

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЯКОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕЧІТКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Пантєєв Р. Л.

DOI: 10.37203/kibit.2020.43.08

УДК: 621.314:681.515

PANTYEEYEV R.
0000-0003-4707-4608
panteev.r@kibit.edu.ua
Kiev Institute of Business and Technology

ПАНТЄЄВ Р. Л.
0000-0003-4707-4608
panteev.r@kibit.edu.ua
Київський інститут бізнесу та технологій

Анотація. Розглядаються методи використання нечіткої логіки для вирішення задач керування електромеханічними системами. Як засіб для підвищення якості функціонування автоматизованих електромеханічних систем використовується один з сучасних принципів автоматичного управління - адаптивне управління, що реалізується за допомогою інтелектуальних технологій формування адаптивних алгоритмів регулювання та управління, а саме технологій нечіткого управління (Fuzzy-control).

Побудовано дві моделі систем управління: класична двоконтурна система стабілізації швидкості обертання двигун постійного струму – керований випрямляч з пропорційно-інтегральним регулятором і система стабілізації системи двигун постійного струму-керований випрямляч на основі нечіткого регулятора швидкості. Моделювання систем стабілізації і подальший аналіз перехідних процесів здійснювався за допомогою середовища моделювання Matlab Simulink. Після проведення необхідних математичних розрахунків і вибору найбільш оптимальних передавальних функцій, для кожного елемента була розроблена повна функціональна схема класичної двоконтурної системи стабілізації швидкості досліджуваної системи двигун постійного струму – керований випрямляч.

Проводиться порівняльний аналіз основних показників якості перехідного процесу для класичної і нечіткої систем управління з метою виявлення переваг і недоліків останньої. Досліджуються дві системи керування: класична двоконтурна система стабілізації швидкості обертання з пропорційно-інтегральним регулятором і система стабілізації на основі нечіткого регулятора швидкості. Моделювання систем стабілізації і подальший аналіз перехідних процесів здійснюється у середовищі моделювання Matlab Simulink з використанням блоку інтелектуального керування Fuzzy Control Toolbox.

Ключові слова: нечітка логіка, система автоматичного керування, похибка, зворотній зв'язок, електромеханічна система, адаптивне керування.

Для цитування: Пантєєв Р. Л. Моделювання та аналіз якості перехідних процесів в нечітких системах управління електроприводом. Вісник Київського інституту бізнесу та технологій. 2020. № 1 (43). С. 58-64 DOI: 10.37203/kibit.2020.43.08

MODELING AND ANALYSIS OF QUALITY OF TRANSITION PROCESSES IN FUZZY ELECTRIC CONTROL SYSTEMS

Abstract. The article is devoted to the problem of the formation of motivation for teaching students of higher education iSummary. Methods of using fuzzy-logic to solve problems of the electromechanical systems control are considered. As the way for the automated electromechanical systems functioning quality improvement is used one of the automatic control modern principles – adaptive control which is implemented by means of regulation and control adaptive algorithms formation intellectual technologies, namely indistinct control technology (Fuzzy-control).

Two models of control systems are considered: classical double-circuit system of the rotation speed stabilization of direct current motor – operated rectifier with the proportional and integrated regulator and the system of stabilization direct current motor – operated rectifier on the indistinct speed regulator basis. Modeling of stabilization systems and the further transition processes analysis was made by means of Matlab Simulink modeling environment. After carrying out of the necessary mathematical calculations and the choice of the most optimum transfer functions, the full function chart was developed for each element of the classical double-circuit scheme of the speed stabilization of the researched system direct current motor – operated rectifier.

The comparative analysis of the main quality indicators of the transition process for the classic and fuzzy control systems is carried out in order to identify the advantages and disadvantages of the latter. Two control systems are being investigated: the classic dual-circuit speed stabilization system with a the proportional and integral controller and the stabilization system based on a fuzzy-speed-controller. Modeling of stabilization systems and subsequent analysis of transients is

carried out in the Matlab Simulink simulation environment with using of the intellectual control box Fuzzy Logic Toolbox.

