

## ВІДГУК

### ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора Данилова Валерія Яковича на дисертаційну роботу Мірошниченко Галини Анатоліївни «Математичне моделювання процесів керування електроприводом», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**1. Актуальність теми дисертації.** Аналіз теорії і практики систем автоматичного керування свідчить, що подальше прискорення науково-технічного прогресу в області автоматизації пов'язане з широким застосуванням мікропроцесорної техніки та систем комп'ютерної математики. Раціональне поєднання теорії і алгоритмічної бази дозволяє найбільш гармонічно побудувати процес проектування складних систем оптимального керування електроприводами. В руслі розвитку цієї концепції і лежить дана робота, що базується на твердженні: математичними моделями неперервних систем автоматичного регулювання є звичайні диференціальні рівняння та їх системи.

Задачами оптимального керування займалися такі видатні вчені, як А. Я. Дубовицький, О. А. Фельдбаум, Роберт Беллман, Л. С. Понтрягін, М. М. Красовський, Б. М. Пшеничний, Дж. Варга, С. І. Ляшко, М. М. Моїсеєв, А. Г. Бутковський, Б. І. Кузнецов, К. В. Задірака та інші.

Аналіз відомих методів наближеного розв'язання задач оптимального керування дозволяє зробити висновок, що методи, які дають найкраще наближення до точного розв'язку в нормі  $W_2^1[0, t]$ , не розглядались.

Сучасні високоточні системи керування вимагають швидкісних розрахунків. Тому актуальним стає необхідність розробки нових високоточних, швидкісних методів чисельного інтегрування і диференціювання. Зокрема, методів розв'язання двоточкових задач процесів керування електроприводами. В даній роботі розроблено новий метод наближеного розв'язання задачі оптимального керування електроприводом з використанням сплайн-функцій першого порядку та розв'язана двоточкова задача мінімізації витрат енергії в електроприводі.

**2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась згідно з тематичним планом науково-дослідницьких робіт кафедри вищої та прикладної математики Української





інженерно-педагогічної академії. Основні результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання науково-дослідної роботи «Побудова математичних моделей для управління технологічними процесами» № ФН 12-5 (2012-2014 рр.) в Українській інженерно-педагогічній академії, у якій автором наведена постановка задачі керування динамічною системою, математична модель якої представлена у вигляді двох звичайних диференціальних рівнянь з правою частиною, що визначає роботу двигуна, та отримано основні твердження щодо запропонованого методу.

**3. Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечувалась коректним використанням основних положень теорії мінімізації функції багатьох змінних; виписаним, правильно сформульованим функціоналом, мінімум якого дозволяє знайти найкраще наближення правих частин системи звичайних диференціальних рівнянь з керуванням в нормі  $W_2^1[0,1]$ , яка витікає з форми запису системи диференціальних рівнянь; порівнянням результатів тестових розв'язків з відомими точними розв'язками, отриманими методом Рунге-Кутти 4 порядку та в порівнянні з роботами інших авторів; достатньою кількістю публікацій у виданнях, що входять до переліку фахових видань України, та апробацією на міжнародних наукових конференціях.

**4. Нові наукові результати дисертаційної роботи.** У рамках вирішення завдань дисертаційного дослідження отримано наступні наукові результати:

- вперше запропоновано метод наближеного розв'язання задачі оптимального керування слідкуючим електроприводом з використанням сплайн-функцій, що дає найкраще наближення до точного розв'язку в нормі  $W_2^1[0,t]$ . Особливість методу полягає в тому, що математична модель об'єкта керування слідкуючим електроприводом представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь та еквівалентної їй системи інтегральних рівнянь, а невідомі параметри керування  $u_j(t)$  знаходяться одночасно з невідомими параметрами фазових координат  $x_i(t)$  шляхом мінімізації відповідного функціоналу, побудованого з використанням цих двох систем;

- набув подальшого розвитку метод найкращого наближення функції однієї змінної сплайнами 1-го порядку в нормі  $W_2^1[0,t]$  при розв'язанні задачі

Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь заданого порядку та задачі оптимального керування слідкуючим електроприводом;

– удосконалено метод розв’язання задачі Коші для системи диференціальних рівнянь з правими частинами у вигляді поліноміальних функцій шляхом вибору базисних функцій  $\psi_{i,k}(x) = x^k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,  $i = \overline{1, n}$ , що дозволило забезпечити високу точність наближення в нормі  $L_2[0, 1]$ .

