

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Копчака Богдана Любомировича

«Аналіз і синтез електромеханічних систем, які описуються дробовими інтегрально-диференціальними ланками»,

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Актуальність теми. Одним із сучасних напрямів розвитку систем автоматичного керування є системи та керування з дробовим порядком (Fractional Order Systems and Fractional Order Controls). Вони визначаються тим, що, на відміну від стандартних з цілими ступенями, мають дробові значення ступенів при операторах диференціювання, чи інтегрування. Зрозуміло, що з позицій загального математичного аналізу, це є більш загальним випадком представлення операторів, що і підтверджує історія розвитку спеціальних розділів математики.

Вважається, що в технічних галузях основи систем керування з дробовим порядком було закладено в фундаментальних працях I. Podlubny (Fractional-order systems and $PI_{\alpha}D_{\beta}$ -controllers. IEEE Trans. Automatic Control, Vol.44, No.1, pp. 208-214, 1999), а також А. Oustaloup (*La Commande CRONE: Commande Robuste d'Ordre Non Entier*. Editions Herm`es, Paris, 1991).

Починаючи з 2000 років сформувався напрям досліджень, який має секцію на головній світовій конференції з автоматичного керування IEEE CDC (Control and Decision Conference). В 2004 році міжнародна федерація автоматичного керування IFAC організувала перший симпозиум «Фракційне диференціювання та його застосування» (The First IFAC Symposium on Fractional Differentiation and its Applications (FDA04), Bordeaux, France, 2004). В середовищі MATLAB створено Fractional Control Toolbox.

За останнє десятиріччя кількість наукових публікацій цього напрямку автоматичного керування зросла в рази, узагальнення представлені в фундаментальних монографіях і статтях високого рівня таких вчених зі світовим ім'ям, як I. Petras, D. Vinarge, I. Podlubny, Y. Hori, H. Sira Ramirez та інших. Відомі

прикладі успішного застосування систем дробового порядку в багатьох галузях, наприклад, при розгляді процесів у в'язко-еластичних середовищах, процесів дифузії, електромагнітних процесів, в електротехніці та електроніці, біології, економіці, цифровій обробці сигналів, автоматичного керування розподіленими об'єктами, керування електромеханічними системами (ЕМС), керування рухом транспортних засобів та робототехнічних об'єктів. В галузі електромеханіки цей тип керувань вже апробовано в системах з двигунами постійного і змінного струму (синхронних і асинхронних), для керування безщітковими двигунами, гасіння коливань в складних трансмісіях з багатомасовістю.

На цей час розроблено основи математичної терії динамічних систем, які описуються дробовими інтегрально-диференційними рівняннями, методи аналізу і синтезу цих систем з різними типами оптимізації (у просторі стану, частотній області та інші), створена теорія дробових пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів. Спостерігається розповсюдження дробових керувань для нелінійних об'єктів, наприклад, з нелінійностями типу обмеження, люфт, для систем зі змінною структурою, дискретних і інтелектуальних систем. Незважаючи на ці оптимістичні результати, теорія та практика дробових динамічних систем ще знаходиться у стані становлення, має значну кількість невирішених проблем і тому вимагає подальшого розвитку.

Інтерес до систем із дробовим порядком має дві сторони. По-перше, ряд електротехнічних об'єктів керування, а також їх елементів, точніше описуються ланками з дробовим порядком, ніж стандартними ланками. По друге, використання регуляторів з дробовими значеннями порядку диференціювання та інтегрування дає відчутне покращення динамічних та статичних характеристик замкнених систем, а в деяких випадках і робастності, навіть для об'єктів з цілим порядком поліномів їх передаточних функцій.

В Україні теорія систем керування з дробовим порядком не набула розповсюдження. Саме тому дисертаційна робота Б. Л. Копчака, яка присвячена розвитку теорії систем з електротехнічними об'єктами керування, що описуються дробовими інтегрально-диференційними ланками, з метою підвищення статич-

них та динамічних показників, за рахунок врахування їх властивостей дробового порядку при розробці алгоритмів керування, є актуальною та своєчасною.

