

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Маслій Андрій Сергійович

УДК 681.527.72

ДИСЕРТАЦІЯ
СТРУКТУРНИЙ ТА ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ЛІНІЙНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ
МОНОШПАЛЬНОГО СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ

05.13.07 – автоматизація процесів керування

151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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



А. С. Маслій

Науковий керівник
Буряковський Сергій Геннадійович,
доктор технічних наук, доцент

Харків – 2017

АНОТАЦІЯ

Маслій А. С. Структурний та параметричний синтез систем автоматичного керування лінійними електродвигунами моношпального стрілочного переводу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі вдосконалення мікропроцесорної системи автоматичного керування безредукторним регульованим електроприводом стрілочного переводу моношпального типу на базі лінійного двигуна для отримання заданого закону керування рухом гостряків та зменшення часу переводу стрілки.

В першому розділі «Аналіз задач і шляхів автоматизації стрілочних переводів залізничного транспорту» зроблено наступне:

- проведено огляд сучасних стрілочних переводів, який показує, що поряд з удосконаленням існуючих типів приводів шляхом заміни ненадійних елементів світовими компаніями проводиться робота над створенням нових рішень з метою підвищення надійності та швидкодії системи керування і отримання високих швидкостей руху гостряків стрілочного переводу;

- розглянуто існуючі системи керування стрілочними переводами з точки зору якості процесу переводу гостряків та загальної керованості процесом, який показує відсутність контролю за основними координатами електроприводу – струму, швидкості та положення;

- сформульовані основні задачі та шляхи автоматизації стрілочних переводів залізниць України.

В другому розділі «Ідентифікація параметрів лінійного електродвигуна як об'єкта керування» зроблено наступне:

- обґрунтовано використання лінійного електродвигуна в якості об'єкту керування в запропонованій конструкції стрілочного переводу моношпального типу;

- складено завдання умовної оптимізації параметрів двигунів приводу, особливістю якої є використання в якості критерію середньоквадратичне відхилення тягової сили лінійного електродвигуна від сили опору, а в якості варійованих параметрів обрано геометричні розміри елементів (складових) двигуна;

- визначено раціональний підхід до вирішення задачі умовної оптимізації параметрів двигунів;

- визначено оптимальні тягові характеристики лінійного двигуна електромагнітного типу та лінійного індукторного двигуна на підставі розроблених статичних математичних моделей для визначення величини електромагнітної сили.

В третьому розділі «Розробка та дослідження нейрорегулятора для системи автоматичного керування стрілочним переводом на базі лінійного двигуна електромагнітного типу» зроблено наступне:

- розроблено математичні моделі приводів стрілочного переводу з використанням рівнянь Лагранжа II роду для електромеханічної системи, особливістю яких є визначення потокозчеплення лінійного двигуна електромагнітного типу на підставі комплексу цифрових експериментів з розрахунку магнітного потоку методом кінцевих елементів в оксіально-симетричній постановці задачі, та проведено аналіз отриманих результатів;

- визначено залежності потокозчеплення і електромагнітної сили, які ідентифікують лінійний двигун електромагнітного типу, та показано, що ці залежності є неперервними і дозволяють однозначно визначити їх похідні на всій розглянутій області;

- розроблено імітаційну модель приводу стрілочного переводу в середовищі «MATLAB Simulink», яка імітує роботу системи керування, напівмостового інвертора, лінійного електродвигуна та механічної частини;

– розроблено нейрорегулятор стрілочного переводу моношпального типу особливістю якого є: обрано штучну нейронну мережа зі структурою персептрона 3-10-1; розглянуто можливі алгоритми навчання та режими його роботи; вирішено задачу керування швидкістю руху лінійного двигуна на всьому шляху руху якоря, контролю його положення і плавного доводу гостряків до рамної рейки; імітаційну математична модель стрілочного переводу доповнено регулятором струму для захисту електродвигуна і силових елементів електронного комутатора.

