

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Усов Віктор Васильович

УДК 621.3.08

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ КРОКОВИХ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2010

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті  
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Кухарчук Василь Васильович,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри теоретичної електротехніки та елект-  
ричних вимірювань

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Квасніков Володимир Павлович,  
Національний авіаційний університет, м. Київ,  
завідувач кафедри інформаційних систем

доктор технічних наук, професор  
Чорний Олексій Петрович,  
Кременчуцький державний політехнічний університет,  
директор Інституту електромеханіки, енергозбереження та  
комп'ютерних технологій

Захист відбудеться „ 27 ” лютого 2010 р. о 9<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої  
ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021,  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГУК ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного  
університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розіслано „ 22 ” січня 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.В. Павлов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**Актуальність теми.** Крокові електромеханічні перетворювачі широко використовуються в різних галузях народного господарства: в засобах комп'ютерної техніки, аналітичного приладобудування для визначення складу речовин, робототехніці та ін. Це пояснюється, в першу чергу, їх високою надійністю та можливістю точного позиціонування. Вони охоплюють широкий клас електричних машин, що мають різне призначення та конструктивні особливості. В даній роботі розглядаються перетворювачі електричної енергії в покерований обертальний рух.

З метою оцінювання якості, в процесі виробництва та експлуатації, цих виробів необхідною умовою технологічного процесу є контроль їх параметрів. При цьому не вирішеною залишається проблема високої трудомісткості встановлення відповідності контрольованих параметрів нормованим значенням, що пояснюється недосконалістю та низькою швидкістю засобів контролю.

Найбільш трудомістким і повністю неавтоматизованим є контроль кута повороту, що здійснюється на ручних стендах за допомогою вимірювального мікроскопу. При цьому швидкість складає 1 - 2 години на один перетворювач в залежності від кількості його кутових положень. Високою трудомісткістю характеризується також контроль його моментних характеристик. Наприклад, для отримання залежності статичного моменту утримання від кутового положення ротора необхідно витратити 2 години на один перетворювач, що пояснюється неавтоматизованістю операції створення гальмівного моменту. Крім того, в процесі тривалої роботи збільшується ймовірність виникнення великих суб'єктивних похибок та промахів, викликаних стомленістю оператора.

Тому, за таких умов, в процесі серійного виробництва не можливо забезпечити контроль кожного виробу, що може призвести до значних матеріальних втрат як з боку виробника, так і споживача.

Отже, на сьогодні важливою та актуальною є науково-прикладна задача підвищення швидкості вимірювального контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів шляхом автоматизації вимірювань та контролю.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2005-2009 років, відповідно науковому напрямку кафедри та за держбюджетною темою «Розробка оптико-електронних вимірювальних перетворювачів параметрів обертального руху» №23-Д-279, № д. р. 0105U002433 та госпдоговірних темах № 2357 від 01.12.07 і № 2358 від 01.02.09, № д. р. 0109U001621.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення швидкості вимірювального контролю кутових положень, а також статичного та пускового моменту крокових електромеханічних перетворювачів шляхом автоматизації вимірювальної процедури цих параметрів під час перехідного процесу об'єкта контролю.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Здійснити аналіз відомих методів та засобів контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів.
2. Вдосконалити математичну модель пускових характеристик чотирифазного крокового електромеханічного перетворювача.
3. Розробити метод контролю кутових положень та вдосконалити метод статичного та пускового моменту крокових електромеханічних перетворювачів.
4. Дослідити перехідні режими роботи об'єкта контролю та оцінити їх вплив на швидкість і точність вимірювального контролю інформативних параметрів.
5. Розробити програмне забезпечення для моделювання електромеханічних процесів в крокових перетворювачах в статичному та перехідному режимах роботи.

6. Розробити структурні схеми та математичні моделі, здійснити оцінювання основних метрологічних характеристик засобів контролю кутових положень, статичного і пускового моменту крокових електромеханічних перетворювачів.

7. Розробити мікропроцесорний засіб автоматизованого контролю та методика нормування похибок кута повороту, статичних та пускових характеристик крокових електромеханічних перетворювачів, провести оцінювання швидкодії та вірогідності контролю, довести адекватність розроблених математичних моделей.

**Об'єкт дослідження** – процес вимірювального контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів.

**Предмет дослідження** – методи та засоби автоматизованого контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів.

**Методи дослідження.** При розв'язанні поставлених завдань використано методи математичного та фізичного моделювання для аналізу електромеханічних процесів об'єкта контролю; чисельні методи для розв'язку систем нелінійних диференціальних рівнянь; методи вимірювального перетворення для дослідження складових похибки засобів контролю; методи вимірювального контролю для розробки методик і алгоритмів роботи засобів контролю; методи математичної статистики для оцінювання похибок засобів контролю; методи метрологічної перевірки для нормування похибок розроблених засобів контролю.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше розроблено метод вимірювального контролю кутових положень, який від відомих відрізняється тим, що вимірювання інформативного параметра здійснюється під час перехідного процесу крокового електромеханічного перетворювача, а це дозволяє досягти максимального значення швидкодії, яке обмежується в основному тривалістю перехідного процесу об'єкта контролю.