Дисертаційні дослідження виконані відповідно до планів Національного університету «Львівська політехніка» згідно з завданням держбюджетних робіт «Теоретичні засади створення електромеханотронних перетворювачів та систем» (ДБ „ЕМТП”) (2008-2009 рр., держреєстрація №0108U000337); «Розроблення мехатронних та електромеханічних вузлів легкового транспортного засобів» (ДБ „УМК”) (2010-2011рр., держреєстрація №0110U001107), у яких автор дисертаційної роботи був виконавцем.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні невідомих раніше закономірностей побудови замкнених систем дробового порядку з електромеханічними об'єктами, що дало можливість розвинути теорію аналізу і синтезу ЕМС з підвищеними динамічними показниками і властивостями робастності до параметричних збурень.

На підставі виконаних досліджень в дисертації отримані наступні нові наукові результати:

1. Отримала подальший розвиток теорія апроксимації ЕМС високого порядку дробовими передаточними функціями, які на відміну від загальноприйнятих мають три члени характеристичного полінома, що забезпечує розширення спектру заданих динамічних характеристик таких систем.

2. Розроблено нові бажані форми характеристичного полінома дробового порядку для проведення структурно-параметричного синтезу ЕМС, що поширює кореневі методи саме з цими формами на системи, які описуються ПФ цілого і дробового порядків.

3. Розвинуто метод узагальненого характеристичного полінома для ЕМС дробового порядку за рахунок визначення умов його стійкості, що дало змогу синтезувати дробові регулятори систем, які мають властивості робастності до параметричних збурень.

4. Удосконалено метод обчислення та реалізації зі заданою точністю складових регуляторів дробового порядку за рахунок використання оптимізації

на основі штучного інтелекту (ГА та МРЧ), що забезпечує ефективну реалізацію цих регуляторів в умовах реальних процедур самоналагодження ЕМС.

Практична цінність і ефективність дисертаційної роботи для розвитку електромеханічних систем полягає у створенні теоретичної бази для проектування систем автоматичного керування дробового порядку з підвищеними динамічними показниками і властивостями робастності, розробці технічних і програмних засобів для їх дослідження та практичної реалізації, а також підтверджується актами впровадження її результатів:

1. Розроблене програмне забезпечення для аналізу і синтезу ЕМС дробового порядку забезпечує вищі точність і швидкодію порівняно з існуючими аналогами.

2. Для ЕМС дробового порядку розроблено процедуру самоналагодження за бажаною якістю динамічних процесів, рекомендовано форми дробових передаточних функцій за рахунок чого можливо розширити гамму налаштувань дробових регуляторів.

3. Процедура визначення діапазону зміни параметрів, виходячи з умови стійкості синтезованих ЕМС дробового порядку, дозволяє підвищити робастність системи.

4. Розроблені макетні зразки ПЛДц-регуляторів можуть бути основою для побудови нового покоління промислових ЕМС, в яких реалізовано дробове керування.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи базуються на дослідженнях властивостей замкнених систем автоматичного керування електротехнічними комплексами, які містять ланки з дробовим порядком. Всі виконані в дисертації перетворення, виявлені закономірності та встановлені залежності обґрунтовані відповідними законами теорії автоматичного керування і тому достовірність отриманих в дисертації теоретичних положень і наукових результатів не викликає сумніву.

Основні наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи підтверджуються результатами математичного моделювання та лабораторних випробувань, широким обсягом публікацій.

Повнота викладу результатів досліджень в опублікованих працях. Результати досліджень за темою дисертації викладені в 35 публікаціях. Серед них: 26 статей у фахових наукових виданнях, з яких 6 статей у виданнях, що включені до наукометричних баз даних; 2 матеріали конференцій у виданнях, що включені до наукометричної бази даних Scopus, 1 стаття в закордонному науковому періодичному виданні; 12 праць написано без співавторів. Видано також навчальний посібник (у співавторстві).