В четвертому розділі «Розробка і дослідження системи автоматичного керування стрілочним переводом на базі лінійного індукторного електродвигуна» зроблено наступне:

– розроблено математичну модель приводу стрілочного переводу, особливістю якої є визначення поточкозчеплень та електромагнітної сили лінійного індукторного двигуна на підставі комплексу цифрових експериментів за розрахунком магнітного потоку методом кінцевих елементів;

– проведено аналіз отриманих в результаті цифрового моделювання даних з використанням полінома Чебишева на множині рівновіддалених точок, що дозволив визначити неперервні залежності електромагнітної сили та поточкозчеплення лінійної індукторної машини;

– проведено комплекс імітаційного моделювання, який дозволив визначити залежності, що описують вплив зміни напруги і струму двигуна на електромагнітну силу, швидкість і переміщення гостряків;

– з використанням аналітичних методів z-перетворення розроблено структурну схему ПД-регулятора швидкості та його імітаційну модель у середовищі «MATLAB Simulink»;

– на основі методу Чина-Хронса-Ресвіка отримано діаграми розподілу коефіцієнтів ПД-регулятора в залежності від швидкості руху якоря та його положення.

В п'ятому розділі «Експериментальні дослідження об'єкта і системи керування» зроблено наступне:

- розроблено та виготовлено фізичну модель лінійного двигуна в масштабі 1:2 (габаритні розміри: довжина – 310 мм; діаметр – 75 мм; маса – 5 кг);

- створено математичну модель електроприводу стрілочного переводу на основі дослідного зразка лінійного двигуна з ідентифікованими параметрами нейрорегулятора та запропоновано конструкцію системи автоматичного керування на базі мікроконтролера dsPIC30F3011;

- для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі лінійного двигуна та підтвердження працездатності системи автоматичного керування розроблено стенд, на якому отримано осцилограми електричних та механічних характеристик роботи об'єкта керування;

- отримані результати показують високий рівень співпадання розрахункових діаграм з осцилограмами реальних перехідних процесів в системі керування та електромеханічній системі стрілочного переводу. Розбіжність по основних координатах складає від 2 до 7%.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Маслий Ан. С. Оптимизация системы управления вентильно-индукторного двигателя для стрелочного перевода / С. Г. Буряковский, Б. Г. Любарский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий, А. В. Шевкунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-На-Дону : РГУПС, 2013. – № 2. – С. 61-67.

2. Маслий Ан. С. Разработка электропривода стрелочного перевода с вентильно-индукторным электродвигателем и исследование на математической модели режимов его работы / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий, А. Д. Петрушин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 36. – С. 198-201.

3. Маслий Ан. С. Разработка и исследование системы управления вентильно-индукторным электродвигателем / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий, Б. Г. Любарский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – № 5 (102). – С. 68-74.

4. Маслий Ан. С. Синтез регуляторов скорости вентильно-индукторного электропривода стрелочного перевода / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2014. – № 1 (104). – С. 31-40.

5. Маслий Ан. С. Вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа / С. Г. Буряковский, В. В. Захарченко, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса : ОНПУ, 2014. – № 15 (91). – С. 148-150.

6. Маслий Ан. С. Расчет тяговой характеристики линейного двигателя для стрелочного перевода / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий, Б. Г. Любарский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2015. – № 1(110). – С. 83-87.

7. Masliy An. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor / S. Buryakovskiy, B. Lyubarskiy, Ar. Masliy, An. Masliy // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса : ОНПУ, 2015. – № 19 (95). – С. 75-78.

8. Маслий Ан. С. Исследование работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя / С. Г. Буряковский, Б. Г. Любарский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 12 (1121). – С. 209-213.

9. Маслий Ан. С. Математическая модель работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя / С. Г. Буряковский, Б. Г. Любарский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Інформаційно-керуючі

системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – № 3 (112). – С. 59-65.

10. Masliy An. Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor / S. Buriakovskiy, An. Masliy, Ar. Masliy // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 4/1 (82). – С. 32-41.

11. Маслий Ан. С. Исследование адекватности математической модели вентильно-индукторного двигателя / Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 54-60.

12. Маслий Ан. С. Разработка и исследование системы управления вентильно-реактивным электродвигателем / С. Г. Буряковский, Б. Г. Любарский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – Вип. 36. – С. 195-197.

