

## **ВІДГУК**

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента кафедри електромехатроніки  
та комп'ютеризованих електромеханічних систем

Національного університету «Львівська політехніка»

**Копчака Богдана Любомировича**

на дисертаційну роботу **Горошка Василя Володимировича**

**«Оптимізація динамічних режимів електричних машин з використанням  
дробово-інтегральних регуляторів»,**

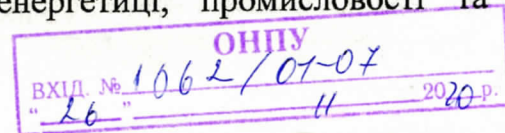
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
галузь знань 14 Електрична інженерія

**Актуальність теми дисертації.** В останні десятиліття в електромеханіці все більша увага приділяється одному з напрямків математики – дробовому численню, яке займається операціями диференціювання та інтегрування з дробовим порядком. Однією з причин зростання популярності цього математичного апарату є те, що він краще описує фізичні процеси з нелінійними залежностями. Як наслідок, це дозволяє спростити структуру та синтез регуляторів. Тому оптимізація динамічних режимів різноманітних об'єктів електромеханічних систем за використання передавальних функцій дробового порядку для покращення показників перехідних процесів є актуальною науковою задачею.

Дисертація присвячена дослідженню динамічних режимів в електричних машинах, а саме – в контурі струму двигуна постійного струму з послідовним збудженням, в контурі швидкості вентильно-реактивного двигуна та контурі фіксації швидкості в системі керування індукційними ретардерами. Дані об'єкти характеризуються нелінійними характеристиками, що ускладнюють структуру та синтез регуляторів в системах керування.

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету, і її тематика відповідає Закону України "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки", зокрема, п. 6 статті 7 "Нові технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та



агропромислового комплексу". Дисертаційні дослідження виконані в межах науково-дослідних робіт №165-52 «Розробка і дослідження електромеханічних систем автоматизації з поліпшеними динамічними та енергетичними характеристиками» (номер державної реєстрації 0119U000466) і №94-52 «Розробка і дослідження електромеханічних систем робочих машин промислового та побутового призначення для поліпшення енергетичних показників, усталених та перехідних режимів».

**Наукова новизна роботи.** В дисертації розглянуто контур струму двигуна постійного струму з послідовним збудженням, як один з об'єктів з нелінійною залежністю, де вперше виконано ідентифікацію якірного ланцюга передавальною функцією з дробовим порядком, що забезпечило мінімальну похибку при струмі якоря вище номінального. Також дана модель дозволила автору синтезувати регулятор з дробовим порядком астатизму 1,35 та отримати перехідні процеси без перерегулювання з мінімальним часом першого узгодження.

Іншою електричною машиною, яку розглянуто автором, є вентильно-реактивний двигун, а новий підхід полягає в ідентифікації контуру швидкості на базі дробово-аперіодичної функції при різних прикладених напругах з постійними кутами комутації. При такому методі отримано меншу похибку апроксимації та на основі отриманої моделі синтезовано регулятор з дробовим порядком, при якому отримано мінімальний час першого узгодження при перерегулюванні не більше 2 %.

Вперше в роботі синтезовано регулятор з дробовим порядком інтегрування в системі керування двома електромагнітними гальмами в стенді для налаштування паливної системи двигуна внутрішнього згоряння автомобілів, що дозволило забезпечити мінімальне перерегулювання з кращою динамічною та статичною точністю, внаслідок чого підвищується точність налаштування паливної системи та вимірювання максимальної потужності та моменту двигунів.