Наведений перелік публікацій, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації, у повному обсязі відображають отримані положення, наукові результати та висновки, свідчать про їх новизну.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Дисертація акуратно оформлена і складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку літератури з 171 найменування та 5 додатків обсягом 54 сторінки. Загальний обсяг дисертації становить 418 сторінок, 38 рисунків і 11 таблиць обсягом 34 сторінки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, наведено дані про публікації та апробацію матеріалів дисертації, результати впровадження розроблених систем.

У першому розділі наведені дані розвитку теорії і практичного застосування дробово-інтегрального числення для систем, об'єкти керування яких мають властивості фрактальності. Визначено ряд технологічних процесів, фрактальний аналіз яких наведений у літературних джерелах.

Зроблено загальний висновок про необхідність розв'язання проблеми опису об'єктів керування електромеханічних систем з урахуванням фрактальності технологічних процесів на основі диференціальних рівнянь дробового порядку.

На основі аналітичного огляду сформульовано задачі досліджень дисертації.

У *другому розділі* представлено нові підходи до математичного опису об'єктів керування і регуляторів ЕМС на основі передаточних функцій дробового порядку. Запропоновано застосувати інтелектуальні методи рою частинок (МРЧ) і генетичного алгоритму (ГА) для аналізу та синтезу ЕМС з дробовими ланками.

Було апроксимовано дробовими моделями стандартні передаточні функції (ПФ) біноміальної форми та форми Баттерворта першого-четвертого порядків, а також розроблено алгоритм знаходження ПФ дробового порядку довільних ланок і об'єктів керування ЕМС, для яких відома перехідна функція. Апроксимацію стандартних ПФ цілого порядку ПФ дробового порядку здійснено за використання МРЧ на основі розробленого та програмно реалізованого алгоритму.

Проведено дослідження моделей дробового порядку для апроксимації ПФ високого порядку, знайдених на основі ідентифікації реальних ЕМС. Результати такого аналізу дозволили виробити рекомендації щодо використання певної ланки дробового порядку для апроксимації ланок високого порядку, які характеризуються однаковими динамічними характеристиками. Як приклад об'єкта досліджень вибрано асинхронний генератор із самозбудженням.

Показано, що використання моделей дробового порядку для апроксимації ланок високого порядку має перевагу у порівнянні з традиційними методами пониження порядку ПФ.

Розглянуто проблему апроксимації дробових ПФ цілочисельними для спрощення реалізації регуляторів дробового порядку, які отримуються при синтезі систем, що описуються ПФ дробового порядку.

Для моделювання ланок дробового порядку, зокрема їх реалізації в системах керування реальними об'єктами, автором розроблено власні моделі на основі відомих формул перетворення Оусталоупа. Виконано оцінку точності апроксимації ланок дробового порядку за їх представлення різними моделями в порівнянні з еталонною моделлю, отриманою за перетворенням Лапласа.

Показано, що для реалізації дробових регуляторів перспективними є саме моделі, побудовані на основі методу Оусталоупа.

Третій розділ присвячено розгляду різних варіантів синтезу дробових регуляторів ЕМС на основі використання бажаних дробових варіантів форм характеристичних поліномів, як еталонних при оптимізації контурів систем автоматичного керування.

Виконано аналіз існуючих методів параметричного синтезу регуляторів координат електромеханічних систем, які описуються ПФ дробового порядку.

Встановлено, що за результатом синтезу різноманітних систем, що описуються ПФ дробового порядку, отримуються відповідні регулятори дробового порядку, з яких найбільш поширеним є дробовий ПЛДц-регулятор з 5 параметрами налаштування.

Для забезпечення бажаних динамічних показників ЕМС запропоновано два варіанти представлення дробових передаточних функцій замкненої системи.