2. Вдосконалено математичну модель пускових характеристик чотирифазних крокових електромеханічних перетворювачів шляхом оцінювання максимального значення моменту навантаження для пускових частот напруги живлення, яка у порівнянні з відомими дозволяє відтворити процес вимірювального контролю, з врахуванням низькочастотних провалів моменту та явища змінення активного опору обмоток в результаті нагрівання.

3. Модифіковано метод автоматизованого контролю пускових характеристик крокових електромеханічних перетворювачів, причому, на відміну від існуючих, вимірювальний контроль пускового моменту здійснюється при покроковому зменшенні навантаження, починаючи від максимального, до значення моменту навантаження, при якому перетворювач виходить із синхронізму. Це дозволяє підвищити швидкість вимірювального контролю більш як у 100 разів, забезпечуючи при цьому необхідну вірогідність.

4. Отримано математичні моделі для оцінювання динамічних та статичних метрологічних характеристик засобів вимірювального контролю кутових положень, статичного та пускового моменту. Виділено основні складові похибки: аналого-цифрового перетворення, первинних вимірювальних перетворювачів, з'єднувальних муфт, які мають випадковий характер. Знайдено композиційні закони розподілу складових похибки, що дозволяє оцінити показники вірогідності контролю.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблено структурну, функціональну та схему електричну принципову засобів контролю кутових положень, статичного та пускового моменту.

2. Розроблено алгоритми роботи і програмне забезпечення мікропроцесорного засобу контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів.

3. Запропоновано методика автоматизованої метрологічної атестації і нормування похибок відпрацювання кроку, що дозволяє класифікувати об'єкти контролю по класам точності.

4. Розроблено програмне забезпечення для моделювання електромеханічних процесів в крокових перетворювачах в статичному та пусковому режимах роботи.

5. Розроблено макетний зразок засобу контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів, який, на відміну від відомих, забезпечує максимальну швидкість, а ві-

рогідність контролю повністю відповідає нормованим значенням відомих серійних та експериментальних зразків.

Одержані результати впроваджено на інноваційно-впроваджувавальному підприємстві «ІнноВіннпром» (м. Вінниця) та на ТОВ «ТЕАМ Лтд» (м. Вінниця). Результати, які стосуються мікропроцесорних засобів контролю кутових положень, впроваджено в навчальний процес у лабораторії електровимірювальної техніки Вінницького національного технічного університету в лабораторному практикумі «ІВС в електромеханіці».

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та практичні результати отримані автором самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [1, 3, 10, 16] – виведено аналітичні залежності для визначення основних статичних та динамічних характеристик засобу контролю кутових положень; [2] – розроблено математичну модель чотирифазного крокового електромеханічного перетворювача; [4, 12] – розроблено структурну схему засобу вимірювального контролю електричного струму з динамічним керуванням опорної напруги; [5] – проведено оцінювання та аналіз динамічних метрологічних характеристик засобу контролю кутових положень; [6] – проведено оцінювання помилок першого та другого роду засобу контролю кутових положень; [7] – проведено оцінювання невизначеності типу А і В та фактору покриття для розширеної невизначеності; [9, 15] – проведено оцінювання адекватності математичної моделі вимірювального перетворювача кута повороту; [11] – розроблено структурну схему та алгоритм роботи засобу контролю статичних та пускових характеристик [13] – розроблено структурну схему та алгоритм роботи засобу контролю кутових положень; [14] – здійснено розробку програмних блоків низького та високого рівнів.

**Апробація результатів дисертації.** Результати та основні положення дисертаційної роботи були представлені на таких наукових форумах: VIII Міжнародній науково-технічній конференції «КУСС 2005», м. Вінниця, 24-27 жовтня 2005 р.; Конкурсі наукових робіт з напрямку «Електромеханіка», м. Дніпродзержинськ, 25-27 квітня 2006 р.; XI Міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», м. Кременчук, 17-19 травня 2006 р.; XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматика 2006», м. Вінниця, 25-27 вересня 2006 р.; XI Міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», м. Кременчук, 15-17 травня 2007 р.; X Міжнародній науково-технічній конференції «КУСС 2008», м. Вінниця, 21-24 жовтня 2008 р.; XII Міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», м. Кременчук, 13-15 травня 2008 р.; Науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ, м. Вінниця 2005-2009 рр.

**Публікації.** Результати проведених досліджень висвітлено у 16 публікаціях, з них 9 статей у наукових фахових виданнях, 4 патенти на корисні моделі, одне свідоцтво на комп'ютерну програму, 2 тези доповідей.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, 8 додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації 194 сторінки, в яких основний зміст викладено на 150 сторінках друкованого тексту, містить 81 рисунок та 15 таблиць. Список використаних джерел складається з 144 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено інформацію про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації.

В **першому розділі** проаналізовано особливості крокових електромеханічних перет-

ворювачів (КЕМП) в різних режимах роботи, проведено класифікацію основних характеристик та параметрів, що підлягають контролю, та встановлено основні проблеми, які виникають в процесі їх вимірювального контролю.