**5. Оцінка змісту дисертації, її відповідність встановленим вимогам, стиль та повнота викладу наукових положень в опублікованих працях.** Дисертаційна складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків за розділами, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, двох додатків та має загальний обсяг 182 сторінки.

Зміст, оформлення дисертаційної роботи та повнота викладу наукових положень відповідають паспорту спеціальності та встановленим вимогам до кандидатських дисертацій згідно з «Порядком присудження наукових ступенів».

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлені у 17-ти наукових працях, з них 5 статей у періодичних виданнях, які входять до переліків спеціалізованих наукових видань України з технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (одна з яких включена до бази даних американського інституту наукової інформатики Томсона (ISI) та до реферативної бази даних Scopus) та 12 доповідей, опублікованих у збірнику наукових праць та друкованих матеріалах конференцій і симпозіумів.

Дисертація побудована логічно, матеріал викладено послідовно і продумано, з чітким розумінням мети і задачі дослідження. Розбиття дисертації на розділи і підрозділи виконано обґрунтовано, назви яких чітко відображають зміст, відображають зміст відповідних структурних одиниць. Дисертація написана літературною, технічно грамотною мовою.

В анотації та вступі доведено актуальність проблеми, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Відзначається особистий внесок автора та апробація отриманих результатів роботи.

У першому розділі здійснено огляд сучасного стану математичного моделювання електроприводів та методів наближеного розв’язання задач оптимального керування. Наведено класичні методи наближеного розв’язання



задач оптимального керування. Розглянуто математичні моделі електромеханічних систем у вигляді диференціальних рівнянь. Зокрема, математичну модель системи тиристорний перетворювач-двигун постійного струму незалежного збудження, математичні моделі двомасової та тримасової систем автоматичного керування, математичну модель електромеханічного слідкуючого приводу та математичну модель асинхронного двигуна. На основі огляду методів наближеного розв'язання задач керування зроблено висновок, що методи наближеного розв'язання задач оптимального керування, які дають найкраще наближення до точного розв'язку в нормі  $W_2^1[0, t]$ , не розглядалися.

У *другому розділі* запропоновано метод розв'язання задачі Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь. У розділі наведена постановка задачі оптимального керування, представлені класичні методи наближеного розв'язання задач оптимального керування, викладена постановка задачі Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь та наведені основні твердження методу розв'язання задачі Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь.

*Третій розділ* присвячений дослідженню метода розв'язання задачі керування електроприводом для функціонала типу 
$$\int_0^T (x^2(t) + u^2(t)) dt \rightarrow \min_{u \in \Omega}$$

Наведена постановка задачі оптимального керування електроприводом, яка зводиться до одного звичайного диференціального рівняння та постановка задачі керування електроприводом, математична модель якої представлена у вигляді двох звичайних диференціальних рівнянь. Розроблено загальний метод побудови функціоналу, який тісно пов'язаний з нормою  $W_2^1[0, t]$  і мінімум якого дає можливість з потрібною точністю знайти наближений розв'язок задачі керування електроприводом. Отримані системи лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження невідомих параметрів в наближеному розв'язку задачі керування для випадку, коли невідомі функції знаходяться у вигляді сплайнів 1-го порядку. Наведено основні твердження методу розв'язання задачі керування електроприводом. Розглянуто порівняння запропонованого в роботі методу з методом дослідження оптимального керування в динаміці генних мереж.

