

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Козловський Андрій Володимирович**

УДК 621.313.333.004.5

**РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ  
СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПУСКОВОГО  
МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ МАЛОЇ ТА  
СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ**

*Спеціальність: 05.11.16 – Інформаційно-вимірювальні системи*

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2000

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому державному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

*Науковий керівник:* доктор технічних наук, професор,  
**Мокін Борис Іванович**,  
Вінницький державний технічний університет, за-  
відувач кафедри “Електромеханічні системи авто-  
матизації”

*Офіційні опоненти:* доктор технічних наук, професор,  
**Ціделко Владислав Дмитрович**,  
Національний технічний університет України  
“КПІ”, завідувач кафедри “Інформаційно-  
вимірювальна техніка”

кандидат технічних наук,  
**Кучерук Володимир Юрійович**,  
Вінницький державний технічний університет, до-  
цент кафедри “Метрологія та промислова автома-  
тика”

Провідна установа: Державний університет “Львівська політехніка”, кафедра  
“Інформаційно-вимірювальна техніка”, Міністерства освіти і науки України,  
м. Львів.

Захист відбудеться **27 жовтня 2000** року о **9:30** годині на засіданні спеціалізо-  
ваної вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому державному технічному універ-  
ситеті за адресою 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького державного  
технічного університету за адресою 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий **31 серпня 2000** року.

*Вчений секретар*  
*спеціалізованої вченої ради*

**Павлов С.В.**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проведення випробувань електричних двигунів (ЕД) необхідне на усіх етапах їх виготовлення та після ремонтного обслуговування. Програма випробування ЕД містить два основні досліді: дослід “холостого ходу” (ХХ) та дослід “короткого замикання” (КЗ). Дослід КЗ дозволяє визначати одну з найважливіших експлуатаційних характеристик ЕД – пусковий момент  $M_{п}$ . Пусковий момент ЕД залежить від конструктивного виконання двигуна, технології виготовлення та багатьох інших чинників, тому не може бути теоретично розрахований і потребує прямого вимірювання.

Визначення пускового моменту дуже трудомістка і складна вимірювальна процедура, яка потребує вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$ , визначення мінімального пускового моменту  $M_{\min}$  і кута, що йому відповідає, та вимірювання в цьому кутовому положенні залежності  $M_{п} = f(U_{к})$ , де  $\alpha$  – кут повороту ротора ЕД відносно статора, а  $U_{к}$  – напруга живлення ЕД. За таких умов реалізувати засіб вимірювання (ЗВ) пускового моменту можливо лише у вигляді інформаційно-вимірювальної системи (ІВС).

Основна проблема в тому, що відомі методи та автоматизовані засоби вимірювання  $M_{п}$  характеризуються невисокою точністю (1,5%) в зв'язку з тим, що має місце методична похибка, яка виникає за рахунок повільного обертання ротора об'єкта вимірювання (ОВ) під час вимірювання  $M_{п}$  (порушення умови виконання досліді КЗ), та значна інструментальна похибка, яка зумовлена методологією вимірювання  $M_{п}$  на корпусі приводного двигуна, що, у свою чергу, не дозволяє якісно сертифікувати вироблені двигуни та здійснювати відбраковку ЕД на електротехнічних підприємствах.

Тому автоматизація визначення, підвищення точності вимірювання  $M_{п}$  електричних двигунів та створення нових автоматизованих засобів, призначених для цього, є важливим та актуальним завданням. Особливо актуально стоїть питання вимірювання  $M_{п}$  електричних двигунів малої та середньої потужності, які широко використовуються у побутовій техніці, периферійних пристроях, різноманітних системах позиціонування, керування тощо, де габаритні розміри електричного двигуна та електрична енергія, яка ним споживається, відіграють важливу роль. Підвищення точності визначення пускового моменту має виняткове значення для електротехнічних підприємств, де технологічний процес виготовлення двигунів не досконалий, і тому для якісної сертифікації двигунів (потреба сьогодення) необхідно визначати пусковий момент кожного двигуна окремо.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 1995 – 2000

років. Протягом 1995 – 1997 років дослідження та наукові розробки проводились з метою написання магістерської дисертації здобувача, котра була захищена восени 1997 року. Протягом 1997 – 2000 років науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку кафедри та, у ролі виконавця, за держбюджетною темою № 84–Д–196, номер державної реєстрації 0198U004497.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка ІВС для визначення пускового моменту електричних двигунів малої та середньої потужності на основі торсіонного первинного вимірювального перетворювача з більш високою точністю, порівняно з відомими засобами вимірювання пускового моменту. Об'єктом дослідження є електричний асинхронний двигун (АД) малої та середньої потужності, а предметом дослідження є визначення пускового моменту об'єкта дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Зробити огляд існуючих вимірювальних каналів пускового моменту (ВКПМ). Виділити причини невисокої точності визначення  $M_{\text{п}}$  та визначитись з перспективними напрямками вирішення цієї задачі.
2. Вдосконалити метод визначення пускового моменту, розробити нову структурну схему ВКПМ, який дозволить вимірювати залежності  $M_{\text{п}} = f(\alpha)$  і  $M_{\text{п}} = f(U_{\text{к}})$ , та його математичну модель.
3. Розробити математичну модель вимірювального каналу пускового моменту для динамічного та статичного режимів роботи, а також отримати аналітичні залежності для параметрів цих режимів.
4. Проаналізувати впливні величини та їх функції впливу на результат вимірювання пускового моменту, визначити домінуючі складові похибки, знайти закон розподілу загальної похибки вимірювання пускового моменту та розрахувати вірогідність контролю.
5. Розробити первинний вимірювальний перетворювач типу “момент – напруга”, який забезпечить високу точність і швидкість перетворення.
6. Розробити ІВС для визначення  $M_{\text{п}}$  на базі мікропроцесорного пристрою та програмне забезпечення до нього, що дозволить виконувати вимірювання пускового моменту електродвигунів в автоматизованому режимі.
7. Розробити методику проектування запропонованої ІВС визначення пускового моменту ЕД та вдосконалити задавач зразкового моменту (ЗЗМ) для метрологічної атестації.
8. Провести експериментальні дослідження розробленої ІВС визначення пускового моменту та об'єкта вимірювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертаційній роботі одержані такі наукові результати:

1. Вдосконалено метод визначення пускового моменту, який відрізняється тим, що для безпосереднього вимірювання інформативного параметра у місці його виникнення застосовано торсіонний сенсор, а для вилучення методичної похибки – покроковий режим роботи приводного двигуна. Доведено, що точність вимірювання пускового моменту у запропонованій інформаційно-вимірювальній системі в 2 – 3 рази перевищує точність відомих.
2. Вперше розроблено математичну модель вимірювального каналу пускового моменту від кутового положення ротора з безпосереднім вимірюванням моменту на роторі об'єкта і описано процес руху рухомої частини вимірювального каналу системою нелінійних диференціальних рівнянь. Встановлено, що запропонована модель адекватно відтворює фізичні процеси, що протікають у вимірювальному каналі з торсіонним сенсором, як в статичному, так і в динамічному режимах його роботи.
3. Вперше одержано аналітичні залежності для визначення тривалості перехідного процесу для динамічного і функцію перетворення для статичного режимів роботи вимірювального каналу залежностей пускового моменту від кута повороту ротора і напруги живлення з торсіонним сенсором. Показано, що тривалість перехідного процесу під час вимірювання пускового моменту електричних двигунів малої та середньої потужності, розрахована за цими залежностями, забезпечує максимальну кількість вимірювань за один повний оберт ротора.
4. Оцінено функції чутливості впливних величин на результати вимірювання пускового моменту. Виділено три основні складові (похибка аналогоцифрового перетворення, похибка перетворення змінної напруги у постійну, похибка від дії інших впливів) і показано, що вони мають випадковий характер. Знайдено композицію законів розподілу для даних випадкових похибок, що дозволяє розрахувати показники вірогідності контролю мінімального пускового моменту.