Проведено аналіз відомих методів та засобів контролю характеристик крокових ЕМП. Показано, що вони мають низьку швидкодію, є неавтоматизованими і досить трудомісткими. Так, для оцінювання похибок позиціонування або пускових характеристик необхідно 1-2 години на один кроковий ЕМП. Це вказує на необхідність розробки нових, більш досконалих методів та засобів контролю.

Для вирішення проблеми вибору відповідних сенсорів інформативних параметрів крокових ЕМП проаналізовано відомі первинні вимірювальні перетворювачі кута повороту та обертового моменту і встановлено найбільш ефективні з них: фотоелектричні та тензорезистивні. Крім цього, сформульовано проблему створення моменту навантаження під час контролю статичних та пускових характеристик, яка вирішується шляхом застосування електромагнітних муфт.

В **другому розділі** проведено дослідження об'єкта контролю шляхом аналізу розв'язків його математичної моделі (рис. 1). При цьому було встановлено, що ротор в кроковому режимі здійснює коливальні рухи при переході від одного стійкого кутового положення до наступного. Дана особливість суттєво впливає на результат вимірювання кута при його квантуванні в процесі вимірювального перетворення. Це пояснюється, в першу чергу, зміною напрямку обертання ротора, не врахування якого призводить до появи значних похибок.

Встановлено, що швидкодія вимірювального перетворення кута повороту крокового ЕМП обмежується тривалістю перехідного процесу коливання ротора. Це дозволяє визначити максимально можливу швидкодію вимірювання як час перехідного процесу, що для розглянутих крокових ЕМП не перевищує 0,5 с.

Показано важливість налаштування частоти напруги живлення відповідно до типу КЕМП, які характеризуються різними електричними та механічними параметрами, що визначають тривалість перехідного процесу (рис. 1). Це дозволяє уникнути додаткових похибок, в результаті передчасного закінчення вимірювального процесу, та підвищити швидкодію, за рахунок зменшення частоти напруги живлення для крокових ЕМП з меншою тривалістю перехідного процесу.

Вдосконалено математичну модель об'єкта контролю, яка порівняно з відомими дозволяє здійснити аналіз фізичних процесів чотирифазних крокових ЕМП, що значно розширює номенклатуру об'єктів контролю.

Рис. 1. Залежність перехідного процесу кута повороту від моменту інерції



На основі розробленого методу запропоновано засіб автоматизованого контролю (ЗК) кутових положень з фотоелектричним сенсором, який здійснює вимірювальне перетворення кута в пропорційну кількість імпульсів (рис. 3).

Рис. 3. Структурна схема ЗК кутових положень

Передача обертального моменту від крокового ЕМП до фотоелектричного сенсора кута повороту СКП відбувається за рахунок мембранної муфти  $M$ , яка дозволяє з'єднувати вали з деякими кутовими та радіальними зміщеннями, зменшуючи при цьому похибку передачі кута. Визначення напрямку обертання вала сенсора здійснюється за допомогою блоку НО, який може бути побудований як на основі програмних, так і апаратних засобів. Попередня обробка вимірюваної інформації та керування об'єктом контролю реалізується мікропроцесорним контролером МК, програмна частина якого дозволяє повністю автоматизувати процес вимірювального контролю. Остаточна обробка та представлення результатів здійснюється персональним комп'ютером ПК.

Для запропонованого ЗК кутових положень розроблено математичну модель (3) та здійснено ідентифікацію її параметрів:

$$\begin{cases} J_{\Sigma} \ddot{\theta}_c + b \dot{\theta}_c + c \theta_c = b \dot{\theta}_d + c \theta_d - M_c; \\ N = \frac{z}{360^{\circ}} \cdot \theta_c, \end{cases} \quad (3)$$

де  $M_c$  - момент тертя сенсора (Н·м);  $J_{\Sigma} = J_m + J_c$  - сумарний момент інерції муфти і сенсора (кг·м<sup>2</sup>);  $c$  - коефіцієнт жорсткості муфти (Н·м/рад);  $b$  - коефіцієнт демпфування муфти (Н·м/рад<sup>2</sup>);  $\theta_d$  - кут повороту двигуна (°);  $\theta_c$  - кут повтору сенсора (°);  $z$  - кількість міток сенсора;  $N$  - кількість імпульсів.

Здійснено розрахунок перехідного процесу кута повороту як реакцію на одиничну функцію  $I(t)$  (рис. 4). При роботі сумісно з кроковим електромеханічним перетворювачем оцінено час перехідного процесу ( $8,6 \cdot 10^{-4}$  с), абсолютну ( $0,05^{\circ}$ ) та відносну ( $0,09\%$ ) динамічні похибки (рис. 4).

Запропоновано методику нормування кутових положень, яка полягає в оцінюванні максимальної відносної похибки позиціонування з наступним встановлення класу точності крокового ЕМП.

На основі критерію виходу із синхронізму (2) та проведеного математичного моделювання пускового моменту, вдосконалено метод автоматизованого контролю пускових характеристик крокових електромеханічних перетворювачів. Дана модифікація відрізняється тим, що вимірювання пускового моменту здійснюється при покровому зменшенні навантаження, починаючи від максимального, до того моменту поки двигун буде здатним запуститися, що визначається за критерієм виходу із синхронізму (2). Обробка отриманих значень пускового моменту для всіх частот напруги живлення, спрямована на нормування пускової характеристики, шляхом оцінювання частоти приємності та максимального пускового моменту.