Keywords: fuzzy logic, automatic control system, error, feedback, electromechanical system, adaptive control.

Cite as: Pantyeyev R. (2020) Modeling and analysis of quality of transition processes in fuzzy electric control systems. Herald of Kiev Institute of Business and Technology. 1 (43). 58-64 DOI: 10.37203/kibit.2020.43.08

Отримано / Received 26.12.2019
Отримано виправлений варіант / Received in revised form 18.02.2020
Прийнято до друку / Accepted 05.03.2020

Постановка проблеми. Перспективним шляхом підвищення якості функціонування автоматизованих електромеханічних систем є використання нових сучасних принципів автоматичного управління – адаптивного управління.

Найбільшого поширення серед інтелектуальних технологій формування адаптивних алгоритмів регулювання та управління в області електропривода (ЕП) отримала технологія нечіткого управління (Fuzzy-control) [1, 2].

Мета статті – здійснити порівняльний аналіз основних показників якості перехідного процесу для класичної і нечіткої систем управління з метою виявлення переваг і недоліків останньої.

Виклад основного матеріалу. Математичний опис нечітких множин та логіки (fuzzy sets/logic) являють собою об'єктивування традиційної теорії множин і формальної логіки. Ці визначення були вперше використані відомим вченим-математиком Каліфорнійського університету (Берклі) Лотфі Заде (Lotfi A. Zadeh) у 1965 р. Необхідність виникнення нової теорії була вмотивована наявністю наближених (нечітких) міркувань, що часто застосовувались людьми при описі об'єктів, процесів та систем.

Перш ніж фази-підхід до моделювання складних систем був визнаний у всьому світі, пройшло досить багато часу з моменту виникнення теорії нечітких множин, тому на шляху розвитку фази-систем прийнято виділяти три періоди.

Перший період (кінець 60-х – початок 70 рр.) Характеризується розвитком теоретичного апарату нечітких множин (Л. Заде, Е. Мамдані, Беллман). У другому періоді (70–80-ті роки) з'являються перші практичні результати в області нечіткого управління складними технічними системами (парогенератор з нечітким керуванням). Одночасно стало приділятися увага питанням побудови експертних систем, побудованих на нечіткій логіці, розробці нечітких контролерів. Нарешті, в третьому періоді, який триває з кінця 80-х років і триває в даний час, з'являються пакети програм для побудови нечітких експертних систем, а області застосування нечіткої логіки помітно розширюються. Вона застосовується в автомобільній, аерокосмічній і транспортній промисловості, в області виробів побутової техніки, у сфері фінансів, аналізу і прийняття управлінських рішень та багатьох інших.

Стрімке поширення нечіткої логіки по світу почалося після докази в кінці 80-х Бартоломеєм Коско теореми FAT (Fuzzy Approximation Theorem).

Характеристикою нечіткої множини виступає функція приналежності (Membership Function). Позначимо через $MFC(x)$ – ступінь приналежності до нечіткої множини C . Тоді нечіткою множиною C називається множина впорядкованих пар виду $C = \{MFC(x) / x\}$, $MFC(x) [0,1]$. Значення $MFC(x) = 0$ означає відсутність приналежності до множини, 1 – повну приналежність.

Для нечітких множин, як і для звичайних, визначені основні логічні операції. Самими основними, необхідними для розрахунків, є перетин і об'єднання.

Перетин двох нечітких множин (нечітке «І»):
 $A \cap B: MFAB(x) = \min(MFA(x), MFB(x))$.

Об'єднання двох нечітких множин (нечітке «АБО»):
 $A \cup B: MFAB(x) = \max(MFA(x), MFB(x))$.

В теорії нечітких множин розроблено загальний підхід до виконання операторів перетину, об'єднання і доповнення, реалізований в так званих трикутних нормах і конормах. Наведені вище реалізації операцій перетину і об'єднання – найбільш поширені випадки t-норми і t-конорми.