13. Маслий А. С. Разработка нейрорегулятора для системы автоматического управления стрелочным переводом на базе линейного двигателя электромагнитного типа / А. С. Маслий // Електрифікація транспорту. – Дніпро : ДНУЗТ, 2017. – Вип. 13. – С. 92-98.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

14. Маслий Ан. С. Перспективы модернизации электроприводов стрелочных переводов / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук : КрНУ, 2013. – № 2 (22). – С. 124-127.

15. Маслий Ан. С. Расчет и оптимизация геометрических размеров линейного привода стрелочного перевода моношпального типа / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Проблеми енергоресурсосбереження в електротехнічних системах. – Кременчук : КрНУ, 2015. – № 1 (3). – С. 65-67.

16. Маслий Ан. С. Математическое описание линейного электродвигателя индукторного типа для стрелочного перевода / С. Г. Буряковский, Н. П. Карпенко, Б. Г. Любарский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. – Кременчук : КрНУ, 2016. – № 1 (4). – С. 258-260.

17. Маслій Ан. С. Оптимізація геометричних розмірів лінійного двигуна для шпального стрілочного переводу / С. Г. Буряковський, А. С. Маслій // Тези 77-ї науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». – Харків : УкрДАЗТ, 2015. – № 151. – С. 86.

18. Маслий Ан. С. Электропривод стрелочного перевода моношпального типа на базе линейного электродвигателя / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Тезисы VI Международной конференции «Энергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості». – Воловец : ДНУЗТ, 2015. – С. 33-34.

19. Маслий Ан. С. Определение параметров линейного привода стрелочного перевода / С. Г. Буряковский, Б. Г. Любарский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Труды Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. – С. 85-90.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Пат. 95497 Україна. МПК (2015.01) B61L 5/00. Электропривод стрілочного переводу / С. Г. Буряковський, Ар. С. Маслій, Ан. С. Маслій. – № u201407676 заявл. 08.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.

21. Пат. 109159 Україна. МПК (2015.01) B61L 5/00, BL61 7/06 (2006.01). Безредукторний електропривод стрілочного переводу шпального типу / С. Г. Буряковський, Б. Г. Любарський, Ар. С. Маслій, Ан. С. Маслій. – № u201602492 заявл. 14.03.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

ABSTRACT

Maslii A. S. Structural and parametric synthesis of automatic control systems for linear motors of a sleeper-type turnout. – Manuscript.

Dissertation for candidate of technical sciences (Ph.D.) degree by specialty 05.13.07 – automation of control processes. , National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to solving the problem of multipurpose synthesis of automatic control systems of a sleeper-type point machine based on two types of linear electric motors using various optimization methods and genetic control algorithms.

In the first section "Analysis of tasks and ways of automation of turnouts of railway transport" the following is done:

- the overview of modern turnouts has been carried out, which shows that, along with the improvement of existing types of motors by replacing unreliable elements global companies is under way to create new solutions in order to increase the reliability and speed of the control system and obtain high velocity of the movement of the tongues of the turnouts;

- the existing systems of control of turnouts from the point of view of the quality of the translation process of the tongues and the overall controllability of the process, which shows the lack of control over the main coordinates of the electric motor – current, speed and position, are considered;

- the main tasks and ways of automation of turnouts of Ukrainian railways are formulated.

In the second section "Identification of the parameters of a linear electric motor as a control object" the following is done:

- the use of a linear electric motor as a control object in the proposed construction of the sleeper-type turnout is grounded;

- the task of conditional optimization of the parameters of the drive motors is drawn, the feature of which is the use as a criterion of the mean-square deviation of

the traction force of a linear electric motor and the resistance strength, and the geometric dimensions of the elements of the engine are selected as variables;

- a rational approach to the problem of conditional optimization of engine parameters is determined;

- the optimal traction characteristics of the linear motor of an electromagnetic type and a linear induction motor are determined on the basis of developed static mathematical models for determining the magnitude of the electromagnetic force.