На основі вдосконаленого методу запропоновано засіб контролю статичних та пускових характеристик (рис. 5).

Рис. 4. Перехідний процес та динамічна похибка ЗК кутових положень крокових ЕМП



Рис. 5. Структурна схема ЗК пускового моменту

Вимірювальне перетворення моменту в даному ЗК здійснюється за допомогою тензорезистивного сенсора зусилля СЗ, гальмівний момент створюється шляхом застосування електромагнітної муфти ЕММ, а вимірювальний контроль кута повороту за допомогою розробленого засобу контролю кутових положень (рис. 3).

Для даного ЗК статичних та пускових характеристик крокових ЕМП проведено ідентифікацію параметрів та структури математичної моделі:

$$\begin{cases} J_{\Sigma} \ddot{\theta}_d + D \dot{\theta}_d = M_d(\theta_d, t) - M_{em}(\theta_d); \\ N_m = \frac{2^n}{U_{on}} \cdot k \cdot \left( \frac{S}{4R \cdot g} \cdot M_{em} + U_0 \right); \\ J_{\Sigma} \ddot{\theta}_c + b \dot{\theta}_c + c \theta_c = b \dot{\theta}_d + c \theta_d - M_c; \\ N_{\theta} = \frac{z}{360^{\circ}} \cdot \theta_c, \end{cases} \quad (4)$$

де  $J_{\Sigma}$  - сумарний момент інерції муфт, СКП та ЕММ (кг·м<sup>2</sup>);  $M_{em}(\theta_d)$  - момент, що створюється електромагнітною муфтою (Н·м);

$M_d(\theta_d, t)$  - електромагнітний момент крокового ЕМП (Н·м);  $c$  - коефіцієнт жорсткості муфт (Н·м/рад);  $b$  - коефіцієнт демпфування муфт (Н·м/рад<sup>2</sup>);  $\theta_{em}$  - кут вала повороту ЕММ (°);  $N_m$  - двійковий код з виходу АЦП, що пропорційний моменту  $M_{em}$ ;  $U_{on}$  - опорна напруга АЦП, що вбудований в МК (В);  $n$  - розрядність АЦП;  $k$  - коефіцієнт підсилення;  $U_0$  - початкове значення напруги на виході сенсора, при нульовому зусиллі (В).

Також встановлено основні характерні точки статичних та пускових характеристик крокового ЕМП (максимальний синхронізуючий момент, максимальне кутове відхилення, максимальний пусковий момент, максимальна частота приємності), які підлягають нормуванню, та для кожного з них встановлено відповідні значення допусків, що характеризують придатність чи не придатність об'єкта контролю (табл. 1).

В четвертому розділі оцінено основні метрологічні характеристики засобів контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів, в основі яких лежать розроблені математичні моделі (3) та (4). При цьому розглядалися теоретичні складові (рівняння перетворення, статична характеристика, чутливість, поріг чутливості, роздільна здатність, помилки першого та

Таблиця 1  
Нормовані характеристики КЕМП

Параметр	Допуск
<i>Пускова характеристика</i>	
Мінімальний пусковий момент	$M_{\max} / \sqrt{2} \pm 5\%$
Максимальна частота приємності	$f_{\max} \pm 5\%$
<i>Статична характеристика</i>	
Мінімальний синхронізуючий момент	$M_{\max} \pm 5\%$
Максимальний кут відхилення	$\theta_0 \pm 3\%$
<i>Кутові положення</i>	
Похибка позиціонування	$\pm 3\%$

другого роду) або такі, що визначаються на основі паспортних даних (складові похибки, невизначеність типу В).

Для засобу контролю кутових положень отримано аналітичні залежності функції перетворення. Встановлено, що статична характеристика лінійна, чутливість постійна, поріг чутливості обмежується моментом тертя фотоелектричного сенсора. Оцінено основні складові похибки (сенсора, муфти, квантування). Приписавши їм відповідні закони розподілу, оцінено СКВ сумарної похибки (табл. 2). Встановлено, що сумарна похибка розподілена за нормальним законом. На основі проведених досліджень складових похибки, здійснено оцінювання невизначеності типу В, що визначається як сумарне СКВ і складає  $0,049^\circ$ .

Таблиця 2

### Результати оцінювання складових похибки ЗК кутових положень

Складові	Джерела	Числові значення	Закон розподілу, СКВ
1. Похибка сенсора	Неточного нанесення міток СКП	$\Delta_c = \pm 0,083^\circ$	Рівномірний, $\sigma_c = \frac{\Delta_c}{\sqrt{3}}$
2. Похибка муфти	Радіальні та кутові зміщення валів	$\Delta_m = \pm 0,0028^\circ$	Рівномірний, $\sigma_m = \frac{\Delta_m}{\sqrt{3}}$
3. Похибка АЦП кута повороту	Квантування	$\Delta_k = \pm 0,018^\circ$	Трикутний, $\sigma_k = \frac{\Delta_k}{\sqrt{6}}$
<i>Сумарна похибка</i>			
Сумарне СКВ	$\sigma_\Sigma = \sqrt{\frac{\Delta_c^2}{3} + \frac{\Delta_m^2}{3} + \frac{\Delta_k^2}{6}} = 0,049^\circ$		
Довірчий інтервал $P=0,95$	$\Delta_\Sigma = \pm 1,1 \cdot \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_m^2 + \Delta_k^2} = \pm 0,094^\circ$		

Для порівняння, оцінено вірогідність контролю вимірювального мікроскопу УИМ-200, що складає 0,98. При цьому проведено оцінювання статистичних характеристик контрольного параметра крокового ЕМП М35SP-6 за допомогою УИМ-200, встановлено, що СКВ кута повороту складає  $0,017^\circ$ , а допустимі відхилення не перевищують  $\pm 0,11^\circ$ .