Найбільш важливим застосуванням теорії нечітких множин є контролери нечіткої логіки. Їх функціонування дещо відрізняється від роботи звичайних контролерів – для опису системи використовуються знання експертів. Ці знання можуть бути виражені за допомогою лінгвістичних змінних, які описані нечіткими множинами.

В процесі дослідження було побудовано дві моделі систем управління: класична двоконтурна система стабілізації швидкості обертання двигун постійного струму – керований випрямляч (ДПС-КВ) з ПІ-регулятором і система стабілізації ДПС-КВ на основі нечіткого регулятора швидкості. Моделювання систем стабілізації і подальший аналіз перехідних процесів здійснювався за допомогою середовища моделювання Matlab Simulink.

Fuzzy logic toolbox – вбудована в Matlab сукупність функцій, що містить набір засобів, які дозволяють:

- створювати і редагувати нечіткі системи всередині середовища Matlab;
- вбудовувати нечітку підсистему в SimuLink (поставляється з Matlab) при моделюванні загальної системи;
- побудувати нечітку систему в Matlab у вигляді процедури, що викликається з програми, яка написана на мові Сі.

Даний набір інструментів забезпечує три категорії інструментальних засобів програмування нечітких систем:

- функції командного рядка (command line functions);
- графічний інтерактивний інтерфейс;
- використання вбудованих блоків Simulink.

Пакет нечіткої логіки Fuzzy Logic Toolbox – це пакет прикладних програм, що належать до теорії розмитих або нечітких множин, які дозволяють конструювати так звані нечіткі експертні і/або керуючі системи. Основні можливості пакету: побудова систем нечіткого виведення (експертних систем, регуляторів, апроксиматорів залежностей); побудова адаптивних нечітких систем (гібридних нейронних мереж); інтерактивне динамічне моделювання систем із нечіткою логікою в середовищі пакету блочного моделювання Simulink.

Пакет Fuzzy Logic Toolbox підтримує всі стадії розробки нечітких систем, включаючи синтез, дослідження, проектування, моделювання та впровадження в режимі реального часу. Вбудовані модулі GUI – модулі пакету створюють інтуїтивно зрозуміле середовище, що забезпечує легке просування на всіх етапах проектування нечітких систем. Функції пакету реалізують більшість сучасних нечітких технологій, включаючи нечітке логічне виведення, нечітку кластеризацію й адаптивне нейро-нечітке налаштування (ANFIS). Fuzzy Logic Toolbox, як і всі пакети розширення системи Matlab, відкритий для користувача: можна переглянути алгоритми, модифікувати вихідний код, додати власні функції належності або процедури дефазифікації. Ключовими особливостями пакету Fuzzy Logic Toolbox є: спеціалізовані GUI-модулі для створення систем нечіткого виведення; реалізація популярних алгоритмів нечіткого виведення Мамдані та Сугено; бібліотека функцій належності; налаштування функцій належності ANFIS-алгоритмом; екстракція нечітких правил за допомогою кластеризації даних; можливість вбудовування систем нечіткого виведення в Simulink через модуль «нечіткий контролер»; Сі-код алгоритмів нечіткого виведення, що дозволяє вико-

ристовувати спроектовані нечіткі системи поза середовищем Matlab.

Fuzzy Logic Toolbox включає наступні GUI-модулі: Fuzzy Inference System Editor – редактор загальних властивостей системи нечіткого виведення. Дозволяє встановити кількість входів і виходів системи, вибрати тип системи (Мамдані або Сугено), метод дефазифікації, реалізації логічних операцій, а також викликати інші GUI-модулі, що працюють із системами нечіткого виведення; Membership Function Editor – редактор функцій належності. Редактор виводить на екран графіки функцій належності вхідних та вихідних змінних. Дозволяє вибрати кількість термів для лінгвістичної оцінки вхідних та вихідних змінних, а також задати тип і параметри функцій належності кожного терму; Rule Editor – редактор нечіткої бази знань. Дозволяє задавати та редагувати нечіткі правила в лінгвістичному, логічному та індексному форматах. Редагування правил здійснюється вибором необхідного поєднання термів із меню; Rule Viewer – браузер нечіткого виведення. Візуалізує виконання нечіткого виведення з кожного правила, одержання результуючої нечіткої множини та її дефазифікацію; Surface Viewer – браузер поверхні «входи-вихід» нечіткої системи. Виводить графіки залежності вихідної змінної від будь-яких двох вхідних змінних; ANFIS Editor – редактор нейро-нечіткої мережі.