Найважливішим фактором наукової новизни результатів роботи є те, що отримані автором результати показують, що дробово-інтегральне числення надає можливість опису перехідних процесів в системах зі степеневими властивостями (у

разі електричних машин причиною їх існування є насичення магнітної системи) як лінійних об'єктів з диференційними рівняннями дробового порядку, що, в свою чергу, дозволяє використовувати класичний апарат теорії автоматичного керування для лінійних систем для аналізу таких об'єктів та синтезу регуляторів, які забезпечують оптимізацію динамічних режимів різних за принципом роботи електричних машин за мінімумом перерегулювання та часом першого узгодження. Так, з використанням регуляторів з приблизно однаковою структурою отримано оптимальні показники перехідних процесів в контурі струму двигуна послідовного збудження з  $PID^{II\gamma}$ -регулятором, в контурі швидкості вентильно-реактивного двигуна – з  $PI^{II\gamma}$ -регулятором та при керуванні електромагнітними гальмами – з  $PID^{II\gamma}$ -регулятором.

**Практична цінність результатів роботи** полягає в наступному: запропоновано модель і методи ідентифікації параметрів різних об'єктів зі степеневими властивостями їх динамічних процесів за допомогою дробового числення, а саме – контур струму в двигуні постійного струму послідовного збудження, контур швидкості вентильно-реактивного двигуна при різних параметрах живлення та контур фіксації швидкості в системі керування індукційними ретардерами. Отримані моделі не лише мають найменшу середньоквадратичну похибку, але, як наслідок, дозволили синтезувати регулятори з дробовим порядком інтегрування та диференціювання. Показано, що найкращі результати були отримані при налаштуванні на дробовий порядок астатизму більше одиниці.

Результати дисертаційної роботи використано в сервісному автосалоні в системі керування стендом вимірювання потужності (моменту) спортивних автомобілів та у навчальному процесі при викладенні дисциплін «Програмування мікропроцесорів і промислових контролерів для керування ЕМС та ЕТК», «Мікропроцесорна техніка та її програмування», «Моделювання ЕМС та пристроїв» на кафедрі електромеханічної інженерії Одеського національного політехнічного університету.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень та достовірність результатів.**

Отримані автором наукові результати у відповідності до поставлених задач досліджень є логічними, не суперечать фундаментальним фізичним і математичним закономірностям та підтверджуються достатньою апробацією основних положень і висновків на науково-технічних конференціях. Достовірність результатів, отриманих аналітичними методами, підтверджується результатами математичного, фізичного моделювання та експериментальними дослідженнями, а також впровадженням розробок в промисловість та навчальний процес.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеності.** Дисертація містить анотацію українською та англійською мовами (с.2-19), вступ (с.25-34), чотири розділи (с. 35-67 – розділ 1, с.68-99 – розділ 2, с.100-127 – розділ 3, с.128-166 – розділ 4), висновки (с.167-169), список використаних джерел (с.170-181), і додатки, що містять матеріали впровадження результатів дисертаційної роботи та код розробленого програмного забезпечення (с.182-223). Повний обсяг дисертації становить 223 сторінки. Обсяг основної частини 144 сторінок. Список цитувань містить 101 посилання. Робота містить 93 рисунки і 16 таблиць.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, відзначено наукову новизну та практичну цінність отриманих в роботі результатів, а також наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень і публікації щодо роботи.

**У першому розділі** надано теоретичні відомості про історію розвитку дробового диференціального числення, його область застосування (зокрема в системах керування) та огляд різноманітних методів для апроксимаційного розрахунку дробового інтеграла та похідної.

**Другий розділ** спрямовано на дослідження двигуна постійного струму з послідовним збудженням при врахуванні кривої намагнічування в динамічних процесах з подальшою апроксимацією контуру струму передавальною функцією з дробовим порядком та синтезом відповідних регуляторів з різним порядком астатизму.

**У третьому розділі** досліджується модель вентиляно-реактивного двигуна з врахуванням нелінійної залежності потокозчеплення та моменту з подальшою апроксимацією контуру швидкості та синтезом регуляторів з різним порядком астатизму.

**У четвертому розділі** досліджено систему керування двома електромагнітними гальмами. За принципом дії електромагнітне гальмо має нелінійні залежності, що ускладнює синтез системи керування. Також, на відміну від двох інших об'єктів, електромагнітні гальма вбудовані в стенд для налаштування паливної системи двигуна внутрішнього згоряння автомобілів. Тому спочатку підібрано PID-регулятор, при якому отримано перехідний процес з найменшою коливністю, перерегулюванням та протифазними коливаннями швидкостей коліс. Це дозволило ідентифікувати структурну схему і параметри динамічної моделі об'єкта керування.

