику «вхід-вихід» першого каскаду у вигляді залежності $I_2 = f_1(I_1)$ вже отримано. Орієнтовний вигляд їх графіків показаний на рис. 5.6 для моделі $i_2(t)$ та на рис. 5.7 для залежності $I_2 = f_1(I_1)$. А тому далі, відштовхнувшись від моделі струму $i_2(t)$, займемось виключно лише створенням математичної моделі для струму $i_3(t)$ та отриманням характеристики «вхід-вихід» $I_3 = f_2(I_1)$ двокаскадного трансформатора струму в цілому.

Якщо відомо струм $i_2(t)$ у первинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму та характеристику намагнічування $\Phi_{34} = \Phi_{34}(i_2)$ магнітопроводу другого каскаду, то, скориставшись виразом (5.47), можемо визначити спочатку потокозчеплення Ψ_{34} , графік якого показано на рис. 5.6, а потім, скориставшись виразом (5.49), і е.р.с. e_3 , графік якої теж показано на рис. 5.6. І якщо на графіку е.р.с. e_{2k} вторинної обмотки першого каскаду трансформатора струму має лише 5 кутових діапазонів зміни характеру залежності, то, як бачимо, на графіку е.р.с. e_3 вторинної обмотки другого каскаду трансформатора струму маємо уже 7 кутових діапазонів зміни характеру залежності $[0, \gamma_{12}]$, $[\gamma_{12}, \gamma_{22}]$, $[\gamma_{22}, \gamma_2]$, $[\gamma_2, \gamma_{32}]$, $[\gamma_{32}, \gamma_{42}]$, $[\gamma_{42}, \gamma_4]$, $[\gamma_4, 2\pi]$. В такому порядку їх буде пронумеровано, використовуючи верхні індекси від одиниці до семи, при формуванні складових струму i_3 в кожному з цих кутових діапазонів, тобто, позначаючи ці складові як $i_3^{(1)}, i_3^{(2)}, i_3^{(3)}, i_3^{(4)}, i_3^{(5)}, i_3^{(6)}, i_3^{(7)}$. Тож, з урахуванням цих позначень, математичну модель для струму $i_3(t)$ (за аналогією з математичною моделлю для струму $i_{2k}(t)$, що задана виразом (5.42)), з урахуванням властивостей одиничної функції $1(t)$, заданих виразами (5.41), та аналогів позначень, можна записати так:

$$\begin{aligned}
i_3(t) = & i_3^{(1)}(t)[1(t) - 1(t - t_{12})] + i_3^{(2)}(t - t_{12})[1(t - t_{12}) - 1(t - t_{22})] + \\
& + i_3^{(3)}(t - t_{22})[1(t - t_{22}) - 1(t - t_2)] + i_3^{(4)}(t - t_2)[1(t - t_2) - 1(t - t_{32})] + \\
& + i_3^{(5)}(t - t_{32})[1(t - t_{32}) - 1(t - t_{42})] + i_3^{(6)}(t - t_{42})[1(t - t_{42}) - 1(t - t_4)] + \\
& + i_3^{(7)}(t - t_4)[1(t - t_4) - 1(t - t_{52})].
\end{aligned} \tag{5.58}$$

Звичайно, для того, щоб за допомогою цієї моделі можна було здійснювати аналіз процесів у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму її необхідно потрібно ідентифікувати, тобто, конкретизувати вирази для усіх струмових складових, що входять до структури математичної моделі (5.58). І почнемо процес ідентифікації цієї математичної моделі з конкретизації складової $i_3^{(1)}(t)$, яка має синусоїдальний характер, а тому для неї справедливим є вираз (5.57). Очевидно, що, згідно з законами електротехніки,

$$i_3^{(1)}(t) = \frac{e_3^{(1)}(t)}{z_3}, \tag{5.59}$$

де $e_3^{(1)}(t)$ – це е.р.с., що наводиться у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму на часовому відрізку $[0, t_{12}]$ і має синусоїдальний характер, а

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + (\omega L_3)^2} \tag{5.60}$$

– повний опір цієї обмотки, і при цьому до r_3 входить і активний опір навантаження на цю обмотку, а до L_3 входить і індуктивність навантаження на цю обмотку.