В якості даних для моделювання застосовувалися технічні характеристики лабораторної установки. Після проведення необхідних математичних розрахунків і вибору найбільш оптимальних передавальних функцій, для кожного елемента була розроблена повна функціональна схема класичної двуконтурної системи стабілізації швидкості ДПС-КВ (Рис.1.):

Для отримання графіків перехідних процесів на основі моделі класичної системи стабілізації швидкості був проведений наступний екс-

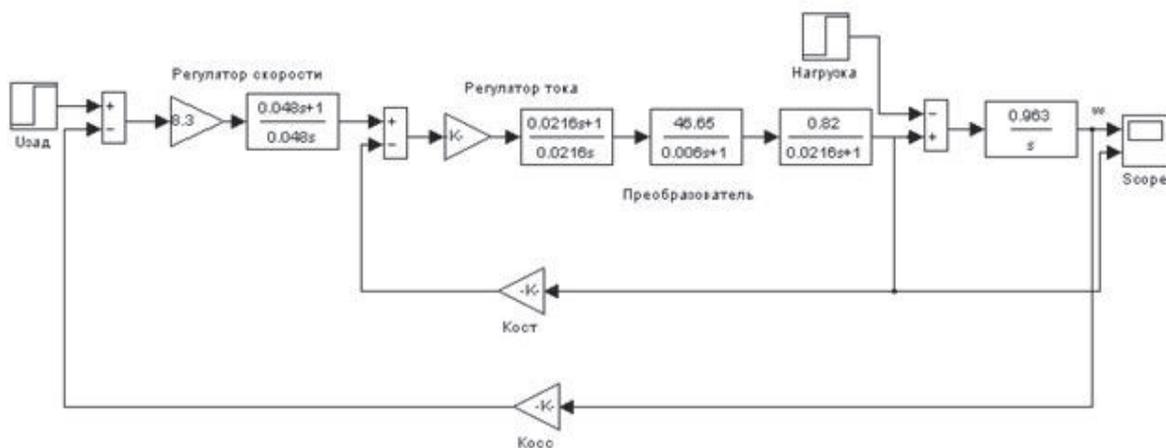


Рис. 1. Повна функціональна схема двоконтурної системи стабілізації в середовищі моделювання Matlab Simulink

перимент. Наявні в складі побудованої моделі стандартні блоки системи Matlab – генератори ступеневого сигналу Step, які в даному випадку виконують роль елементів, що задають сигнал і навантаження, дозволяють змінювати свої величини в заданий момент часу. Завдяки цьому, досліджувана модель буде запущена в роботу з наступними умовами:

1. Система запускається з сигналом завдання $U_{завд} = 10$ в.о. і під навантаженням $I_{нав} = 50$ в.о.
2. У момент часу $t = 7,5$ с сигнал завдання зменшується вдвічі.
3. У момент часу $t = 15$ с момент навантаження зростає.

При правильному налаштуванні всіх параметрів системи, її реакція по швидкості на зазначені

ні вище скачки сигналу завдання і навантаження буде виглядати наступним чином (Рис. 2).

Далі була побудована модель системи стабілізації швидкості ДПС-КВ на основі нечіткого регулятора. Основні принципи моделювання нечіткого регулятора швидкості, за допомогою пакета розширення Fuzzy Logic Toolbox, для системи ДПС-КВ описані в статті [3].