**Практичне значення одержаних результатів.** Використання одержаних в роботі результатів дозволило розробити і впровадити як експериментальний зразок ІВС для визначення  $M_{п}$  електродвигунів малої та середньої потужності, яка забезпечує вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  та  $M_{п} = f(U_{к})$  з високою точністю (максимальна зведена похибка 0,5 %), швидкодією (загальний час проведення вимірювань не перевищує 10 секунд) та достатньою кількістю виміряних значень за один повний оберт ротора об'єкта вимірювання (від 60 до 120 вимірювань). Це дозволить випробувувати на виробництві не один двигун з партії, а кожний, що у свою чергу значно зменшить ризик використання неякісних двигунів замовниками та дозволить виробнику

двигунів без змін в технології виготовлення двигунів здійснювати їх якісну сертифікацію. В роботі запропоновано методики метрологічної атестації та проектування розробленої інформаційно-вимірювальної системи, удосконалено загальний алгоритм вимірювання пускового моменту.

Одержані практичні результати впроваджено на підприємстві “Паллар” (м. Вінниця). Результати, які стосуються побудови комп’ютерних вимірювальних каналів, впроваджено в навчальний процес у лабораторії вимірювальної техніки на кафедрі метрології та промислової автоматики ВДТУ для підготовки інженерних кадрів. Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних та регіональних конференціях, а саме: Республіканська науково-методична конференція “Нові технології підготовки спеціалістів з вищою освітою за треступеневою системою “бакалавр–інженер–магістр” (ВДТУ, Вінниця, 1995); XXV НТК професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВДТУ (Вінниця, 1996); XXVI НТК професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВДТУ (Вінниця, 1997); 1-й Міжнародний молодіжний форум “Електроніка и молодежь в XXI веке” (Харьков, 1997); Міжнародная НТК “Приборостроение–97” (Винница–Симеиз, 1997); Міжнародний симпозиум “Наука и предпринимательство” (Винница–Львов, 1998); Міжнародная НТК “Приборостроение–98” (Винница–Симферополь, 1998); Міжнародний симпозиум “Наука и предпринимательство” (Винница–Львов, 1999); 5-та Міжнародна НТК “Контроль і управління в складних системах” (КУСС–99, Вінниця, 1999); XXIX НТК професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету (ВДТУ, Вінниця, 2000). Результати роботи також доповідались на семінарах кафедри “Електромеханічні системи автоматизації” Вінницького державного технічного університету (ВДТУ).

**Публікації.** Основний зміст роботи опублікований у 12 друкованих працях, в тому числі 4 статті у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України, 5 статей у збірках праць науково-технічних конференцій різного рівня, 1 рішення про видачу патенту України на винахід, тези 2 доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, основних висновків по роботі, списку використаних джерел (105 бібліографічних посилань, 9 сторінок) та 6 додатків (42 сторінки). Загальний обсяг дисертації, в якому викладено основний зміст, складає 145 сторінок і містить 40 рисунків, 13 таблиць. Повний обсяг дисертації – 200 сторінок.

Автор вважає своїм обов'язком висловити щире подяку професору кафедри метрології та промислової автоматики Вінницького державного технічного університету, доктору технічних наук, Василю Васильовичу Кухарчуку за допомогу у виконанні досліджень, обговоренні та оформленні результатів дисертації.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У *вступі* дана загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність теми, сформульована мета досліджень, дана характеристика наукової новизни та практичної цінності одержаних результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, оцінено особистий внесок здобувача.

У *першому розділі* розглянуто сучасний стан вітчизняних та зарубіжних досліджень ІВС механічних характеристик ЕД. Встановлено, що питання про вимірювання пускового моменту практично не досліджується в існуючих розробках, а відомі автоматизовані засоби для здійснення цього вимірювального експерименту мають невисоку точність (1,5%), що не дозволяє якісно сертифікувати та відбракувати вироблені на підприємствах двигуни.

Розглянуто особливості визначення пускового моменту ЕД у досліді КЗ, серед яких виявлено ті, що порушуються у відомих засобах і зумовлюють їх невисоку точність. Враховуючи умови проведення дослідів КЗ та принципи побудови ІВС, узагальнена

структурна схема ІВС для вимірювання пускового моменту наведена на рис. 1. Складовими елементами якої є: ЕВН – електронний варіатор напруги; ОВ – об'єкт вимірювання; ВКН – вимірювальний канал напруги; ВККП – вимірювальний канал кутового положення; ВКПМ – вимірювальний канал пускового моменту; МПК – мікропроцесорний контролер; ПЕОМ – персональний комп'ютер.

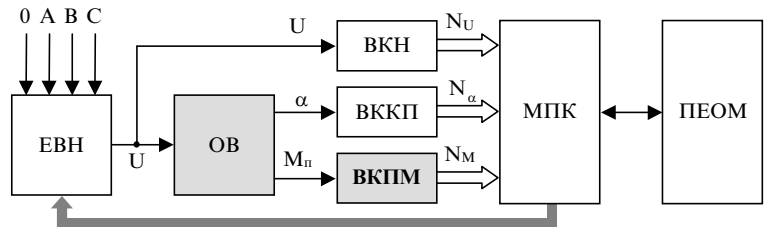


Рис. 1. Узагальнена структурна схема ІВС для вимірювання пускового моменту

Найсуттєвішим елементом в наведеній на структурній схемі ІВС є ВКПМ, від якості реалізації якого залежить точність і швидкість вимірювання пускового моменту ОВ.