Розроблено підхід до синтезу регуляторів з урахуванням особливостей об'єктів керування ЕМС за використанням цих двох бажаних форм дробового порядку, які рекомендуються у випадках, коли необхідно забезпечити задані динамічні властивості координати керування.

Для параметричної оптимізації ЕМС у режимі самоналагодження запропоновано підхід на основі модифікації двох методів: адаптивного керування з еталонною моделлю, який використовує перехідну функцію ЕМС, і методу технологічного переналагодження замкнених систем. В ролі еталонної моделі використовуються бажані дробові форми, а налаштування ПЛДц-регуляторів дробового порядку здійснюється ГА або за допомогою МРЧ. За використання інтелектуальних методів була проведена оптимізація двомасової ЕМС з урахуванням нелінійності реактивного навантаження. Результати проведених досліджень підтвердили ефективність використання регуляторів дробового порядку і, зокрема, ПЛДц-регулятора.

Четвертий розділ присвячено аналізу стійкості ЕМС дробового порядку і розроблено підхід до її забезпечення шляхом створення «обмежувальної зони»

в процесі вибору параметрів дробового регулятора при його робастному синтезі за бажаною якістю перехідного процесу.

На відміну від традиційних систем, які описуються ПФ цілого порядку, стійка система дробового порядку може мати корені в правій половині комплексної площини. Автором розглянуто підхід за використання комплексної wR - площини поверхні Рімана і обґрунтовано застосування інформативного параметра для оцінки стійкості, в якості якого обрана абсолютна фаза найменшого за модулем кореня полінома на цій площині.

Запропоновано оцінювати ступінь впливу на стійкість систем дробового порядку окремих параметрів у різних діапазонах їх зміни і, відповідно, коректувати допустимі межі цих діапазонів. Розглянутий підхід до аналізу стійкості придатний для ЕМС, які описуються передавальними функціями як дробового, так і цілого порядку. Показано, що запропонована процедура визначення стійкості для ЕМС, які описуються ПФ дробового порядку, дає змогу реалізувати алгоритм пошуку діапазону зміни її параметрів, при якому забезпечується режим стійкості.

Для вирішення задач параметричного синтезу автором застосовано методи ГА та МРЧ на основі результатів досліджень, наведених у попередніх розділах дисертації. Для порівняння запропонованого варіанту синтезу ЕМС з урахуванням умов її робастності з варіантом без врахування робастності, проведено дослідження обох варіантів для контуру струму тиристорного компенсатора реактивної потужності, яке підтвердило ефективність розробленого методу.

У *п'ятому розділі* розроблено цифровий інтегрально-диференціальний регулятор дробового порядку, який може використовуватись для керування технологічними координатами ЕМС. На основі попередньо розробленої і відлагодженої програми в середовищі MATLAB було реалізовано регулятор дробового порядку на основі лабораторних плат Arduino Mega 2560 та Arduino DUE. Тестування дробових регуляторів показало їх задовільну точність. Для подальшої промислової реалізації регуляторів використано контролер на 32-розрядному процесорі ARM STM32F407VG.

Проведені дослідження показали високу адекватність варіантів практичної реалізації інтегральної/диференціальної моделі дробового порядку за використання перетворення Оусталоупа та побудови на її основі ПЛ-регулятора дробового порядку. В подальшому було реалізовано ПЛД-регулятора дробового порядку, працездатність якого перевірено експериментально.

Виконано ряд тестів для ідентифікації параметрів розімкненої системи асинхронний двигун-перетворювач, а також замкненої системи регулювання кутової швидкості з розробленими регуляторами.

Текст дисертації викладено грамотною технічною мовою, логічно і послідовно. Стиль викладання системний і доказовий.

В цілому дисертація є закінченою науковою роботою, що відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації.

В дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук не виносяться на захист положення та наукові результати, які були захищені здобувачем у кандидатській дисертації.

Недоліки та зауваження по роботі.