Оскільки уже знайдено струм $i_{2k}(t)$ у первинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму, який одночасно є знайденим на етапі аналізу процесів у першому каскаді струмом у вихідній обмотці першого каскаду, то, використовуючи вирази (5.49) і (5.50), матимемо

$$e_3^{(1)}(t) = w_4 \frac{d\Phi_{34}}{dt} = w_4 k_\Phi \frac{di_2^{(1)}}{dt}. \tag{5.61}$$

Підставляючи вирази (5.60) і (5.61) у вираз (5.59) та обрізаючи результат

на границях відрізка часу $[0, t_{12}]$, отримуємо складову струму $i_3(t)$ на цьому відрізку у вигляді $i_3^{(1)}(t)$, яка на правій границі відрізка матиме числове значення $i_3^{(1)}(t_{12})$, а тому експоненціальна складова $i_3^{(2)}(t)$ струму $i_3(t)$ на відрізку часу $[t_{12}, t_{22}]$ буде мати вигляд

$$i_3^{(2)}(t) = i_3^{(1)}(t_{12}) e^{-\frac{t}{T_3}}, \quad (5.62)$$

де стала часу T_3 вторинної обмотки другого каскаду двокаскадного трансформатора струму знаходиться з виразу

$$T_3 = \frac{L_3}{r_3}. \quad (5.63)$$

На третьому відрізку часу $[t_{22}, t_2]$ складова $i_3^{(3)}(t)$ струму $i_3(t)$ теж є згасальною експонентою, але для визначення її стартового значення $i_3^{(3)}(t_{22})$ потрібно спочатку скористатись виразом (5.61), який після підстановки в нього з виразу (5.27) експоненціальної складової $i_{2a}^{(2)}(t)$ набуде вигляду

$$e_3^{(3)}(t) = w_4 \frac{d\Phi_{34}}{dt} = w_4 k_\Phi \frac{di_{2a}^{(2)}}{dt} = -\frac{w_4 k_\Phi}{z_2 T_2} e_2(t_1) e^{-\frac{t-t_1}{T_2}}. \quad (5.64)$$

Визначити числове значення е.р.с. $e_3^{(3)}(t)$ в точці $t = t_{22}$, що дорівнюватиме

$$e_3^{(3)}(t_{22}) = -\frac{w_4 k_\Phi}{z_2 T_2} e_2(t_1) e^{-\frac{t_{22}-t_1}{T_2}}, \quad (5.65)$$

а потім розділити отримане значення е.р.с. $e_3^{(3)}(t_{22})$ на сумарний активний опір r_3 контуру вихідної обмотки другого каскаду двокаскадного трансформатора струму. Тож в результаті математичну модель структурної складової $i_3^{(3)}(t)$ на відрізку часу $[t_{22}, t_2]$ отримаємо у вигляді

$$e_3^{(3)}(t) = e_3^{(3)}(t_{22}) e^{-\frac{t-t_{22}}{T_3}} = \frac{e_3^{(3)}(t_{22})}{r_3} = -\frac{w_4 k_\Phi}{r_3 z_2 T_2} e_2(t_1) e^{-\frac{t_{22}-t_1}{T_2}} e^{-\frac{t-t_{22}}{T_3}}. \quad (5.66)$$

Із графіка струму $i_3(t)$, наведеного на рис. 5.6, легко бачити, що складова $e_3^{(4)}(t)$ цього струму на четвертому відрізку часу $[t_2, t_{32}]$ є «перевернутою і

зсунутою на відрізок часу $t_1 + t_2$ » складовою $i_3^{(1)}(t)$, уже визначеною раніше, а тому маємо право записати

$$i_3^{(4)}(t) = -i_3^{(1)}(t - t_1 - t_2), \quad (5.67)$$

складова $i_3^{(5)}(t)$ цього струму на п'ятому відрізку часу $[t_{32}, t_{42}]$ є «перевернутою і зсунутою на відрізок часу $t_{32} + t_{12}$ » складовою $i_3^{(2)}(t)$, уже визначеною раніше, а тому маємо право записати, що

$$i_3^{(5)}(t) = -i_3^{(2)}(t + t_{12} - t_{32}), \quad (5.68)$$

складова $i_3^{(6)}(t)$ цього струму на шостому відрізку часу $[t_{42}, t_4]$ є «перевернутою і зсунутою на відрізок часу $t_{42} + t_{22}$ » складовою $i_3^{(3)}(t)$, уже визначеною раніше, а тому маємо право записати