Для оцінювання вірогідності контролю отримано номограми помилок першого та другого роду, які також дозволяють встановити допустимі межі зміни СКВ похибок за умови мінімальної ймовірності помилкового рішення.

Для засобу контролю статичних та пускових характеристик встановлено, що статична характеристика лінійна, чутливість постійна, діапазон вимірювання складає від  $0,4 \cdot 10^{-3}$  Н·м до 0,245 Н·м. Складові похибки: сенсора зусилля, радіусу диска та квантування розподілені за рівномірним законами розподілу, а СКВ сумарної похибки складає  $0,14 \cdot 10^{-3}$  Н·м (табл. 3).

На основі складових похибки оцінено невизначеність типу В, що складає  $0,14 \cdot 10^{-3}$  Н·м.

Таблиця 3

### Статичні характеристики ЗК моменту

Рівняння перетворення	$N_m = \frac{k}{h} \cdot \left( \frac{S}{4R \cdot g} \cdot M_{em} + U_0 \right)$
Чутливість	$S_M = \frac{dN}{dM} = \frac{2^n \cdot k \cdot S}{U_{on} \cdot R \cdot g} = 5,02$ імпульс/мН·м
Поріг чутливості	$M_{min} = \frac{S \cdot U_0}{R \cdot g} = 0,4$ мН·м
Максимальне значення моменту	$M_{max} = Q_{max} \cdot R = 0,245$ Н·м
Роздільна здатність	$R = \frac{1}{S_M} = \frac{U_{on} \cdot R \cdot g}{2^n \cdot k \cdot S} = 0,239$ мН·м/імпульс

З метою оцінювання вірогідності контролю ЗК статичних та пускових характеристик крокових ЕМП отримано статистичні оцінки контрольованого параметра та номограми помилок першого і другого роду (рис. 6).

Рис. 6. Номограми визначення помилок першого і другого роду

В п'ятому розділі на основі проведених теоретичних досліджень здійснено розробку пристроїв автоматизованого контролю кутових положень (рис. 7), статичних та пускових характеристик крокових електромеханічних перетворювачів. Дані пристрої складаються з трьох основних частин: механічної, апаратної та програмної.

Рис. 7. Функціональна схема ЗК кутових положень

Наведений засіб контролю кутових положень (рис. 7) реалізує запропонований метод та структурну схему (рис. 3), причому визначення напрямку обертання вала здійснюється на основі D – тригера, а підрахунок імпульсів шляхом застосування реверсивного двійкового лічильника.

Розроблено програмне забезпечення для керування роботою мікроконтролера, у вигляді блоку низького рівня та блоку високого рівня, що реалізує алгоритм налаштування, нормування та візуальне відображення результатів вимірювального контролю (рис. 8). Програмна частина також включає в себе математичну модель об'єкта контролю, що дозволяє налаштувати процес вимірювального контролю з врахування електричних та механічних параметрів.

Рис. 8. Програмна частина ЗК кутових положень

Рис. 9. Експериментальні та теоретична статичні характеристики

На основі проведених експериментальних досліджень, отримано емпіричну статичну характеристику, адитивну ( $3,8 \cdot 10^{-4}^\circ$ ) та мультиплікативну (1,6 імпульс/град.) складові похибки засобу контролю, що доводить адекватність розробленої математичної моделі (рис. 9).

Встановлено, що час вимірювального перетворення кута повороту не перевищує тривалість перехідного процесу, за рахунок чого забезпечується максимальна швидкодія, яка для крокового ЕМП М35SP-6 складає 0,5 с, що в порівнянні з відомими засобами в 100 разів вища.

Шляхом статистичної обробки експериментальних даних оцінено випадкову складову похибки ( $0,0442^\circ$ ), су-

Рис. 10. Зовнішній вигляд макетного зразку ЗК кутових положень

марне СКВ ( $0,066^\circ$ ) та довірчий інтервал сумарної похибки ( $\pm 0,131^\circ$ ). Експериментально підтверджено, що закон розподілу похибки засобу контролю нормальний. На основі експериментальних даних оцінено невизначеність типу А ( $0,0442^\circ$ ), сумарну стандартну невизначеність ( $0,066^\circ$ ) та розширену невизначеність ( $0,121^\circ$ ). Шляхом оцінювання сумісного закону розподілу похибки і контрольованого параметра та на основі отриманих номограм помилок першого та другого роду, розраховано вірогідність контролю ( $0,97$ ).