Доповнено відому класифікацію вимірювальних каналів пускового моменту новими класифікаційними ознаками та за допомогою якісного критерію визначається напрямок розробки нових більш точних засобів вимірювання пускового моменту, сформульовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі розроблено теоретичні засади вимірювання пускового моменту ЕД, які покладено в основу побудови нових ЗВ. Щоб виключити методичну похибку ЗВ пускового моменту, яка виникає через те, що ротор ОВ повільно обертається в момент вимірювання  $M_{п}$ , пропонується використати в ролі приводного двигуна (ПД) кроковий двигун (КД), який забезпечує у стійких кутових положеннях скочвання  $S = 1$ . Для зменшення інерційної маси, яка обертається разом з ротором ОВ, пропонується використати в ролі первинного вимірювального перетворювача (ПВП) торсіонний сенсор (ТС). Тобто вдосконалено метод визначення  $M_{п}$ , який відрізняється від відомих тим, що для безпосереднього вимірювання інформативного параметра у місці його виникнення застосовано ТС, а для вилучення методичної похибки – по-

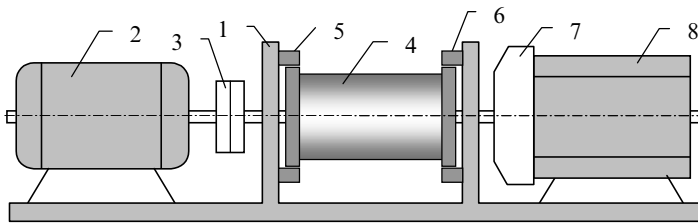


Рис. 2. Конструктивна схема перетворювача  $M_{п}$

кроковий режим роботи ПД. У зв'язку з цим, конструктивна схема нового перетворювача пускового моменту наведена на рис. 2. Складові елементи такі: на станині – 1 жорстко закріплені ОВ – 2 та ПД – 8; ротор ОВ

через муфту спряження (МС) – 3 з'єднаний з лівим торцем торсіону – 4; ротор КД через хвильовий редуктор (ХР) – 7 з'єднаний з правим торцем торсіону – 4; з лівого та правого торців торсіону – 4 закріплені трансформаторні перетворювачі (ТП) – 5 та 6 відповідно, які підключені за диференціальною схемою. Торсіон – 4 та трансформаторні перетворювачі – 5 та 6 разом утворюють ТС з електричним інформативним вихідним сигналом.

Використання ТС дозволяє вимірювати  $M_{п}$  у місці його виникнення і тим самим зменшує коло вимірювального перетворення та інерційну масу, що обертається з ротором ОВ. За рахунок цього зменшується час заспокоєння рухомої частини перетворювача пускового моменту і зростає швидкодія. Використання КД дозволяє врахувати умову досліду КЗ ( $S = 1$ ), що, у свою чергу, дозволяє підвищити точність визначання  $M_{п}$ .

В роботі розроблена математична модель запропонованого ВКПМ, яка описує роботу каналу для двох етапів досліду КЗ: вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  та залежності  $M_{п} = f(U_{к})$ .

Математичною моделлю КД обрано відому нелінійну модель, адекватність якої доведено у дисертації. Торсіонним сенсором обрано торсіон типу “телескопічний вал”, який має найменші геометричні розміри серед інших типів торсіонів при однаковій статичній характеристиці. Виходячи з обраних математичних моделей пропонується така модель ВКПМ:



$$\begin{cases} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_a \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_b \sin(p(\theta - \lambda)) = 0; \\ V - r \cdot i_a - L \cdot \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0; \\ V - r \cdot i_b - L \cdot \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0; \\ M_{em}(t) = nN_r \Phi_m \cdot [i_a(t) \cdot \sin(N_r \cdot \theta(t)) + i_b(t) \cdot \cos(N_r \cdot \theta(t))]; \\ J^* \cdot \frac{d\omega_p(t)}{dt} = i^* \cdot [M_{em}(t) - M_p^*(t)], \end{cases} \quad (1)$$

де  $M_{em}(t)$  – електромагнітний момент КД;  $M_p^*(t)$  – момент на вихідному валі ХР;  $J^*$  – зведений момент інерції рухомої частини ВКПМ;  $i^*$  – передаточне число ХР; перші чотири рівняння – математична модель КД.

Сумарний момент, який закручує торсіонний сенсор,  $M_{\Pi}(t)$  визначається за такою формулою:

$$M_{\Pi}(t) = M_{em}(t) \cdot i^* \cdot \eta + M_{\Pi_{ов}}(t) + M_{мс}(t), \quad (2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії редуктора;  $M_{мс}(t)$  – момент, який створює МС;  $M_{\Pi_{ов}}(t)$  – пусковий момент ОВ, який визначається за відомою формулою

$$M_{\Pi_{ов}}(t) = k \cdot U_{кн}^2 \cdot [a \cdot \sin(\omega_1 t) + b \cdot \cos(\omega_2 t)], \quad (3)$$

де  $k$  – постійна з формули Клосса,  $U_{кн}$  – напруга живлення ОВ,  $a$ ,  $b$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – параметри, які залежать від конструкції двигуна.

Оскільки математична модель ВКПМ (1) є системою нелінійних диференціальних рівнянь, яку неможливо розв'язати аналітично, для моделювання використано середовище символічної математики Maple V5. Розв'язок системи (1) отримано чисельним багатокроковим методом Гіра і з урахуванням (2) та (3) залежність сумарного моменту на ТС від часу на одному кроці ПД при вимірюванні залежності  $M_{\Pi} = f(\alpha)$  представлено на рис. 3. Аналіз даної залежності показує, що у проміжок часу, коли виконується позиціонування КД у нове кутове положення ( $t_{засп} = 0,06$  секунди), момент на ТС досить значний. Необхідно зачекати, поки закінчиться перехідний процес у КД, а потім виконувати вимірювання  $M_{\Pi}$ . Доведено, що відносна похибка запропонованої моделі не перевищує 7...8%.

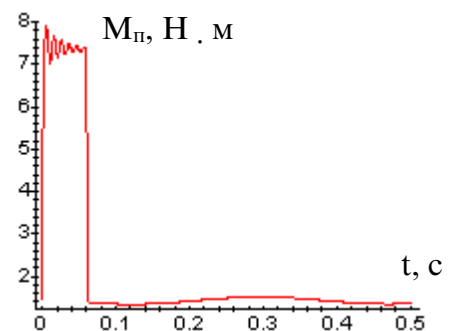


Рис. 3. Залежність  $M_{\Pi}$  від часу

На етапі вимірювання залежності  $M_{\Pi} = f(U_k)$  у кутовому положенні з  $M_{min}$  динаміку руху ТС описує таке диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2 \cdot \varphi = \frac{1}{J^*} \cdot (k \cdot U_{\text{кн}}^2 + A), \quad (4)$$

де  $\omega^2 = C/J^*$  – власна частота вільних коливань;  $\varepsilon = P/(2\sqrt{J^* \cdot C})$  – ступінь за-  
 спокоєння вільних коливань;  $A = \sqrt{a^2 + b^2}$  – коефіцієнт, який залежить від  
 параметрів ОВ;  $C$  – жорсткість торсіону. Аналітичний розв’язок (4) представ-  
 ляє собою залежність кута закручування торсіону  $\varphi$  від часу

$$\varphi(t) = \frac{k \cdot U_{\text{кн}}^2 + A}{C} \cdot \left\{ 1 - e^{-\varepsilon\omega t} \cdot \left[ \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) + \cos(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) \right] \right\}. \quad (5)$$

Рівняння (5) дає змогу побудувати та проаналізувати залежність кута  
 закручування торсіону від часу та напруги живлення ОВ, яку представлено на