*Четвертий розділ* присвячений аналізу результатів обчислювального експерименту тестування запропонованого методу. Розглянуто чисельні приклади застосування викладеного методу до розв'язання задачі Коші для систем звичайних лінійних диференціальних рівнянь та приклади розв'язання



задачі керування електроприводом. Проведено порівняльний аналіз отриманих наближених розв'язків з точними розв'язками, а також наближеними розв'язками, отриманими методом Рунге Кутти 4 порядку. Результати показують, що для отримання порівняльної точності з методом Рунге-Кутти, запропонований метод вимагає знаходження меншої кількості невідомих параметрів. Чисельна реалізація запропонованого методу здійснена в системі комп'ютерної математики MathCAD із вбудованою процедурою MINIMIZE (J,C) для мінімізації запропонованого функціоналу.

**6. Наукове та практичне значення отриманих результатів** полягає у створенні нових алгоритмів та розширенні функціональних можливостей програмного продукту для розв'язання задач керування електроприводом. Отримані результати можуть бути використані при створенні пакету програм промислового значення та при конструюванні електроприводів.

Практичне значення одержаних результатів підтверджується їх упровадженням. Результати проведених у дисертаційній роботі досліджень упроваджено в навчальному процесі на кафедрі вищої та прикладної математики Української інженерно-педагогічної академії (при викладенні дисципліни «Теоретичні, фізичні та інформаційні основи галузевих знань» для студентів та магістрів за спеціальностями «Професійна освіта. Електроніка, радіотехніка та телекомунікація» та «Професійна освіта. Електротехніка та електромеханіка»). Також отримані результати упроваджені в розробках підприємства ПрАТ «Електромашина», а саме в приладах керування електричними двигунами при їх випробуваннях.

## **7. Зауваження до змісту дисертаційної роботи і автореферату.**

1. В підрозділі 3.1 дисертаційної роботи наведено запис сплайнів для програмної реалізації задачі оптимального керування електроприводом, який доцільно було б винести в додаток.

2. У роботі наведено приклади наближеного розв'язання задач оптимального керування першого і другого порядків. Вважаю, що доцільно було б приділити увагу розв'язанню задач оптимального керування більш високих порядків.

3. На мій погляд в роботі не достатньо повно розкривається задача вибору та обґрунтуванню математичної моделі слідкуючого електроприводу.

4. По тексту дисертаційної роботи не однаково сформульована назва

задачі: задача оптимального керування електроприводом та задача мінімізації витрат енергії в електроприводі.

5. В підрозділі 3.2 дисертаційної роботи не дано визначення деяких параметрів, наприклад  $M_1, M_2, p, q$ .

6. По тексту дисертації зустрічаються стилістичні неточності. Наприклад, управління (стор. 31), начало (стор. 45), мінімізуемого функціоналу (стор. 130).

**8. Висновки по дисертаційній роботі.** Незважаючи на зроблені зауваження, дисертаційна робота Мірошниченко Галини Анатоліївни є завершеним науковим дослідженням, в якому одержані нові теоретичні та експериментальні результати, що у сукупності є суттєвими серед обчислювальних методів наближеного розв'язання задач оптимального керування електроприводами; тема, об'єкт, предмет дослідження, зміст роботи та основні результати відповідають пунктам 1 і 2 паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Вважаю, що за обсягом досліджень, актуальністю, науковою новизною і практичним значенням одержаних результатів, їх впровадженням та опублікованим роботам дисертація відповідає вимогам чинних нормативних документів, у тому числі пунктам 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів» № 567, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її автор, Мірошниченко Галина Анатоліївна, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,  
професор кафедри математичних методів  
системного аналізу  
КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
доктор технічних наук, професор

 В.Я. Данилов

Підпис д.т.н., проф. Данилова В.Я.  
засвідчую: вчений секретар  
КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
кандидат філософських наук, доцент



 А.А. Мельниченко