На основі запропонованого методу та структурної схеми (рис. 5), розроблено засіб автоматизованого контролю статичних та пускових характеристик крокових ЕМП (рис. 11). Даний ЗК працює в трьох режимах нормування: статичних характеристик, пускових характеристик та кутових положень, що дозволяє проводити випробування та атестацію крокових електромеханічних перетворювачів в повному обсязі.

Рис. 11. Функціональна схема засобу автоматизованого контролю параметрів крокових ЕМП

На основі проведених експериментальних досліджень для ЗК статичних та пускових характеристик крокових ЕМП отримано експериментальну статичну характеристику (рис. 12) та підтверджено адекватність розроблених математичних моделей. Оцінено похибку вимірювання моменту, яка знаходиться в інтервалі  $[-4,79 \cdot 10^{-3} \dots +4,79 \cdot 10^{-3}]$  Н·м, що не перевищує встановлені норми. При цьому розширена невизначеність вимірювання також складає  $4,79 \cdot 10^{-3}$  Н·м. Встановлено, що вірогідність контролю статичних та пускових характеристик крокових ЕМП не менше  $0,98$ .

Порівняльна характеристика відомих та розроблених засобів контролю наведена в табл. 4.

Таблиця 4

**Порівняльна характеристика засобів контролю**

Рис. 12. Експериментальні і теоретична статичні характеристики

Засіб контролю	Параметр	Швидкодія (на одне кутове положення)	Вірогідність контролю
УИМ-200	Кут повороту	до 100 с	0,99
Засіб з двома автоколіматорами	Кут повороту	до 10 с	0,80
<i>ЗК кутових положень</i>	Кут повороту	до 1 с	0,98
Зразкових вантажів	Момент	до 300 с	0,98
<i>ЗК статичного та пускового моменту</i>	Момент	до 60 с	0,98

Порівняльний аналіз характеристик розроблених засобів контролю та відомих аналогів свідчить, що запропоновані методи та технічні рішення дозволяють значно підвищити швидкодію вимірювального контролю параметрів крокових ЕМП, забезпечуючи при цьому необхідну вірогідність.

У **додатках** наведено проміжні математичні перетворення, схему електричну принципову мікропроцесорного засобу контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів, фрагменти текстів програмного забезпечення мікроконтролера та програмного за-

безпечення високого рівня, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення швидкодії вимірювального контролю кутових положень, статичних та пускових характеристик, розв'язок якої дозволяє здійснити автоматичний контроль параметрів крокових ЕМП в процесі їх випробування та післяремонтного обслуговування. Основні наукові і практичні результати роботи такі:

1. Шляхом математичного моделювання встановлено особливості роботи та взаємодії крокових ЕМП з вимірювальним перетворювачем. Теоретично обґрунтовано, що швидкодія вимірювального перетворення кута повороту обмежується тривалістю перехідного процесу коливання ротора, що не перевищує 0,5 с. Показано необхідність налаштування частоти напруги живлення, що дозволяє уникнути додаткових похибок, в результаті передчасного закінчення вимірювального процесу, та підвищити швидкодію за рахунок зменшення частоти напруги живлення.

2. Запропоновано критерій виходу крокового електромеханічного перетворювача із синхронізму, який полягає у порівнянні вимірюваного значення кута повороту під час перехідного процесу з номінальним значенням кроку, що дозволяє автоматизувати процес вимірювального контролю пускового моменту.

3. Вдосконалено математичну модель пускових характеристик чотирифазних крокових електромеханічних перетворювачів, яка у порівнянні з відомими дозволяє відтворити процес вимірювального контролю, з врахуванням низькочастотних провалів моменту та явища змінення активного опору обмоток в результаті нагрівання.

4. Розроблено метод вимірювального контролю кутових положень, який від відомих відрізняється тим, що вимірювання інформативного параметра здійснюється під час перехідного процесу крокового електромеханічного перетворювача, а це дозволяє досягти максимального значення швидкодії, яке обмежується в основному тривалістю перехідного процесу об'єкта контролю.

5. Модифіковано метод автоматизованого контролю пускових характеристик крокових електромеханічних перетворювачів, причому вимірювання пускового моменту здійснюється при покроковому зменшенні навантаження, починаючи від максимального, до значення моменту навантаження, при якому перетворювач виходить із синхронізму. Це дозволяє підвищити швидкодію вимірювального контролю більше ніж у 100 разів, забезпечуючи при цьому необхідну вірогідність.

6. Запропоновано методику нормування кутових положень, яка дозволяє класифікувати крокові ЕМП по класам точності.

7. Розроблено макетний зразок засобу контролю параметрів крокових ЕМП, програмне забезпечення для керування, нормування та візуального відображення результатів вимірювального контролю.

8. Отримано аналітичні та експериментальні залежності функції перетворення. Встановлено, що статична характеристика лінійна, чутливість постійна, поріг чутливості складає  $3,8 \cdot 10^{-4}$ . Швидкодія вимірювального перетворення обмежується часом перехідного процесу, який для одного кутового положення крокового ЕМП М35SP-6 складає 0,5 с, що в порівнянні з відомими засобами в 100 разів вище.

9. Виділено основні складові похибки (сенсора, муфти, квантування) та оцінено СКВ сумарної похибки, що складає  $0,049^\circ$ . Шляхом статистичної обробки експериментальних даних оцінено випадкову складову похибки ( $0,0442^\circ$ ) та довірчий інтервал сумарної похибки ( $\pm 0,131^\circ$ ). Експериментально підтверджено, що закон розподілу похибки засобу контролю нормальний.