In the third section "Development and research of the neuro-regulator for the system of automatic control of a turnout based on a linear engine of electromagnetic type", the following is done:

- the mathematical models of a turnout using the Lagrange II equations for the electromechanical system are developed, the feature of which is to determine the connection of a linear motor of an electromagnetic type based on a complex of digital experiments and the calculation of magnetic flux using the method of finite elements in the oxy-symmetric formulation of the problem, and an analysis of the obtained results;

- dependences of the flow-coupling and the electromagnetic force that identify the linear electromagnetic-type motor are determined, and it is shown that these dependences are continuous and allow us to uniquely identify their derivatives in the entire area under consideration;

- the simulation model of the drive is developed using the MATLAB Simulink environment simulating the operation of the control system, the half-bridge of the inverter, the linear electric motor and the mechanical part;

- a neural network controller for the sleeper-type turnout is developed, the feature of which is: the artificial neural network with the structure of the perceptron 3-10-1; possible training algorithms and modes of its work are considered; the task of controlling the speed of the linear motor along the entire path of the anchor, the control of its position and the smooth argument of the wanders to the frame rails is solved; simulation mathematical model of switching is supplemented by a current

regulator for the protection of the electric motor and the power elements of the turnout.

In the fourth section "Development and research of the system of automatic control of the turnout based on linear inductive electric motor" the following is done:

- the mathematical model of the motor of the turnout is developed, the peculiarity of which is to determine the flow connections and the electromagnetic force of the linear induction motor using a complex of digital experiments based on the calculation of magnetic flux by the method of finite elements;
- an analysis of the data obtained from the digital modeling using the Chebyshev polynomial in a set of equidistant points was carried out, which allowed to determine the continuous dependences of the electromagnetic force and the current coupling of the linear induction machine;
- a complex of imitative modeling has been carried out, which allowed to determine the dependencies describing the effect of changes in voltage and current of the engine on the electromagnetic force, speed and the tongues;
- using the analytical methods of z-transformation a structural scheme of the speed controller and its simulation model in the MATLAB Simulink environment have been developed;
- using the Chin-Chrones-Resvick method, the diagrams of distribution of coefficients of the controller are obtained, depending on the speed of the anchor and its position.

In the fifth section "Experimental Investigations of the Object and Control System" the following is done:

- physical model of the linear motor was developed and manufactured on scale 1: 2 (overall dimensions: length - 310 mm, diameter - 75 mm, weight - 5 kg);
- the mathematical model of the electric motor was created based on the experimental model of the linear motor with the identified parameters of the neuro-regulator and the design of the automatic control system based on the microcontroller dsPIC30F3011 was proposed;

– to confirm the adequacy of the developed mathematical model of the linear engine and to confirm the efficiency of the automatic control system, a stand was developed on which the oscillograms of the electrical and mechanical characteristics of the control object were obtained;

– the obtained results show a high level of coincidence of the calculated diagrams with the oscillograms of real transient processes in the control system and the electromechanical system of the turnout. The difference in the main coordinates is from 2 to 7%.

Keywords: automatic control system, turnout, linear electric motor, conditional optimization, genetic algorithms, neuro-regulator.

LIST OF PUBLICATIONS

Publication where the main scientific results of the dissertation are published:

1. Masliy An. S. Optimizatsiya sistemyi upravleniya ventilno-induktornogo dvigatelya dlya strelochnogo perevoda / S. G. Buryakovskiy, B. G. Lyubarskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy, A. V. Shevkunova // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobscheniya. – Rostov-Na-Donu : RGUPS, 2013. – № 2. – S. 61-67.

2. Masliy An. S. Razrabotka elektroprivoda strelochnogo perevoda s ventilno-induktornym elektrodvigatелеm i issledovanie na matematicheskoy modeli rezhimov ego raboty / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy, A. D. Petrushin // Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskiy politehnicniy Institut». – Harkiv : NTU «HPI», 2013. – № 36. – S. 198-201.

3. Masliy An. S. Razrabotka i issledovanie sistemyi upravleniya ventilno-induktornym elektrodvigatелеm / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy, B. G. Lyubarskiy // Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti. – Harkiv : UkrDAZT, 2013. – № 5 (102). – S. 68-74.