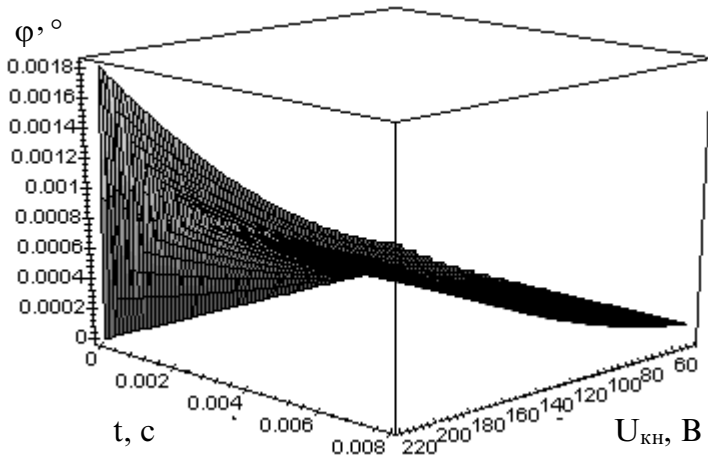


Рис. 4. Залежність  $\varphi$  від  $t$  та  $U_{\text{кн}}$

рис. 4. З аналізу видно, що час  
 заспокоєння торсіону не пере-  
 вищує 0,006...0,007 секунди при  
 живленні ОВ напругою від 50 до  
 220 В. У деяких випадках мож-  
 ливе випробовування ОВ на  
 зниженій напрузі, що дає змогу  
 суттєво зменшити час заспоко-  
 єння торсіону. Суттєвим пара-  
 метром, що характеризує інер-  
 ційні властивості запропонова-

ного вимірювального каналу, є час перехідного процесу, який виникає у ру-  
 хомій частині вимірювального перетворювача. Цей час заспокоєння  $t_{\text{засп}}$  буде  
 впливати як на кількість кутових положень, де вимірюється пусковий момент,  
 так і на результати вимірювань мінімального пускового моменту. Вперше  
 отримані аналітичні залежності, які дозволяють знайти  $t_{\text{засп}}$  у вигляді наступ-  
 ної розрахункової послідовності:

$$\begin{cases} \gamma = \arctg\left(\frac{\omega \cdot \sqrt{1-\varepsilon^2}}{1 + \varepsilon \cdot \omega}\right); \\ \Downarrow t_0 = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \left(\arctg\frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon} - \gamma\right); \\ a_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \cdot e^{-\varepsilon\omega t_0}; \\ X_i = a_0 \cdot e^{-\frac{\varepsilon\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}i} \cdot (-1)^i \cdot \sin(\omega\sqrt{1-\varepsilon^2} \cdot t_0 + \gamma), i = 0 \dots \infty, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\gamma$ ,  $t_0$ ,  $a_0$  – проміжні змінні;  $X_i$  – найбільші (амплітудні) значення перехідного процесу. Якщо  $\delta_{\text{засп}}$  – це нормоване значення відносної похибки, то час заспокоєння рухомої частини визначається за такою формулою:

$$t_{\text{засп}} = T_1 \cdot i \left[ |X_i| \leq M \cdot \frac{\delta_{\text{засп}}}{100\%}, i=0 \dots \infty \right], \quad T_1 = \frac{2\pi}{\omega} \cdot (1 - \varepsilon^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

де  $i$  – номер періоду згасаючих коливань, коли крива перехідного процесу не перевищує межі нормованої похибки. Це дозволить побудувати ІВС, в якій обмежений час досліду КЗ буде використано без втрат.

**У третьому розділі** розроблені структурна схема побудови ІВС для визначення пускового моменту на базі мікропроцесорного засобу (див. рис. 5)

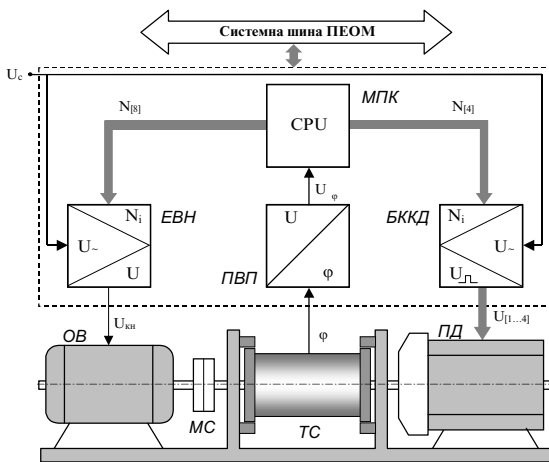


Рис. 5. Структурна схема ІВС

та її складові елементи. Принцип її дії наступний. На ОВ подається номінальна напруга живлення. Керуючий сигнал від МПК переводить КД у наступне кутове положення  $\alpha$ . Під впливом моментів ТС деформується – закручується на деякий кут  $\varphi$ . Зачекавши деякий час (час заспокоєння КД та ТС), вимірюють значення  $M_{\text{п}}$  та реєструють кутове положення ротора ОВ. Потім весь наведений алгоритм повторюється знову, поки КД не зробить

один повний оберт ротора ОВ. Далі визначають  $M_{\text{min}}$  та кут, що йому відповідає, і встановлюють ротор ОВ в це кутове положення. Потім вимірюють залежність  $M_{\text{п}} = f(U_{\text{к}})$ , змінюючи напругу живлення ОВ за допомогою ЕВН.

Суттєвим елементом ІВС є ПВП, в ролі якого пропонується використати торсіонний сенсор типу “телескопічний вал” разом з двома однаковими перетворювачами кута повороту, конструкція якого наведена на рис. 6. Перетворювач містить у собі такі складові елементи: торсіонний сенсор – 1, до якого з двох боків жорстко закріплено вали – 2, пружні властивості яких набагато перевищують пружні властивості матеріалу, з якого виготовлено торсіон; на валах 2 жорстко закріплені циліндричні феромагнітні осердя – 3, а на

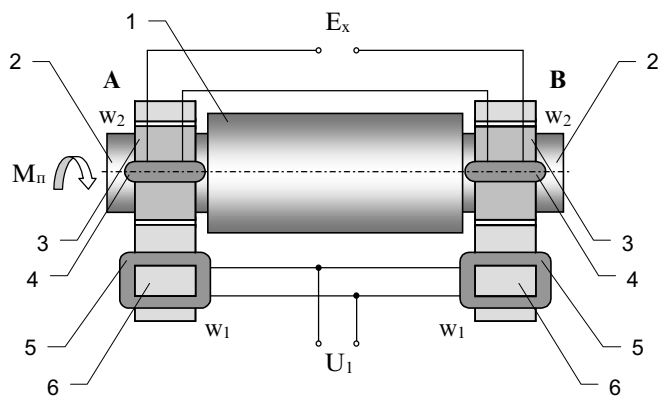


Рис. 6. ПВП пускового моменту в напругу

них, крізь монтажні отвори у валах змонтовані вторинні обмотки – 4 з кількістю витків  $w_2$ ; вторинні обмотки 4 знаходяться в середині магнітопроводів – 6, у нижніх частинах яких змонтовані первинні обмотки збудження – 5 з кількістю витків  $w_1$ . Статична характеристика наведеного ПВП лінійна, а рівняння перетворення має такий вигляд:

$$E_x = M_\Sigma \cdot \left( \frac{4 \cdot l_T \cdot w_2 \cdot U_1}{G \cdot \pi^2 \cdot w_1} \right) \cdot \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{(R_{iT}^4 - r_{iT}^4)}, \quad (8)$$

де  $E_x$  – вихідна напруга ПВП;  $M_\Sigma$  – сумарний момент на ТС;  $U_1$  – напруга живлення ПВП;  $l_T$ ,  $G$ ,  $N_B$ ,  $R_{iT}$ ,  $r_{iT}$  – параметри торсіонного сенсора.