$$i_3^{(6)}(t) = -i_3^{(3)}(t + t_{22} - t_{42}), \quad (5.69)$$

а складова $i_3^{(7)}(t)$ цього струму на сьомому відрізку часу $[t_4, t_{52}]$ є лише «зсунутою на відрізок часу $t_1 + t_4$ » складовою $i_3^{(1)}(t)$, уже визначеною раніше, а тому маємо право записати, що

$$i_3^{(7)}(t) = i_3^{(1)}(t - t_1 - t_4). \quad (5.69)$$

Оскільки усі складові струму $i_3(t)$ у вихідній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму визначені через відповідні складові вхідного струму $i_{2k}(t)$ цього каскаду, а він, як вихідний струм першого каскаду двокаскадного трансформатора струму, у підрозділі 5.2 [95] визначений як параметрично залежний від дійсного значення I_1 струму в лінії електропередачі, який вимірюється трансформатором струму, то і всі складові струму $i_3(t)$ теж є параметрично залежними від дійсного значення I_1 струму в лінії електропередачі, який вимірюється трансформатором струму, а тому, в разі підстановки моделі (5.58), ідентифікованої виразами (5.59), (5.62), (5.67)–(5.69), у вираз

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_3(t))^2 dt}, \quad (5.70)$$

отримаємо залежність

$$I_3 = f_2(I_1), \quad (5.71)$$

яка являтиме собою характеристику «вхід-вихід» двокаскадного трансформатора струму. Графік цієї залежності зображений на рис. 5.7. На цьому ж рисунку показано, що, якщо зони насичення магнітопроводів першого і другого каскадів двокаскадного трансформатора струму не збігатимуться, то характеристика (5.71) зміщуватиметься по горизонталі, займаючи, наприклад, положення характеристики $I_3 = f_2^*(I_1)$.

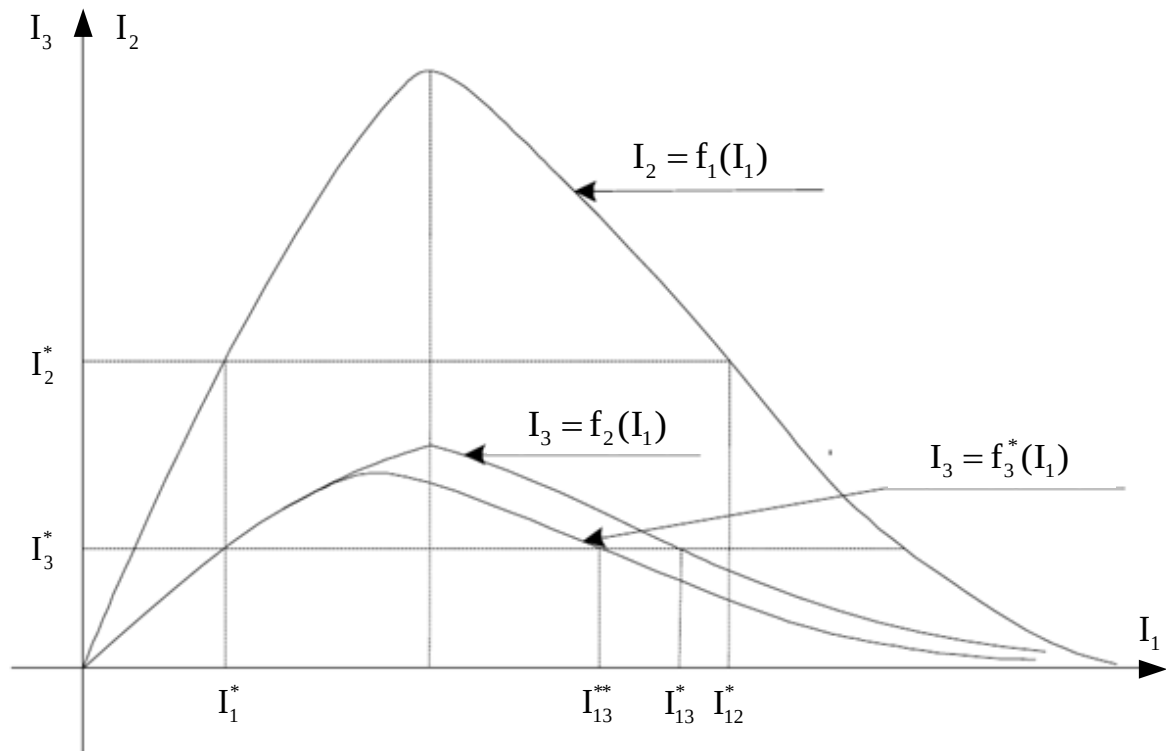


Рисунок 5.7 – Реальні характеристики «вхід-вихід» двокаскадного трансформатора струму: $I_2 = f_1(I_1)$ – його першого каскаду; $I_3 = f_2(I_1)$ – обох його каскадів при одночасному насиченні магнітопроводів; $I_3 = f_2^*(I_1)$ – обох його каскадів при незбігові насичення магнітопроводів