1. Актуальність роботи не викликає сумнівів, але спосіб в який автор її доводив не є бездоганним, що дуже важливо для нових напрямів досліджень, стосовно яких є великі сподівання і в той же час у багатьох вчених значний скепсис. Це особливо важливо для обґрунтування об'єктів досліджень. В галузі фрактального керування вже існують загальновизначені об'єкти, для яких це доведено, в тому числі, досвідом практичного впровадження. Стосовно ЕМС також існує певний досвід, який представлено в десятках публікацій не тільки конференцій, але і в журналах високого рівня, де розглянуто фрактальне керування ЕМС з двигунами постійного і змінного струму (синхронних, асинхронних), наприклад: G. Sun, Z. Ma and J. Yu, "Discrete-time Fractional Order Terminal Sliding Mode Tracking Control for Linear Motor," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1. doi: 10.1109/TIE.2017.2748045; W. Yu, Y. Luo, Y. Chen and Y. Pi, "Frequency

domain modelling and control of fractional-order system for permanent magnet synchronous motor velocity servo system," in *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 2, pp. 136-143, 19 2016. doi: 10.1049/iet-cta.2014.1296; M. H. Khooban, M. ShaSadeghi, T. Niknam and F. Blaabjerg, "Analysis, control and design of speed control of electric vehicles delayed model: multi-objective fuzzy fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller," in *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 249-261, 5 2017; S. Zheng, X. Tang and B. Song, "Tuning strategy of fractional-order proportional integral controllers for permanent magnet synchronous motor servo system based on enhanced stochastic multi-parameters divergence-based optimisation algorithm," in *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 11, pp. 1240-1249, 7 18 2016. doi: 10.1049/iet-cta.2015.0922; V. Badri and M. S. Tavazoei, "Some Analytical Results on Tuning Fractional-Order [Proportional-Integral] Controllers for Fractional-Order Systems," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 1059-1066, May 2016. doi: 10.1109/TCST.2015.2462739; R. Duma, P. Dobra and M. Trusca, "Embedded application of fractional order control," in *Electronics Letters*, vol. 48, no. 24, pp. 1526-1528, November 22 2012. doi: 10.1049/el.2012.1829; B. T. Zhang and Y. Pi, "Robust fractional order proportion-plus-differential controller based on fuzzy inference for permanent magnet synchronous motor," in *IET Control Theory & Applications*, vol. 6, no. 6, pp. 829-837, April 12 2012. doi: 10.1049/iet-cta.2011.0412; K. Erenturk, "Fractional-Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3806-3813, Sept. 2013. doi: 10.1109/TIE.2012.2207660. Усі ці посилання отримуються дуже швидко в IEEE xplore по запиту "fractional control motor".

В той же час в дисертації прямих посилань на керування в ЕМС обмаль, натомість по тексту даються посилання про розгляд ЕМС в загальнотеоретичних джерелах [46] (стор. 32), [68] (стор. 34) та інших, хоча опонент цього не знайшов. Мабуть автор мав на увазі, що теоретичні результати, які наведені в цих посиланнях, можуть використовуватись в ЕМС.

2. Формулювання наукової новизни не відповідає формальним вимогам щодо структури, згідно з якими вказується суть, за рахунок чого досягнуто, та чим результат відрізняється від існуючих.

3. По тексту дисертації та автореферату використовується термін “on-line”, тобто в реальному часі, що передбачає ідентифікацію або адаптацію під час функціонування системи, а саме при регулюванні координат. Більш коректно говорити про налаштування, яке відоме як “self commissioning”. У випадку адаптивного автоналаштування в режимі “on-line” було б необхідно досліджувати стійкість нелінійної системи на рис. 3.11.

4. Розроблені регулятори мають інтегральну складову, чи розглядалася для них обов’язкова процедура “anti windup”?

5. Не надано пояснень, чому в другому розділі обрано апроксимацію лише типових ланок з сильно демпфованими полюсами, а що буде у випадку мало демпфованих полюсів, а особливо коли є “швидкі” і “повільні” полюси.