4. Masliy An. S. Sintez regulyatorov skorosti ventilno-induktornogo elektroprivoda strelochnogo perevoda / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy,

An. S. Masliy // Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti. – Harkiv : UkrDAZT, 2014. – № 1 (104). – S. 31-40.

5. Masliy An. S. Ventilno-induktorniy elektroprivod strelochnogo perevoda monoshpalnogo tipa / S. G. Buryakovskiy, V. V. Zaharchenko, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Elektrotehnichni ta komp'yuterni sistemi. – Odesa : ONPU, 2014. – № 15 (91). – S. 148-150.

6. Masliy An. S. Raschet tyagovoy karakteristiki lineynogo dvigatelya dlya strelochnogo perevoda / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy, B. G. Lyubarskiy // Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti. – Harkiv : UkrDAZT, 2015. – № 1(110). – S. 83-87.

7. Masliy An. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor / S. Buryakovskiy, B. Lyubarskiy, Ar. Masliy, An. Masliy // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса : ОНПУ, 2015. – № 19 (95). – С. 75-78.

8. Masliy An. S. Issledovanie raboty elektroprivoda strelochnogo perevoda na baze lineynogo dvigatelya / S. G. Buryakovskiy, B. G. Lyubarskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy. // Visnik Natsionalnogo tehniknogo universitetu «Harkivskiy politehnichniy Institut». – Harkiv : NTU «HPI», 2015. – № 12 (1121). – S. 209-213.

9. Masliy An. S. Matematicheskaya model raboty elektroprivoda strelochnogo perevoda na baze lineynogo dvigatelya / S. G. Buryakovskiy, B. G. Lyubarskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti. – Harkiv: UkrDAZT, 2015. – № 3 (112). – S. 59-65.

10. Masliy An. Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor / S. Buriakovskiy, An. Masliy, Ar. Masliy // Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy. – 2016. – № 4/1 (82). – S. 32-41.

11. Masliy An. S. Issledovanie adekvatnosti matematicheskoy modeli ventilno-induktorного dvigatelya / Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Zbirnik naukovih prats UkrDUZT. – Harkiv : UkrDUZT, 2015. – Vip. 153. – S. 54-60.

12. Masliy An. S. Razrabotka i issledovanie sistemyi upravleniya ventilno-reaktivnyim elektrodvigatelem / S. G. Buryakovskiy, B. G. Lyubarskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Visnik Natsionalnogo tehnlchnogo universitetu «Harkivskiy polltehnichniy Institut». – Harkiv : NTU «HPI», 2013. – Vip. 36. – S. 195-197.

13. Masliy A. S. Razrabotka neyroregulyatora dlya sistemyi avtomati-cheskogo upravleniya strelochnym perevodom na baze lineynogo dvigatelya elektromagnitnogo tipa / A. S. Masliy // Elektrifikatsiya transportu. – Dnipro : DNUZT, 2017. – Vip. 13. – S. 92-98.

Published works of approbatory character:

4. Masliy An. S. Perspektivyi modernizatsii elektroprivodov strelochnyih perevodov / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Elektromehanichni i energozberlgayuchl sistemi. – Kremenчук : KrNU, 2013. – № 2 (22). – S. 124-127.

15. Masliy An. S. Raschet i optimizatsiya geometricheskikh razmerov lineynogo privoda strelochnogo perevoda monoshpalnogo tipa / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Problemi energoresursosberezhennya v elektrotehnichnih sistemah. – Kremenчук : KrNU, 2015. – № 1 (3). – S. 65-67.

16. Masliy An. S. Matematicheskoe opisanie lineynogo elektrodvigatelya induktornogo tipa dlya strelochnogo perevoda / S. G. Buryakovskiy, N. P. Karpenko, B. G. Lyubarskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Problemi energoresursozberezhennya v elektrotehnichnih sistemah. – Kremenчук : KrNU, 2016. – № 1 (4). – S. 258-260.