Як бачимо з графіків, показаних на рис. 5.7, і для двокаскадних трансформаторів струму з тих же причин, які розкриті у підрозділі 5.2 [95], згідно

з реальною вихідною характеристикою $I_3 = f_2(I_1)$ характерним є те, що одному і тому ж дійсному значенню I_3^* його вихідного струму другого каскаду відповідають два дійсні значення I_1^* , I_{13}^* його вхідного струму, виміряти який є його функцією. Тож, як і у випадку однокаскадного трансформатора струму, розглянутого у підрозділі 5.2 [95], при вимірюваннях двокаскадним трансформатором струму виникає таке ж запитання: «А як, маючи виміряне значення I_3^* , розрізнати, яке зі значень I_1^* , I_{13}^* зумовило це виміряне значення?».

Відповідь на це запитання не відрізнятиметься від тієї, яка дана у підрозділі 5.2 [95], оскільки двокаскадні трансформатори струму вибираються для забезпечення вимірювань струмів в усталеному режимі роботи без помітних похибок вимірювання, тобто, без входження в режим насичення магнітопроводів, то усім вимірним значенням I_3^* , що мають місце в усталеному режимі роботи лінії високовольтної електропередачі, в якій встановлені ці трансформатори струму, відповідають значення I_1^* . Якщо ж у високовольтній лінії електропередачі виникло коротке замикання, яке завжди супроводжується значними струмами, через які коротко замкнута високовольтна лінія одразу ж відключається релейним захистом, то вимірному значенню I_3^* потрібно ставити у відповідність значення I_{13}^* .

А завершити це дослідження хочеться тим же закликом, який уже був виголошений в попередньому підрозділі 5.2 [5], суть якого полягає в тому, що офіційну документацію до двокаскадних трансформаторів струму обов'язково потрібно доповнити вихідною статичною характеристикою $I_3 = f_2(I_1)$, яку потрібно або визначати експериментально на заводі, що їх виготовляє, або розраховувати, використовуючи запропоновані в даній роботі математичні моделі.

5.4 Висновки до п'ятого розділу

1. Здійснено детальний аналіз фізичних процесів, що відбуваються у вимірювальному трансформаторі струму, та уточнено їх характеристики.

2. Синтезовано математичну модель для отримання оцінки струму, що протікає у вторинній обмотці вимірювального однокаскадного трансформатора струму, яка характеризує динаміку його роботи.

3. Побудовано вихідну статичну характеристику вимірювального однокаскадного 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, якою комплектуються вимірювальні трансформатори струму на заводах, що їх виготовляють.

4. Запропоновано спосіб зняття неоднозначності у разі використання вихідної статичної характеристики вимірювального однокаскадного трансформатора струму, зумовленої тим, що кожному дійсному значенню струму у вторинній обмотці відповідає не одне, а два дійсних значення струму у первинній обмотці.

5. Здійснено детальний аналіз фізичних процесів, що відбуваються у двокаскадному трансформаторі струму, та уточнено їх характеристики.

6. Синтезовано математичну модель для оцінки струму, що протікає у вторинній обмотці другого каскаду двокаскадного трансформатора струму.

7. Побудовано вихідну статичну характеристику двокаскадного трансформатора струму, яка зв'язує дійсне значення струму у вторинній обмотці другого каскаду з дійсним значенням струму у первинній обмотці першого каскаду, та запропоновано ввести цю характеристику в офіційну документацію, якою комплектуються двокаскадні трансформатори струму на заводах, що їх виготовляють.

8. Запропоновано спосіб зняття неоднозначності при використанні вихідної статичної характеристики двокаскадного трансформатора струму,

обумовленої тим, що кожному дійсному значенню струму у вторинній обмотці другого каскаду відповідає не одне, а два дійсних значення струму у первинній обмотці першого каскаду.