10. На основі отриманого сумісного закону розподілу похибки і контрольованого параметра та розрахованих номограм, оцінено помилки першого та другого роду, вірогідність ко-

нтролю (0,97), яка відповідає вірогідності контролю за допомогою вимірювального мікроскопу УИМ-200.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Усов В.В. Мікропроцесорний засіб вимірювання кутового положення крокових двигунів / В.В. Кухарчук, М.Й. Білінська, В.В. Усов // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 165 – 167.
2. Усов В.В. Математичні моделі крокового двигуна як об'єкта контролю / В.В. Кухарчук, В.В. Усов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Частина 1. – 2006. – №3. – С. 106 – 109.
3. Усов В.В. Вимірювальний канал та методика нормування похибок кутового положення крокового двигуна / В.В. Кухарчук, В.В. Усов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №2 – С. 5 – 9.
4. Усов В.В. Вимірювальний канал струму з мікропроцесорним керуванням / В.В. Кухарчук, В.В. Усов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Частина 2. – 2007. – №3. – С. 155 – 160.
5. Усов В.В. Динамічні та статичні метрологічні характеристики вимірювального каналу кутових положень крокових двигунів / В.В. Кухарчук, В.В. Усов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Частина 2. – 2008. – №4. – С. 135 – 140.
6. Усов В.В. Експериментальне оцінювання вірогідності контролю кутових положень крокових двигунів / В.В. Кухарчук, В.В. Усов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – №4. – С. 102 – 107.
7. Усов В.В. Оцінка невизначеності вимірювального каналу кутових положень крокових двигунів / В.В. Кухарчук, С.Ш. Кацев, В.В. Усов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 1. – С. 233–238.
8. Усов В.В. Метод прискореного контролю пускових характеристик крокових двигунів [Електронний ресурс] / В. В. Усов // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 2. – Режим доступу до журн.: [http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009\\_2\\_ua/2009-2.files/uk/09vvumsc\\_ua.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009_2_ua/2009-2.files/uk/09vvumsc_ua.pdf).
9. Усов В.В. Оптико-електронний засіб контролю кута повороту та кутової швидкості / В.В. Кухарчук, М.Й. Білінська, В.В. Усов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – №1. – С. 180-186.
10. Пат. 19455 (Україна), МПК(2006) G 01 B 11/26. Пристрій для нормування похибки кута повороту крокового двигуна / Кухарчук В.В., Усов В.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200607075; заявл. 26.06.2006; опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.
11. Пат. 35497 (Україна), МПК(2008) G 01 B 11/26. Пристрій автоматизованого контролю статичних та квазідинамічних характеристик крокових двигунів / Кухарчук В.В., Усов В.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200804097; заявл. 01.04.2008; опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
12. Пат. 28957 (Україна), МПК(2007) G 01 R 19/25. Пристрій для вимірювання електричного струму / Кухарчук В.В., Усов В.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200709996; заявл. 06.09.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл. № 12.
13. Пат. 19455 (Україна), МПК(2006) G 01 B 11/26. Пристрій для нормування похибок кутових положень крокових двигунів / Кухарчук В.В., Усов В.В.; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200814053; заявл. 05.12.2008; опубл.

27.04.2009, Бюл. № 8.

14. Усов В.В. Комп'ютерна програма для вимірювального каналу кута повороту крокового двигуна / В.В. Кухарчук, В.В. Усов // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 25919 від 02.10.08.
15. Usov V. Optic-electronic control device of the turning angle and angular velocity/ V. Kuharchuk , M. Bilynska, V. Usov // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2005): VIII міжнародна науково-технічна конференція, 24-27 жовтня 2005 р.: тези доповідей. – Вінниця, 2005. – С. 61.
16. Усов В.В. Вимірювальний канал та методика нормування похибок кутового положення крокового двигуна / В.В. Кухарчук, В.В. Усов // Автоматика-2006: XIII міжнар. конф. з автоматичного управління, 25-26 вересня. 2006 р.: тези доповідей. – Вінниця, 2006. – С. 183.

## АНОТАЦІЇ

**Усов В.В. Автоматизований контроль параметрів крокових електромеханічних перетворювачів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2010.

В дисертаційній роботі розроблено метод вимірювального контролю кутових положень, який дозволяє досягнути максимального значення швидкодії, що обмежується тривалістю перехідного процесу об'єкта контролю. Вдосконалено математичну модель пускових характеристик чотирифазних крокових електромеханічних перетворювачів, яка дозволяє враховувати низькочастотні провали моменту і явище змінення активного опору обмоток в результаті нагрівання. Модифіковано метод автоматизованого контролю пускових характеристик крокових електромеханічних перетворювачів, швидкодія якого більш як у 100 разів вища. Запропоновано методику автоматизованої метрологічної атестації і нормування похибок відпрацювання кроку, що дозволяє класифікувати об'єкти контролю по класам точності. Розроблено програмне забезпечення для моделювання електромеханічних процесів в крокових перетворювачах в статичному та пусковому режимах роботи. Розроблено макетний зразок засобу контролю параметрів крокових електромеханічних перетворювачів, що забезпечує максимально можливу швидкодію.