Також у цьому розділі розраховані часові характеристики вимірювального перетворення та розроблені узагальнений алгоритм функціонування ІВС, алгоритми етапів проведення дослідів КЗ.

У четвертому розділі досліджено метрологічні характеристики ІВС, оцінено впливні величини на результат вимірювання  $M_n$  та функції їх впливу. Взагалі, сумарна похибка вимірювання  $M_n$  – це функція від багатьох змінних  $\delta_\Sigma = f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$ . За результатами аналізу впливних величин виділено три,

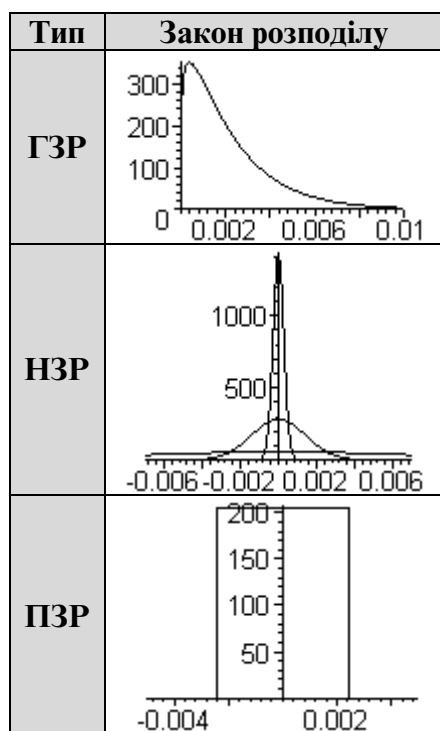
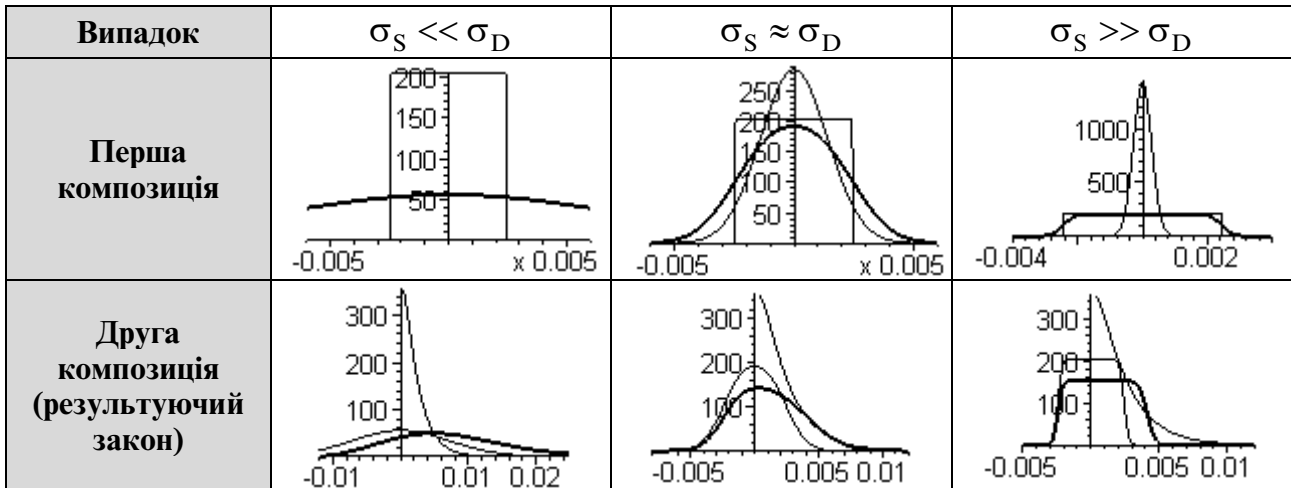


Рис. 7. Закони розподілу складових похибок

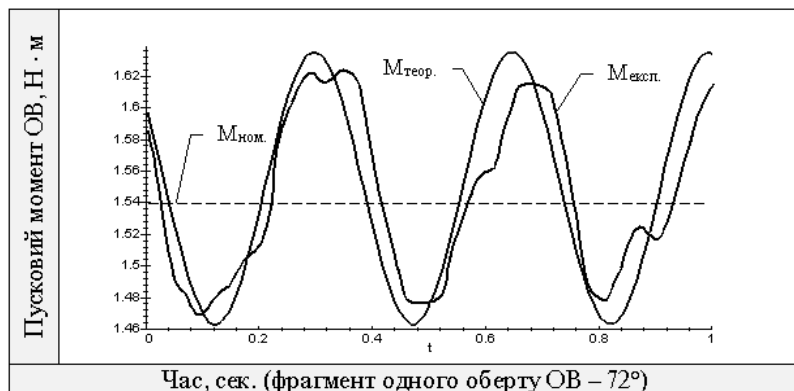
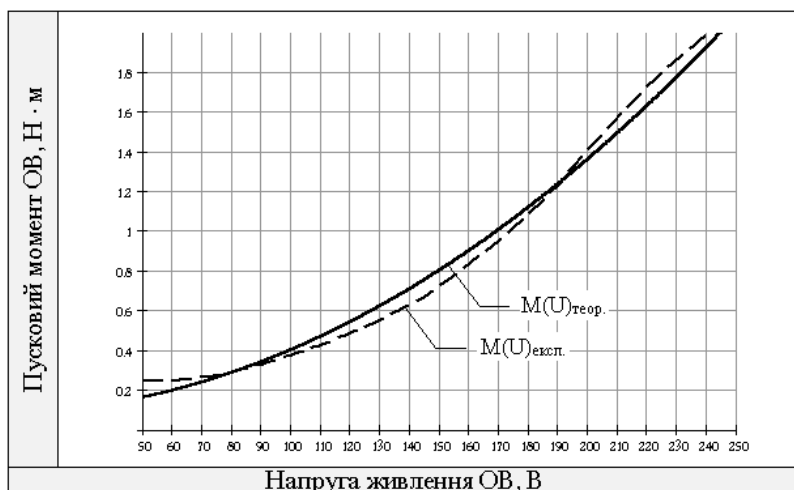
які суттєво впливають на результат вимірювання пускового моменту, а для інших доведено їх незначний вплив або дано рекомендації по усуненню чи врахуванню. До найбільш впливових завад віднесені: похибка, що зумовлена пульсацією вихідного сигналу, яку створює перетворювач змінної напруги у постійну за середньовипрямленими значеннями (ПСВЗ) – закон розподілу похибки – гамма-розподіл (ГЗР); похибка, що зумовлена квантуванням АЦП вихідного сигналу – закон розподілу похибки – прямокутний (ПЗР) або закон рівномірної щільності; похибка, що зумовлена дією випадкових завад, яких більше п'яти, і серед них не можна виділити домінуючої – закон розподілу похибки – нормальний з нульовим математичним очікуванням (НЗР), див. рис. 7.