Текст п'ятого розділу дисертації складено з використанням авторських наукових публікацій [95], [96].

ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційного дослідження отримані такі результати.

1. 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 величини фазних струмів статора для унеможливлення погіршення характеристик двигуна або виходу його з ладу.

2. Запропоновано метод ідентифікації математичної моделі одного класу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами, до якого відносять тяговий електропривод підйомного крана зі змінними параметрами, зумовленими змінами в часі приведенного 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 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, обумовленої 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.

3. 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, які 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 підвішування 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 оцінити цей процес в темпі його перебігу.

4. 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 авторами даної роботи математичних моделей. Доведено, що використання класичного рівняння динаміки системи електропривода, яке містить сталий момент інерції і сталий момент навантаження, приводить до похибок в оцінках процесів, що супроводжують підймання і опускання вантажів підйомними кранами. А це, у свою чергу, не дозволяє достатньо точно спрогнозувати поведінку системи в різних режимах роботи.

5. Синтезовано закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часу та просторі, до якого відноситься система електропривода підйомного крана, оскільки у цій системі електропривода мають місце і зміна характеристик процесу переміщення вантажів у часі, обумовлену 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. В якості критерію оптимізації використано функціонал у вигляді інтегралу від квадрату відхилень реальної кутової швидкості приводного електродвигуна підйомного крану від її ідеальної траєкторії. При синтезі закону оптимального керування використано створену нами і опубліковану в попередніх наших роботах, приведених у списку літератури, 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, обумовлених 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 крану як динамічного об'єкта з параметрами, змінними в часу та просторі.

6. 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

7. 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.

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. Gańić, 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, “Koncepcja 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, Maleńev 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. Ślaskowski, “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.: СМІЛ, 2008.
- [38] Ю.Б. Гладьо, “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-Elektrodivigatel-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”, *Системи обробки інформації*, Вип. 4, с. 79-86, 2006.
- [65] М. С. Корятов, 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. Корятов, 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. Лагереv, “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: ВолГТУ, 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 - praktické konference «Přední vědecké novinky - 2013». Technická vědy. Chemie a chemické 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-mehanzmyv-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. Матыя, “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. Матыя, “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, “Такова підвіска”, Пат. 28879 UA, МПК B65C1/34, 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 B66C 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 B66C 1/34, бюл. № 11, 15.11.2005.
- [145] С. І. Шевченко, “Гальмо вантажопідйомного механізму”, Пат. 25150 UA, МПК B66D 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.

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження результатів досліджень

Директор "ДП Старокостянтинівський лісгосп"  Затверджую
Грачук Ю.Д.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи

"Синтез систем оптимального керування електроприводами
зі змінними параметрами і пружними зв'язками"

Кривоноса Олександра Михайловича

Комісія "ДП Старокостянтинівського лісгоспу" у складі : головного інженера
О.А.Остапенка, головного механіка І.М.Крупського, начальника комплексу
В.В.Наскалова

Розглянула запропонований у даному дисертаційному дослідженні закон
(та алгоритм практичної його реалізації) оптимального керування одним класом об'єктів
з параметрами, змінними в часу та просторі , до якого відноситься система
електропривода підйомного механізму. Згідно зазначеного закону 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 підвішено вантаж .

На основі , вищенаведеного комісія вбачає доцільність введення
результатів досліджень описаних в данній дисертаційній роботі, до практичної реалізації
наявного крана ККЛ -2.

Головний інженер:



О.А.Остапенко

Головний механік:



І.М.Крупський

Начальник комплексу:



В.В.Наскалов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор з управління персоналом
та юридичних питань
АТ «Хмельницькобленерго»
(уповноважений член дирекції)
А.О. Пилипенко

2021 р.

**АКТ**

Впровадження результатів дисертаційної роботи

«Синтез систем оптимального керування електроприводами зі змінними параметрами і пружними зв'язками»

Кривоноса Олександра Михайловича

Комісія АТ «Хмельницькобленерго» у складі: начальника СМіТ Загородського В.Л., начальника СзТОВПМ Кушніра А.В. та інженера СзТОВПМ Пунди О.Д.

Розглянула запропонований у даному дисертаційному дослідженні закон (та алгоритм практичної його реалізації) оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часу та просторі, до якого відноситься система електропривода підйомного механізму. Згідно зазначеного закону 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 підвішено вантаж.