Модель системи стабілізації швидкості ДПС-КВ з нечітким регулятором, побудована за допомогою середовища моделювання Matlab Simulink, представлена на Рис.3:

Моделі перехідних процесів, отримані за допомогою даної моделі, наведені на Рис.4.

Далі проводився порівняльний аналіз основних показників якості перехідних процесів за отриманими графіками для побудованих моделей.

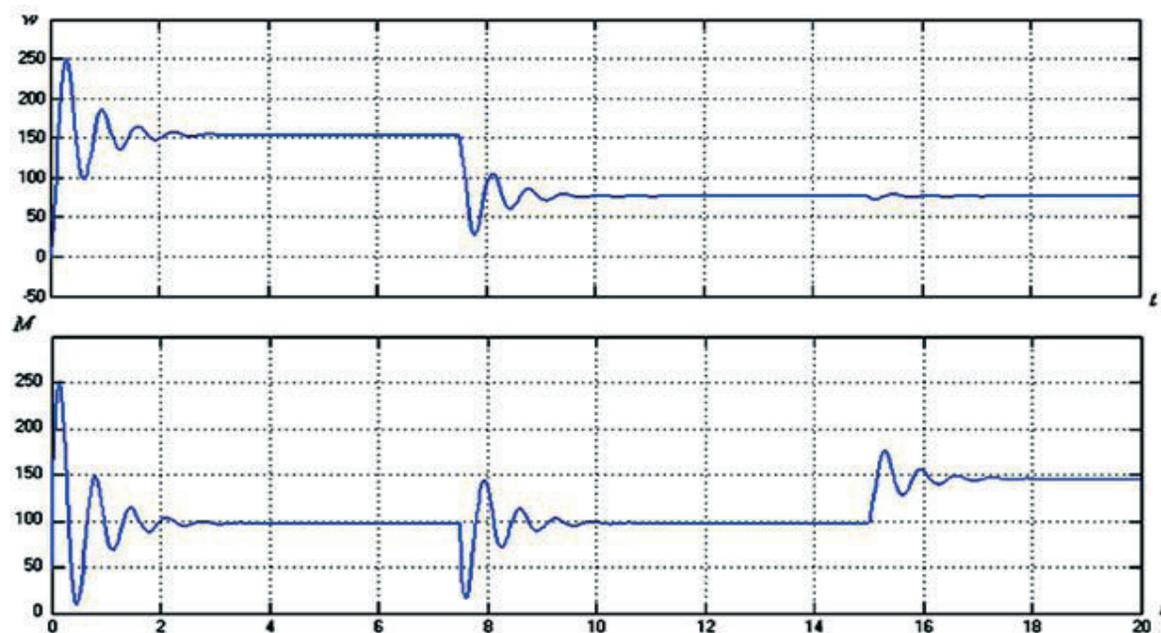


Рис.2. Графік моделювання перехідних процесів класичної системи стабілізації швидкості