17. Masliy An. S. Optimizatsiya geometrichnih rozmiriv liniynogo dviguna dlya shpalnogo strilochnogo perevodu / S. G. Buryakovskiy, A. S. Masliy // Tezi 77-Yi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi «Rozvitok naukovoyi ta innovatsiynoyi diyalnosti na transporti». – Harkiv : UkrDAZT, 2015. – № 151. – S. 86.

18. Masliy An. S. Elektroprivod strelochnogo perevoda monoshpalnogo tipa na baze lineynogo elektrodvigatelya / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy,

An. S. Masliy // Tezisy VI Mezhdunarodnoy konferentsii «Energozberezhennya na zaliznichnomu transporti ta v promislovosti». – Volovets : DNUZT, 2015. – S. 33-34.

19. Masliy An. S. Opredelenie parametrov lineynogo privoda strelochnogo perevoda / S. G. Buryakovskiy, B. G. Lyubarskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy // Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energetika transporta. Aktualnyie problemy i zadachi». – Rostov-na-Donu : RGUPS, 2015. – S. 85-90.

*Published works, which additionally reflect the scientific results of the
dissertation:*

20. Pat. 95497 UkraYina. MPK (2015.01) B61L 5/00. Elektroprivid strilochного perevodu / S. G. Buryakovskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy. – № u201407676 zayavl. 08.07.2014; opubl. 25.12.2014, Byul. № 24.

21. Pat. 109159 UkraYina. MPK (2015.01) B61L 5/00, BL61 7/06 (2006.01). Bezreduktorniy elektroprivid strilochного perevodu shpalnogo tipu / S. G. Buryakovskiy, B. G. Lyubarskiy, Ar. S. Masliy, An. S. Masliy. – № u201602492 zayavl. 14.03.2016; opubl. 10.08.2016, Byul. № 15

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВВЕДЕННЯ	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАДАЧ І ШЛЯХІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	11
1.1 Стрілочні переводи України	11
1.2 Закордонні стрілочні переводи	16
1.3 Схеми керування вітчизняними стрілочними переводами.....	31
1.4 Задачі автоматизації стрілочних переводів	34
Висновки і постановка задач дослідження.....	37
РОЗДІЛ 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	40
2.1 Підхід до вибору конструкції лінійного електромеханічного перетворювача для стрілочного переводу.....	40
2.2 Альтернативний варіант конструктивного виконання лінійного двигуна у вигляді індукторної машини.....	43
2.3 Діаграми розподілу зусиль в запропонованому електроприводі стрілочного переводу на прикладі лінійного двигуна електромагнітного типу.....	45
2.4 Умовна оптимізація геометричних розмірів лінійного двигуна електромагнітного типу.....	50
2.5 Результати оптимізації геометричних розмірів індукторного двигуна	64
Висновки до розділу 2	66
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТРІЛОЧНИМ ПЕРЕВОДОМ НА БАЗІ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТИПУ	69

3.1 Математичне моделювання лінійного електромеханічного перетворювача	69
3.2 Підхід до вибору системи автоматичного керування	85
3.3 Загальні відомості про штучні нейронні мережі.....	87
3.4 Розробка нейрорегулятора.....	92
3.5 Аналіз роботи нейрорегулятора	97
Висновки до розділу 3	99
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТІЛОЧНИМ ПЕРЕВОДОМ НА БАЗІ ЛІНІЙНОГО ІНДУКТОРНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	101
4.1 Математичний опис лінійного індукторного двигуна.....	101
4.2 Синтез ПІД-регулятора швидкості	115
4.3 Аналіз роботи ПІД-регулятора.....	122
Висновки до розділу 4	126
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА І СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	128
5.1 Дослідний зразок лінійного двигуна електромагнітного типу.....	128
5.2 Імітаційна модель електроприводу дослідного зразка стрілочного переводу	129
5.3 Реалізація керованого електронного комутатора.....	132
5.4 Оцінка адекватності математичної моделі лінійного двигуна електромагнітного типу.....	136
5.5 Реалізація нейрорегулятора.....	142
5.6 Аналіз результатів дослідження.....	147
Висновки до розділу 5	150
ВИСНОВКИ	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	153
ДОДАТОК А	165
ДОДАТОК Б.....	169
ДОДАТОК В.....	174