На основі, вище наведеного комісія вбачає доцільність введення результатів досліджень описаних в даній дисертаційній роботі, до практичної реалізації при проведенні планової модернізації наявного козлового крана ККТ-5.

Начальник СМіТ

Начальник СзТОВПМ

Інженер СзТОВПМ

В.Л. Загородський

А.В. Кушнір

О.Д. Пунда

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «Шпон Шепетівка»

Хоменко О.В.



АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи

«Синтез систем оптимального керування електроприводами зі змінними параметрами і пружними зв'язками»

Кривоноса Олександра Михайловича

Комісія ТОВ «Шпон Шепетівка» у складі:

директора Хоменка Олександра Вікторовича,головного інженера Грибка Анатолія Івановича,головного енергетика Гладія Олега Юрійовича

розглянула запропонований у даному дисертаційному дослідженні закон (та алгоритм практичної його реалізації) оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часу та просторі, до якого відноситься система електропривода підйомного механізму. Згідно зазначеного закону 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 підвішено вантаж.

На основі, вищенаведеного комісія вбачає доцільність введення результатів досліджень описаних в даній дисертаційній роботі, до практичної реалізації при проведенні планової модернізації наявного козлового крана ККС-10

Директор ТОВ «Шпон Шепетівка»

Хоменко О.В.

Головний інженер ТОВ «Шпон Шепетівка»

Грибок А.І.

Головний енергетик ТОВ «Шпон Шепетівка»

Гладій О.Ю.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

ТОВ «Велес- Агро ЛТД.»



Хомишинець В.Л.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи

«Синтез систем оптимального керування електроприводами зі змінними параметрами і пружними зв'язками»

Кривоноса Олександра Михайловича

Комісія ТОВ «Велес- Агро ЛТД.» у складі:

директора Хомишинець Володимира Лукіча, заступника директора Камінського Юрія Васильовича, головного технолога Костюка Віктора Володимировича

розглянула запропонований у даному дисертаційному дослідженні закон (та алгоритм практичної його реалізації) оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часу та просторі, до якого відноситься система електропривода підйомного механізму. Згідно зазначеного закону 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 підвішено вантаж.

На основі, вищенаведеного комісія вбачає доцільність введення результатів досліджень описаних в даній дисертаційній роботі, до практичної реалізації при проведенні планової модернізації наявного козлового крана ККС-10

Директор ТОВ «Велес- Агро ЛТД.»

Хомишинець В.Л.

Заступник Дирктора ТОВ «Велес- Агро ЛТД.»

Камінський Ю.В.

Головний технолог ТОВ «Велес- Агро ЛТД.»

Костюк В.В.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор з наукової
роботи та міжнародного
співробітництва ВНТУ
д.т.н., професор

В.В. Грабко

«29» 2021 р.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи «Синтез систем оптимального керування електроприводами зі змінними параметрами і пружними зв'язками»

Кривоноса Олександра Михайловича
у навчальний процес

Комісія у складі: декана факультету електроенергетики та електромеханіки, кандидата технічних наук, доцента Розводюка М.П., заступника декана факультету електроенергетики та електромеханіки з навчально-методичної роботи, кандидата технічних наук, доцента Ведміцького Ю.Г. та заступника декана факультету електроенергетики та електромеханіки з наукової роботи та міжнародного співробітництва, кандидата технічних наук, професора Рубаненка О.Є., склали цей акт про те, що для вивчення дисциплін: «Математичні методи ідентифікації та оптимізації динамічних систем», що викладається студентам бакалаврату, та «Методологія та організація наукових досліджень», що викладається студентам магістерської підготовки напрямку 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», впроваджено такі результати, розроблені Кривоносом О.М.:

- 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 та змінність в часі моменту навантаження тягового електродвигуна при підйманні (опусканні) вантажу вантажопідіймальним механізмом;
- закон оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними в часу та просторі, реалізацією якого є досягнення таких характеристик процесу переміщення вантажів, які унеможливають руйнування як вантажів, так і майданчиків, на яких ці вантажі встановлюються.

Декан ФЕЕЕМ

Заступник декана ФЕЕЕМ

Заступник декана ФЕЕЕМ

М.П. Розводюк

Ю.Г. Ведміцький

О.Є. Рубаненко

Додаток Б

Список публікацій здобувача

- [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.