6. Підхід до самоналагодження, запропонований в підрозділі 3.5, в наданому вигляді не може бути напряму застосований в реальних векторно-керованих асинхронних електроприводах, оскільки не враховує принципові властивості структури систем полеорієнтованого векторного керування в частині послідовності операцій керування, обов’язкових обмежень керуючих напруг, струмів і поведінки асинхронного двигуна як нелінійного об’єкта керування. Керуючі дії в таких системах не є стрибкоподібними для запобігання обмежень, які можуть призводити не тільки до втрати полеорієнтування, але й виникнення початкових умов у суттєво нелінійному багатовимірному об’єкті, розгляд якого не передбачено в роботі. Можливо, що запропонований результат можна розглядати як додаток до існуючих систем самоналаштування і використовувати їх на завершальній стадії ініціалізації системи. Але це має бути доведено з урахуванням поведінки внутрішніх сигналів і дії моменту збурення, який взагалі не розглядається в роботі.

7. Автор виконав великий обсяг роботи по експериментальній перевірці своїх теоретичних результатів і це заслуговує на повагу, добре розуміючи наскільки це складний етап досліджень. Але методика проведення експеримента-

льних досліджень і те, як вони представлені, не дає можливості повноцінно оцінити їх результати. Використання перетворювача і внутрішньої системи керування “втемну” унеможливорює аналіз результатів, що отримані. Яке було керування поза межами контура регулювання швидкості? Векторне чи скалярне і яке саме. Послідовність і метод керування внутрішніми координатами двигуна: потокозчепленням, моментом, струмами? Жодна з вказаних внутрішніх координат і змінних (наприклад, напруги статора) не наведені на графіках перехідних процесів. За цих умов неможливо встановити коректність і ефективність роботи системи. Для порівняння, до наведених графіків перехідних процесів можна відмітити, що стандартна система векторного полеорієнтованого керування зі стандартним ПІ регулятором і задатчиком інтенсивності, для двигунів такої потужності, як у тестах, за умови обмеження моменту на рівні подвійного номінального, забезпечить відпрацювання кутової швидкості за час до 0.2 с. Оскільки більшість результатів роботи складно перевірити, тому що вони є результатами моделювання, а не аналітичних доведень, то результати експериментальних тестів і їх моделювання було б саме таким вагомим підтвердженням і значно підсилило роботу.

8. В роботі не достатньо ясно пояснено, чи потрібно в реальному контролері використання MATLAB програм оптимізації для реалізації МРЧ та ГА. Як це робиться ?

9. В авторефераті не вказано, які з публікацій фахові, які у виданнях, що включені до наукометричних баз даних і бази даних Scopus.

10. Матеріал дисертації представлено системно, текст дисертації добре оформлено відповідно до існуючих вимог. Але зустрічаються невдалі вислови, наприклад “нелінійність перехідної функції”, “швидкодія регуляторів”, “керування технологічними характеристиками”, а не “керування технологічними координатами”. На Рис. 2.48 відсутнє позначення часу, для деяких аббревіатур не надано розшифровки.

11. Не надано інформації по використанню результатів роботи у навчальному процесі.

Зроблені зауваження не впливають на загальну високу позитивну оцінку роботи.

Висновок. Дисертаційна робота Копчака Богдана Любомировича «Аналіз і синтез електромеханічних систем, які описуються дробовими інтегрально-диференційними ланками» є завершеною працею, в якій вирішена актуальна проблема розвитку теорії систем автоматичного керування з дробовими ступенями для класу електромеханічних систем з підвищеними динамічними показниками. За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертаційна робота відповідає вимогам, які ставляться до докторських дисертацій, а за змістом поданого в ній матеріалу – паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9,10,12 “Порядку присудження наукових ступенів”, а її автор Копчак Богдан Любомирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри автоматизації
електромеханічних систем та електроприводу
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського»

С. М. Пересада

Підпис професора Пересади С. М. засвідчую.



Вчений секретар НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського " А.А. Мельниченко