Закон розподілу загальної похибки вимірювання пускового моменту є композицією (згорткою) законів розподілу похибок, які виділені. Загальний вигляд законів розподілу загальної похибки вимірювання  $M_n$  наведений на рис. 8 для трьох випадків співвідношення СКВ цих законів розподілу.

Рис. 8. Закони розподілу загальної похибки вимірювання  $M$ 

У *п'ятому розділі* розроблена методика інженерного проектування ІВС для визначення пускового моменту, яка містить два етапи: проектування апаратних засобів та проектування програмного забезпечення. Для реалізації ІВС розроблена електрична принципова схема мікроконтролера на базі сучасного RISC-процесора PIC16C874 та програма для нього. Розроблене програмне забезпечення для ПЕОМ, яке дозволяє в автоматизованому режимі проводити всі етапи вимірювання пускового моменту ЕД та виконувати тестування вимірювальних каналів ІВС.

В ході експериментів проводилося дослідження пускового моменту АД типу 4AA56A4. На рис. 9 наведено фрагмент експериментальної та теоретичної залежностей  $M_{п}$  двигуна від часу, а на рис. 10 наведено експериментальну та теоретичну залежності  $M_{п}$  двигуна від напруги живлення. Розраховані похибки, які характеризують розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень, становлять для першого випадку 2...10%, для другого – 1,5...5%.

Рис. 9. Залежність теоретичного та вимірюного  $M_{п}$  від  $t$ Рис. 10. Залежність теоретичного та вимірюного  $M_{п}$  від  $U_{кн}$

Для атестації розробленого засобу вимірювання  $M_{\Pi}$  виникає необхідність використання задавача зразкового моменту. В ролі такого ЗЗМ пропонується вимірювальний важіль (довжина важеля дорівнює  $l$ ), який з одного боку закріплюється до вихідного вала редуктора ПД, а на протилежному боці знаходиться зразковий тягар  $Q_3$ . На рис. 11 показано зовнішній вигляд ЗЗМ, який встановлюється замість ОВ.

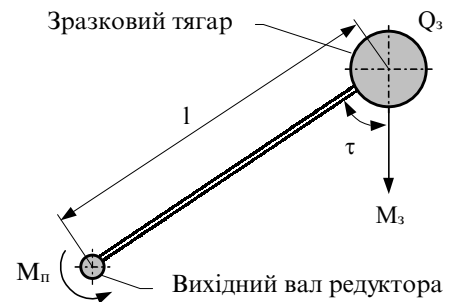


Рис. 11. Зовнішній вигляд ЗЗМ

На рис. 12 наведено зразковий момент  $M_{03}(\tau)$ , який діє на ВКПМ, та момент, який виникає на ТС та вимірюється ВКПМ  $M_y(t)$ . З аналізу наведених залежностей видно, що після закінчення перехідного процесу в засобі для метрологічної атестації вимірювального каналу момент на ТС відповідає зразковому моменту, який створює запропонований ЗЗМ. Результати експериментального дослідження розробленої ІВС для визначення  $M_{\Pi}$  у порівнянні з відомими ІВС наведено у табл. 1.

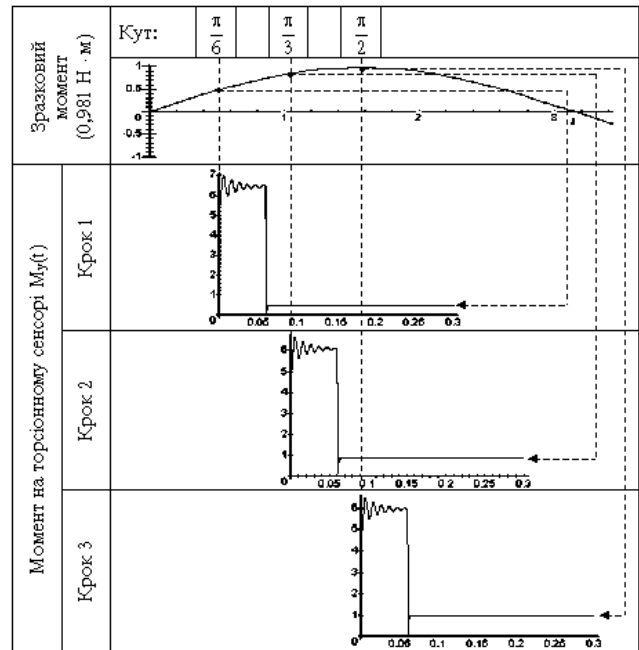


Рис. 12. Результати моделювання ЗЗМ

Таблиця 1

Порівняльна характеристика розробленої ІВС з відомими

Метрологічні характеристики		Відомі ІВС	Розроблена ІВС
Залежності	$M_{\Pi} = f(\alpha)$	Похибка	$\geq 1,5\%$
		Кількість вимірювань	200...400
	$M_{\Pi} = f(U_K)$	Похибка	$\geq 1,5\%$
		Кількість вимірювань	100...300
Діапазон, Н·м		0,14...10	0,12...20

У додатках наведено розроблені прикладні програми для моделювання розробленої ІВС у середовищі Maple V5, електричну принципову схему мікропроцесорного контролера, тексти програм прошивки в контролер та для взаємодії з ПЕОМ, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

Визначення пускового моменту ЕД є складною і трудомісткою вимірювальною процедурою. Складність полягає в здійсненні сумісних вимірю-

вань пускового моменту, кута повороту ротора та напруги живлення ОВ. Виконання таких вимірювань можливе тільки за допомогою ІВС, основним елементом якої є ВКПМ. Відомі ВКПМ характеризуються достатньою швидкістю, але мають невисоку точність. З метою підвищення точності виникає задача вилучення методичної складової похибки і зменшення інструментальної, які притаманні відомим засобам. Для розв'язку цієї задачі необхідно вдосконалити відомі методи вимірювань і розробити нові вимірювальні канали, в яких інформативний параметр вимірюється безпосередньо у місці його виникнення. Основні результати дисертаційної роботи є такими:

*У галузі теоретичних та експериментальних досліджень:*

1. Дістала подальший розвиток відома класифікація ВКПМ, яку доповнено новими класифікаційними ознаками: за способом вимірювання – “за реакцією торсіону”; за фізичним принципом дії – “з приводом ротора ОВ”; за типом приводного двигуна – “кроковий двигун”; за архітектурою побудови – “мікропроцесорні”. Нова класифікація дозволить більш повно охопити розроблений та відомі вимірювальні канали пускового моменту.
2. Вдосконалено метод визначення  $M_{п}$ , який відрізняється тим, що для безпосереднього вимірювання інформативного параметра у місці його виникнення застосовано ТС, а для вилучення методичної похибки – покроковий режим роботи приводного двигуна. Точність вимірювання пускового моменту зростає в 2 – 3 рази порівняно з відомими засобами.
3. Розроблено математичну модель ВКПМ для вимірювання залежності пускового моменту від кутового положення ротора ОВ у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь, яку розв'язано чисельними методами у середовищі символічної математики Maple V5. Встановлено, що запропонована модель адекватно відтворює фізичні процеси, що протікають у вимірювальному каналі, а похибка не перевищує 7...8%.
4. Розроблено математичну модель ВКПМ для вимірювання залежності мінімального  $M_{п}$  від напруги живлення ЕД у вигляді диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами, розв'язок якого отримано аналітично.
5. Вперше одержано аналітичні залежності для визначення тривалості перехідного процесу рухомої частини перетворювача для динамічного режиму роботи вимірювального каналу, що дало змогу реалізувати ІВС, в якій кількість вимірювань залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  максимальна і обмежений час дослідів КЗ використовується без втрат.
6. Визначено та проаналізовано вплив різноманітних завод на похибку вимірювання  $M_{п}$  при використанні розробленої ІВС. Визначено домінуючі (найвпливовіші) складові похибки вимірювання  $M_{п}$  ОВ. Для інших похибок доведено їх незначний вплив або запропоновані шляхи усунення та

врахування. Вперше знайдено закони розподілу похибок вимірювання  $M_{п}$  електричних двигунів, сумісний закон розподілу загальної похибки та розраховано показники вірогідності контролю для випадку, коли ІВС використовується для контролю якості продукції електротехнічного заводу.

*У галузі практичного використання:*

1. Розроблено структурну схему ІВС для визначення пускового моменту електричних двигунів, в якій основним елементом є ВКПМ, метрологічні показники якого визначають точність та швидкодію ІВС у цілому.
2. Вперше розроблено структурну схему ВКПМ, яка відрізняється від відомих тим, що інформативний сигнал (пусковий момент) вимірюється безпосередньо там, де він виникає – на роторі ОВ торсіонним сенсором. А покровий режим роботи ПД дає змогу виконати головну умову досліду КЗ – сковзання ротора під час вимірювання пускового моменту  $S = 1$ .
3. Розроблено ПВП пускового моменту типу “момент – напруга” на базі торсіонного сенсора і двох однакових трансформаторних перетворювачів кута повороту. Перевагами розробленого перетворювача є висока точність та швидкість вимірювального перетворення, лінійність статичної характеристики, технологічність виготовлення.
4. За результатами теоретичних досліджень розроблено мікропроцесорний вимірювальний канал пускового моменту з відображенням результатів на ПЕОМ та програмне забезпечення для нього, що дозволяє проводити вимірювання пускового моменту в автоматизованому режимі та проводити тестування вимірювальних каналів розробленої ІВС.
5. Удосконалено алгоритми проведення вимірювання пускового моменту, що дозволяє зменшувати час вимірювання за рахунок двох етапів вимірювання: “грубо” та “точно”.
6. Розроблена методика інженерного проектування подібних ІВС для визначення пускового моменту. Дано рекомендації, за якими обирають тип торсіону, приводного двигуна та інше. Результати проектування проілюстровано на конкретному прикладі.
7. Розроблено методику метрологічної атестації запропонованої ІВС, яка базується на новому, більш точному, задавачі зразкового моменту.
8. Виконане експериментальне дослідження електричного двигуна типу 4АА56А4. Похибка, яка характеризує розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень, для вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  становить 2...10%, для вимірювання залежності  $M_{п} = f(U_{к})$  – 1,5...5%.
9. Створено пакет прикладних програм у середовищі Maple V5 для моделювання динамічного та статичного режимів роботи запропонованої інформаційно-вимірювальної системи.



*Розроблена в дисертації ІВС для вимірювання пускового моменту електродвигунів малої та середньої потужності, програмне та метрологічне забезпечення може використовуватись і для випробування інших типів двигунів та механізмів, що створюють обертальний момент.*

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Кухарчук В.В., Козловський А.В. Математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту з кроковим двигуном // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – № 3. – С. 11–15.
2. Козловський А.В., Кухарчук В.В. Моделювання контролю залежності пускового моменту в функції куткового положення ротору // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький). – 1999. – № 1. – С. 17–23.
3. Кухарчук В.В., Козловський А.В., Поджаренко В.О. Розробка математичної моделі для метрологічної атестації засобу контролю пускового моменту // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 1999. – №55. – С.171–177.
4. Поджаренко В.О., Козловський А.В. Розробка математичної моделі вимірювального перетворювача пускового моменту з торсіонним сенсором // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 2000. – №56. – С. 140–147.
5. Козловський А.В., Кухарчук В.В. Моделювання динамічних характеристик вимірювального перетворювача мінімального пускового моменту // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Приборостроение–97”. – Винница–Симеиз. – 1997. – Часть 1. – С. 139–144.
6. Козловский А.В. Разработка обобщенной схемы системы контроля пусковых характеристик электрических машин // Сборник трудов международного симпозиума “Наука и предпринимательство”. – Винница-Львов. – 1998. – С. 288–291.
7. Козловський А.В. Лінеаризація та аналіз адекватності математичної моделі крокового двигуна // Сборник трудов международного симпозиума “Наука и предпринимательство”. – Винница-Львов. – 1999. – С. 147–150.
8. Козловський А.В. Спосіб визначення пускового моменту електродвигуна // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Приборостроение-98”. – Винница-Симферополь: Ученые записки Симферопольского госуниверситета. – 1998. – С. 208–213.
9. Козловський А.В. Аналіз адекватності лінеаризованої моделі крокового двигуна // Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної

- конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС–99). У 3-х томах. Том 2. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 1999. – С. 160–164.
10. Рішення про видачу патенту України № 98063116, МПК G 01 L 3/10. Спосіб визначення пускового моменту електродвигуна / А.В. Козловський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко; Заявлено 16.06.1998.
  11. Козловский А.В. Исследование характеристик измерительного преобразователя пускового момента // 1-й Международный молодежный форум “Электроника и молодежь в XXI веке”: Тез. докл./ХТУРЭ. – Харьков. – 1997. – С. 130.
  12. Ігнатенко О.Г., Козловський А.В., Кухарчук В.В., Овчінніков В.С., Поджаренко В.О. Навчально-лабораторний комплекс для вивчення принципів побудови комп’ютерно-вимірювальних систем // Республіканська науково-методична конференція “Нові технології підготовки спеціалістів з вищою освітою за триступеневою системою “бакалавр–інженер–магістр”: Тез. допов. – Вінниця, ВДТУ. – 1996. – С. 100.