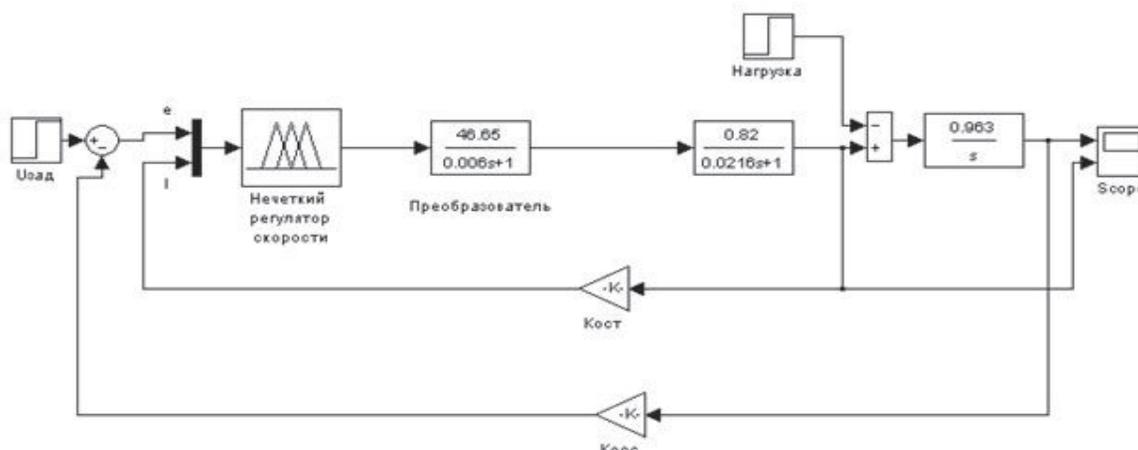


Рис. 3. Модель системи стабілізації швидкості обертання ДПС з нечітким регулятором

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз графіків перехідних процесів досліджуваних моделей

Осн. показ. якості п. п.	Режим 1		Режим 2		Режим 3	
	Клас. модель	Нечітка модель	Клас. модель	Нечітка модель	Клас. модель	Нечітка модель
$t_{пер,c}$	4	1.5	3	1.2	3	2
$\sigma, \%$	62.3	40	36.4	10.4	2.6	1.03
ω	9.37	7.85	7.85	7.39	8.97	8.97
n	5	2	4	2	5	3
$t_{l,max,c}$	0.25	0.27	0.7	0.6	0.5	0.5
$t_{пп,c}$	0.18	0.13	0.3	0.5	0.3	0.35
χ	3.23	19.3	3.5	4	2.5	8

Оцінка якості перехідних процесів проведена за такими основними показниками: час регулювання ($t_{пер}$); перерегулювання (σ); частота коливань (ω); число коливань (n), час досягнення першого максимуму ($t_{l,max}$); час наростання перехідного процесу ($t_{пп}$); декремент загасання (χ).

Перехідні процеси за швидкістю були змодельовані для 3-х режимів:

- 1) перехідний процес при пуску під навантаженням ($t = 0$ с);
- 2) перехідний процес в момент часу $t = 7.5$ с, коли сигнал завдання зменшується вдвічі;
- 3) перехідний процес в момент часу $t = 15$ с, коли навантаження зростає.

Аналіз якості перехідних процесів для досліджуваних моделей, наведено в Таблиці 1.

Висновки. За даними, наведеними в Таблиці 1, можна зробити наступні висновки:

1. Для першого режиму, при пуску під навантаженням – модель системи стабілізації швидкості з нечітким регулятором забезпечує час перехідного процесу по швидкості менше, ніж класична модель (62%). Так само перехідний процес по швидкості для моделі з нечітким регулятором відрізняється меншими значеннями величини перерегулювання (35%), частоти (16.2%), числа коливань (60%) і більшою величиною декремента загасання (83.3%).
2. Для другого режиму при стрибку сигналу завдання модель системи з нечітким регулятором забезпечує на 30-35% менші провали по швидкості, ніж модель класичної системи. При цьому зменшується часом регулювання (практично в два рази) і число коливань за час регулювання (50%).
3. Для третього режиму, при стрибкоподібній зміні навантаження – модель системи стабілізації з нечітким регулятором забезпечує менші провали по швидкості (45-50%), ніж класична модель, а також характеризується меншим значенням часом регулювання (33%) і числа коливань (40%).

На підставі отриманих в ході дослідження результатів, можна зробити висновок, що заміна