Ключові слова: кроковий електромеханічний перетворювач, засіб контролю, кутові положення, пусковий момент, швидкодія, вірогідність контролю, математична модель, мікроконтролер.

**Усов В.В. Автоматизированный контроль параметров шаговых электромеханических преобразователей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определение состава веществ. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2010.

В диссертационной работе разработан метод измерительного контроля угловых положений, который позволяет достичь максимального значения быстродействия, что ограничивается длительностью переходного процесса объекта контроля. Усовершенствована математическая модель пусковых характеристик четырехфазных шаговых электромеханических преобразователей, которая позволяет учитывать низкочастотные провалы момента и явление изменения активного сопротивления обмоток в результате нагревания. Модифицирован метод автоматизированного контроля пусковых характеристик шаговых электромеханических преобразователей, быстродействие которого более чем в 100 выше. Предложена методика

автоматизированной метрологической аттестации и нормирования погрешностей обработки шага, что позволяет классифицировать объекты контроля по классам точности. Разработано программное обеспечение для моделирования электромеханических процессов в шаговых преобразователях в статическом и пусковом режимах работы. Разработан макетный образец средства контроля параметров шаговых электромеханических преобразователей, который обеспечивает максимально возможное быстроедействие.

Ключевые слова: шаговый электромеханический преобразователь, средство контроля, угловые положения, пусковой момент, быстроедействие, достоверность контроля, математическая модель, микроконтроллер.

**Usov V.V. Automatic control of stepping electromechanical transformers parameters.**

– Manuscript.

A thesis for a Degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.11.13 – Control devices and methods and substance composition determination. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2010.

By a mathematical modeling the work features and co-operating with the sensors of stepping transformers are set. In theory grounded, that the angular measuring transformation performance is limited to duration of transient of rotor oscillation which does not exceed 0.5 s. The necessity tuning of voltage frequency is shown, that allows to avoid additional errors, as a result of premature completion of measuring process, and to promote a performance due to diminishing of voltage frequency.

The criterion of stepping transformers exiting from synchronism, which consists in comparison of the measured angular value during a transient with the basic value of step, is offered, that allows to automatize the process of starting torque measuring control.

The method of angular positions measuring control, which allows attaining the maximal performance value which is limited to duration of control object transient, is developed in dissertation work.

The mathematical model of starting characteristics of four-phases stepping electromechanics transformers is improved by the evaluation of maximal torque loading value for starting voltage frequencies. Comparatively with known, the offered model allows to take into account the low frequency torque failures and phenomenon of the winding active resistance changing as a result of heating, and also to reproduce the process of measuring control.

The method of the starting characteristics automated control of stepping electromechanics transformers is modified, thus, unlike existing, modification of starting torque measuring is offered carried out at the step-by-step diminishing of loading, beginning from maximal, to the value of loading torque at which a transformer goes out from synchronism. It is allowed to advance the measuring control performance more than in 100 times, providing necessary veracity here.

Mathematical models are got for the evaluation of dynamic and static metrology characteristics of angular positions, static and starting torque measuring channels. Basic component errors (analog-digital transformation, primary measuring transformers, connecting muffs) are selected and it is set that they have casual character. The composition laws of division of constituents of error are found, that allows estimating the indexes of control authenticity.

The method of the automated metrology attestation and setting of errors norms of working off a step is offered, that allows classifying control objects for to the classes of exactness. Software is developed for the design of electromechanics processes in the stepping transformers in static and starting work modes.

The model standard of stepping electromechanics transformers control parameters, which, unlike existing, provides a maximally possible performance is developed, and control veracity fully confirm to the rationed value of the known serial and experimental standards. The designed control device works in three norms setting modes: static and starting characteristics and angular positions, that allows to test and attestation of stepping electromechanics transformers in full.



Analytical and experimental dependences of transformation function are got. It is set that static characteristic linear, a sensitiveness is permanent, a threshold of sensitiveness is  $3.8 \cdot 10^{-4}$ . The performance of measuring transformation is limited sometimes transient which for one angular position of stepping transformer M35SP-6 makes 0.5 s, that as compared to the known facilities in 100 times higher.

Basic component errors (sensor, muff, and quantum) are selected and it is appraised standard deviation of total error which makes  $0,049^\circ$ . By the statistical processing of experimental data the casual constituent of error ( $0,0442^\circ$ ) and confidence interval of total error is appraised ( $\pm 0,131^\circ$ ). It is experimentally confirmed, that the law of distributing of control error is normal.

On the basis of the got compatible law of distributing of error and controlled parameter and expected nomograms, the errors of the first and second family, control (0,97) authenticity which confirms control authenticity for help instrumentation the microscope, are appraised.

Experimental researches of the stepping electromechanics transformers parameters automated control of are conducted; adequacy of the developed mathematical models is tested.

Keywords: stepping electromechanics transformer, control device, angular positions, starting torque, performance, control authenticity, mathematic model, microcontroller.

Підписано до друку 18.01.2010 р. Формат 29.7 × 42 1/4

Наклад 100 прим. Зам. № 2010-012

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: (0432) 59-81-59