***Особистий внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві.***

Дисертантом у [1] – розроблено математичну модель, яка описує роботу вимірювального каналу під час підключення його до електричної мережі з використанням лінеаризованої моделі КД, здійснено розв’язок отриманої системи та розроблено програмне забезпечення (ПЗ) для моделювання; [2] – запропоновано нелінійну математичну модель ЗВ залежності  $M_{\text{п}} = f(\alpha)$  в покроковому режимі ПД та отримано її розв’язок чисельними методами в середовищі Maple V5, здійснено вибір нелінійної моделі КД, яка дозволяє реалізувати перервний метод вимірювання  $M_{\text{п}}$ ; [3] – доведено недоцільність використання відомих зразкових засобів для метрологічної атестації ВКПМ у покроковому режимі роботи, запропоновано новий ЗЗМ, який має час заспокоєння значно менший за відомі, що суттєво підвищує швидкодію і точність здійснення метрологічного експерименту; [4] – запропонована нова архітектура побудови ВКПМ та його математична модель, в якій вимірювання  $M_{\text{п}}$  відбувається безпосередньо на роторі ОВ за допомогою ТС, досліджено вплив деформації торсіону на точність вимірювання  $M_{\text{п}}$ ; [5] – проаналізовано послідовність вимірювального перетворення мінімального  $M_{\text{п}}$  та визначені умови обрання сенсора зусилля, знайдена статична функція перетворення ЗВ з ємним сенсором зусилля; [10] – одержано аналітичні залежності для визначення тривалості перехідного процесу для динамічного режиму роботи вимірювального каналу, розроблена методика розрахунку спрямована на підвищення швидкодії вимірювального каналу; [12] – розроблено ПЗ для навчально-лабораторного комплексу, який дозволяє дослідити метрологічні характеристики вимірювальних каналів інтелектуальних засобів вимірювань.

## АНОТАЦІЯ

**Козловський А.В. Розробка інформаційно-вимірювальної системи для визначення пускового моменту електродвигунів малої та середньої потужності. – Рукопис.**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.16 – інформаційно-вимірювальні системи. – Вінницький державний технічний університет, Вінниця, 2000.**

Дисертація присвячена розробці та дослідженню інформаційно-вимірювальної системи для визначення пускового моменту електродвигунів малої та середньої потужності. Вдосконалено метод визначення пускового моменту, який відрізняється тим, що для безпосереднього вимірювання інформаційного параметра у місці його виникнення застосовано торсіонний сенсор, а для вилучення методичної похибки – покроковий режим роботи приводного двигуна. Точність вимірювання пускового моменту зростає в 2 – 3 рази порівняно з відомими засобами. Розроблено математичну модель вимірювального каналу у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь та отримано аналітичні залежності для розрахунку тривалості перехідних процесів. Запропонована структурна схема інформаційно-вимірювальної системи і алгоритм її роботи. Проаналізовано похибки вимірювання пускового моменту та розраховані показники вірогідності контролю. Розроблені методики інженерного проектування, метрологічної атестації та проведено експериментальні дослідження.

*Ключові слова: пусковий момент, вимірювання, контроль, електричний двигун, інформаційно-вимірювальна система.*

**Козловский А.В. Разработка информационно-измерительной системы для определения пускового момента электродвигателей малой и средней мощности. – Рукопись.**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – информационно-измерительные системы. – Винницкий государственный технический университет, Винница, 2000.**

Диссертация посвящена разработке и исследованию информационно-измерительной системы для определения пускового момента электродвигателей малой и средней мощности. Анализ известных отечественных и зарубежных информационно-измерительных систем характеристик электродвигателей показал, что измерению пускового момента практически не уделено внимания. До сегодняшнего дня измерение этого важного эксплуатационного параметра происходит вручную при значительных затратах времени, а из-

вестные автоматизированные средства измерения пускового момента имеют невысокую точность.

Повышение точности измерения пускового момента позволит производителям электродвигателей осуществлять их качественную сертификацию, а потребителям – снизить риск использования бракованного двигателя. Особенно это актуально для производителей, у которых технологический процесс изготовления двигателей несовершенный, что является основной причиной отклонения пускового момента от расчетного.

Определение пускового момента происходит в опыте “короткого замыкания”, в котором необходимо выполнить совместные измерения пускового момента, напряжения и углового положения ротора объекта измерения относительно статора. Для реализации такого средства измерения необходима информационно-измерительная система, в которой основным элементом будет измерительный канал пускового момента, точность и быстродействие которого будут характеризовать систему в целом.

Для этого усовершенствован метод определения пускового момента, который отличается тем, что для непосредственного измерения информативного параметра в месте его возникновения применен торсионный сенсор, а для исключения методической погрешности – пошаговый режим работы приводного двигателя. При этом точность измерения пускового момента возрастает в 2 – 3 раза в сравнении с известными способами.

Разработана математическая модель измерительного канала в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и получены аналитические зависимости для расчета продолжительности переходных процессов. Решение системы получено численными методами в среде символьной математики Maple V5, а моделирование показало, что погрешность предложенной модели не превышает 7...8%.

Разработана структурная схема информационно-измерительной системы и алгоритм ее работы на базе микроконтроллера, который выполняет измерение пускового момента в автоматизированном режиме и передает результаты для анализа в ПЕОМ.

Проанализированы погрешности измерения пускового момента и функции их влияния. Выделены погрешности, которые наибольшим образом влияют на результат измерения, а для остальных погрешностей доказана их незначительность или даны рекомендации по их учету, устранению. Рассчитаны показатели достоверности контроля для случая, когда разработанное средство измерения используется для контроля качества выпускаемых двигателей на электротехнических предприятиях.

В работе разработана оригинальная конструкция первичного измерительного преобразователя пускового момента в виде торсионного сенсора типа “телескопический вал” и двух одинаковых трансформаторных преобразователей угла поворота, которые включены по дифференциальной схеме. Предложенный преобразователь отличается высокой чувствительностью и быстродействием.

Разработана методика инженерного проектирования подобных средств измерения, которая проиллюстрирована на примере. Для осуществления метрологической аттестации предложено новое средство для задания образцового момента.

Основные результаты позволили реализовать разработанную информационно-измерительную систему в виде экспериментального образца и выполнить экспериментальные исследования.

*Ключевые слова: пусковой момент, измерение, контроль, электрический двигатель, информационно-измерительная система.*

**Kozlovskiy A.V. Development of the informational-measuring system for determination of a starting moment of electric motors of a small and medium capacity. – Manuscript.**

**Thesis for a candidate’s degree by speciality 05.11.16 – informational-measuring systems. – Vinnitsa state technical university, Vinnitsa, 2000.**

The thesis is devoted to development and research of the informational-measuring system for determination of a starting moment of electric motors of small and medium capacity. Methods of determination of a starting moment are improved which are different that for the direct measurement of informational parameter in the place of its origin is used the sensor of torsion, and for an elimination of a methodical error – step-by-step regime of work of a leading drive. The precision of a measurement of a starting moment will increase by 2 – 3 times in comparison with known methods. The mathematical model of the measuring channel as a system of the non-linear differential equations is developed. Analytical dependences for calculation of a duration of transience processes are received. The structural scheme of the informational-measuring system and algorithm of its work is offered. Errors of a measurement of a starting moment are analysed and the parameters of probability of control are calculated in this thesis. The techniques of engineering designing and metrological certification are developed, and the experimental researches are conducted.

*Key words: starting moment, measurement, control, electric motor, informational-measuring system.*

Підписано до друку 31.07.2000 р. Формат 29.7 × 42 1/4  
Наклад. 100 прим. Зам. №2000-069  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного технічного університету.  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 93. Тел.: (0432) 44-01-59