класичного регулятора швидкості на регулятор ідентичної структури, але побудований за принципами нечіткої логіки призводить до суттєвого зниження впливу перехідного процесу системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Макаров І.М., Лохина В.М., Манько С.В., Романов, М.П. Штучний інтелект і інтелектуальні системи управління. М.: Наука, 2006. 333с.
2. Зайцев А.И., Муравйов, В.Л., Сташнов Г.Л. Застосування нечітких систем управління в електроприводах. Режим доступу: www.electro.nizniy.ru/papers/4/00407.html.
3. Кабилбекова В.В., Кулахметов Р.Ф., Надєєв А.І. Нечіткі системи управління тиристорними електроприводами. Датчики і системи. 2009. №5. С. 37-39.
4. Богута О.С. Розробка структурної математичної моделі електроприводу підйомного пристрою крана-маніпулятора // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», 2019. 5с.
5. Толочко О.І. Навчальний посібник з дисципліни «Моделювання та аналіз електромеханічних систем в MATLAB». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського (електронне мережне навчальне видання), 2019. – 298 с.
6. Бовкунович В.С., Бурмельов О.О. Обмеження струму і напруги статора в системі тризонного регулювання швидкості двигуна з постійними магнітами при використанні оптимальних стратегій керування // ПСЕ Технічна електродинаміка, 2018, №5. – С. 61-64. (Scopus). Current and voltage stator limitation in three-zone speed control system of motor with permanent magnets using optimal control strategies *Tekhnichna Elektrodynamika* 2018-08-16 | journal-article DOI: 10.15407/techned2018.05.061
7. Терейчук С.В. Дослідження астатичних за навантаженням систем регулювання швидкості // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», 2017. – С. 509-514.
8. Березюк Є.Ю. Параметричний синтез системи підпорядкованого регулювання положення та студентів // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», 2017. – С. 460-463.

9. Эль Хамдауи Муад. Анализ статических характеристик асинхронного двигателя при питании его от устройства плавного пуска швидкості // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», 2017. – С. 468-473.

10. Сопіга М.В. Структурна реалізація системи тризонного регулювання швидкості синхронного двигуна з постійними магнітами при використанні оптимальних стратегій керування // Вісник Вінницького політехнічного університету. – 2017, №5. – С. 101-107 (8 с.). ISSN 1997-9266.

11. Стяжкін В.П., Рижков О.П. Дослідження процесів руху механізмів мостового крану при їх одночасній роботі методом математичного моделювання з використанням віртуальних механічних блоків бібліотеки Simmechanics пакету Matlab // Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електропривода. Силова електроніка та енергоефективність – Харків: НТУ «ХПІ», 2017, вип. 27 (1249). – С.48-52.

12. Кондратенко І.П. Шляхи побудови системи автоматичного керування краном-маніпулятором // Автоматика-2017: XXIV міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, Україна, 13-15 вересня 2017 р.: тези конференції. – С.104-105.

13. Романчук А.О. Особливості віртуального фізичного моделювання механічних об'єктів з використанням блоків бібліотеки SimMechanics // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», 2016. – С. 276-282.

14. Бажутин Д.В. Гашение колебаний перемещаемых мостовыми кранами грузов при переменной длине каната // Завалишинские чтения '16. – СПб.: ГУАП (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения), 2016. – С. 250-255.

15. Чорний О.П., Титюк В.К. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2016. – 299 с. Рекомендовано до видання вченою радою Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського (протокол №1 від 25.10.13 р.)

16. Толочко О.І. Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета MATLAB з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання SIMSCAPE // Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електропривода. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015, 12 (1121). – С.118-123.

17. Бугровий А.А. Поліпшення динаміки систем електроприводу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами при використанні оптимальних стратегій керування // Технічна електродинаміка, 2016, №5. – С. 35-37 (Scopus). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.035>

REFERENCES

1. Makarov I.M., Loxy'na V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. (2006). Shtuchny'j intelekt i intelektual'ni sy'stemy` upravlinnya. Viddilennya inform. tehnologij i obch. sy'stem RAN. Moscow. Nauka.

2. Zajcev A.Y', G.L. Muravjov, V.L. Stashnov Zastosuvannya nechitky`x sy'stem upravlinnya v

elektropry`vodax.. Available at: www.electro.nizniy.ru/papers/4/00407.html.

3. Kaby`Ibekova V.V., Kulaxmetov R.F., Nadyeyev A.I. (2009). Nechitki sy'stemy` upravlinnya ty`ry`storny`my` elektropry`vodamy`. Datchy`ky` i sy'stemy`. №5. S. 37-39.