**Висновки** по розділах і по дисертації відповідають отриманим в роботі результатам. Вони точно виражають зміст і наукову новизну цих результатів і ґрунтуються на розглянутих в тексті моделюванні, експериментах та графіках. Отримані результати відповідають вказаним у вступі меті, задачам, предмету і об'єкту дослідження і дійсно досягнуті із використанням вказаних у вступі методів.

**Повнота викладу в опублікованих працях.** За результатами досліджень опубліковано 8 статей та навчальний посібник, з них 4-у спеціалізованих виданнях, рекомендованих департаментом атестації кадрів вищої кваліфікації, і 3 - у виданнях, які індексуються в наукометричних базах SCOPUS і WEB OF SCIENCE. Без співавторів опубліковано 2 наукові роботи. Результати дослідження та положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях не знайдено.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

До матеріалів дисертаційної роботи необхідно зробити наступні зауваження:

1. В розділі 1 велика увага присвячена історії розвитку дробового числення з

точки зору математики, але з точки зору застосування дробового числення для опису об'єктів в електромеханіці можна було зробити огляд дещо ширший.

2. У формулі (1.26) на стор. 46 стала часу інтегратора  $T_i$  повинна бути у знаменнику. Це саме стосується формул (1.27), (1.28) і (1.29).

3. На сторінці 48 сказано: «На даний момент немає конкретної методики для розрахунку параметрів для  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора, на відміну від традиційного PID». З даного твердження можна зробити висновок, що для розрахунку параметрів  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора дробового порядку взагалі немає нічого. Проте є, наприклад, наближені підходи розрахунку на основі методики Зіглера і Нікольса, які застосовуються для наближеного розрахунку параметрів  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора дробового порядку.

4. З роботи не зрозуміло, яким чином були практично реалізовані регулятори дробового порядку, які застосовувалися в експериментальних дослідженнях.

5. З результатів на сторінці 75 не зрозуміло, яким чином був отриманий другий набір коефіцієнтів  $K_1=0.667$ ,  $K_2=18.53$ . Те саме стосується і результатів на сторінці 79.

6. З розділу 2 не зрозуміло, яка буде поведінка вихідної координати швидкості, при синтезованих налаштуваннях регуляторів струму для обох досліджуваних двигунів постійного струму.

7. Висновок №1 є надто об'ємний, його потрібно зменшити.

8. До роботи є певні термінологічні зауваження, наприклад, слід вживати термін «якірне коло» замість «якірний ланцюг», «підпорядковане регулювання», а не «підлегле регулювання».

9. В дисертації використовуються одиниці СІ позначені латинськими буквами. Це зауваження теж стосується  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора дробового порядку, який в роботі позначений як  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ .

Наведені зауваження не носять принципового характеру і в перспективі можуть бути враховані автором при проведенні подальших досліджень. Дисертаційна робота Горошка В. В. за об'ємом досліджень, рівнем їх виконання, новизною є завершеною науково-дослідною роботою, в якій одержані нові теоретично обґрунтовані та практично цінні результати.

**Висновок.** Дисертаційна робота Горошка Василя Володимировича на тему «Оптимізація динамічних режимів електричних машин з використанням дробово-інтегральних регуляторів» за рівнем її наукової новизни і практичного значення відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету міністрів України від 6 березня 2019р. №167), а її автор – Горошко Василь Володимирович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, галузь знань 14 Електрична інженерія.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, доцент,

доцент кафедри електромехатроніки та

комп'ютеризованих електромеханічних систем

Національного університету «Львівська політехніка»  Копчак Б.Л.

Підпис Копчака Б.Л. завіряю:

Вчений секретар Національного університету

«Львівська політехніка», к.т.н., доцент



Брилинський Р. Б.