4. Bohuta O.S. Rozrobka strukturnoi matematychnoi modeli elektropryvodu pidiomnoho prystroiu kranamanipuliatora // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv «Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky», 2019. 5 s.

5. Tolochko O.I. Navchalnyi posibnyk z dystsypliny «Modeliuvannya ta analiz elektromekhanichnykh system v MATLAB». Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho (elektronne merezhne navchalne vydannia), 2019. – 298 s.

6. Bovkunovych V.S., Burmelov O.O. Obmezhenia strumu i napruhy statora v systemi tryzonnoho rehuliuвання shvydkosti dvyhuna z postiiinymy mahnitamy pry vykorystanni optymalnykh stratehii keruvannya // PSE Tekhnichna elektrodynamika, 2018, №5. – S. 61-64. (Scopus). Current and voltage stator limitation in three-zone speed control system of motor with permanent magnets using optimal control strategies Tekhnichna Elektrodynamika 2018-08-16 | journal-article DOI: 10.15407/techned2018.05.061

7. Terebiichuk S.V. Doslidzhennia astatychnykh za navantazhenniam system rehuliuвання shvydkosti // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv «Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky», 2017. – S. 509-514.

8. Bereziuk Ye.Iu. Parametrychnyi syntez systemy pidporiadkovanoho rehuliuвання polozhennia ta studentiv // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv «Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky», 2017. – S. 460-463.

9. El Khamdauy Muad. Analyz statycheskykh kharakterystyk asynkhronnoho dvyhatelia pry pytany eho ot ustroistva pлавного пуска shvydkosti // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv «Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky», 2017. – S. 468-473.

10. Sopiha M.V. Strukturna realizatsiia systemy tryzonnoho rehuliuвання shvydkosti synkhronnoho dvyhuna z postiiinymy mahnitamy pry vykorystanni optymalnykh stratehii keruvannya // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho universytetu. – 2017, №5. – С. 101-107 (8 s.). ISSN 1997-9266.

11. Stiazhkin V.P., Ryzhkov O.P. Doslidzhennia protsesiv rukhu mekhanizmiv mostovoho kranu pry yikh odnochasnii roboti metodom matematychnoho modeliuvannya z vykorystanniam virtualnykh mekhanichnykh blokv biblioteki Simmechanics paketu Matlab // Visnyk NTU «KhPI». Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, vyp. 27 (1249). – S.48-52.

12. Kondratenko I.P. Shliakhy pobudovy systemy avtomatychnoho keruvannya kranom-manipuliatorom // Avtomatyka-2017: XXIV mizhnarodna konferentsiia z avtomatychnoho upravlinnya, m. Kyiv, Ukraina, 13-15 veresnia 2017 r.: tezy konferentsii. – S.104-105.

13. kanata // Zavalyshtynskye chteniya16. – SPb.: HUAP (Sankt-Peterburhskiyi gosudarstvennyy unyversytet aërokosmycheskoho pryborostroeniya), 2016. – S. 250-255.

15. Chornyi O.P., Tytiuk V.K. Matematychni modeli ta osoblyvosti chyselnykh rozrakhunkiv dynamiky elektropryvodiv z asynkhronnymy dvyhunamy: monohrafiia. – Kremenichuk: PP Shcherbatykh O.V., 2016. – 299 s. Rekomendovano do vydannia vchenoiu radoiu Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu im. M. Ostrohradskoho (protokol №1 vid 25.10.13 r.)

16. Tolochko O.I. Rozrobka modelei skladnykh elektromekhanichnykh system v seredovyshti paketa MATLAB z vykorystanniam blokiv dodatku virtualnoho fizychnoho modeliuvannia SIMSCAPE // Visnyk NTU «KhPI». Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015, 12 (1121). – S.118-123.

17. Buhrovyi A.A. Polipshennia dynamiky system elektropryvodu na bazi synkhronnoho dvyhuna z postiinymy mahnitamy pry vykorystanni optymalnykh stratehii keruvannia // Tekhnichna elektrodynamika, 2016, №5. – S. 35-37 (Scopus). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.035>
