



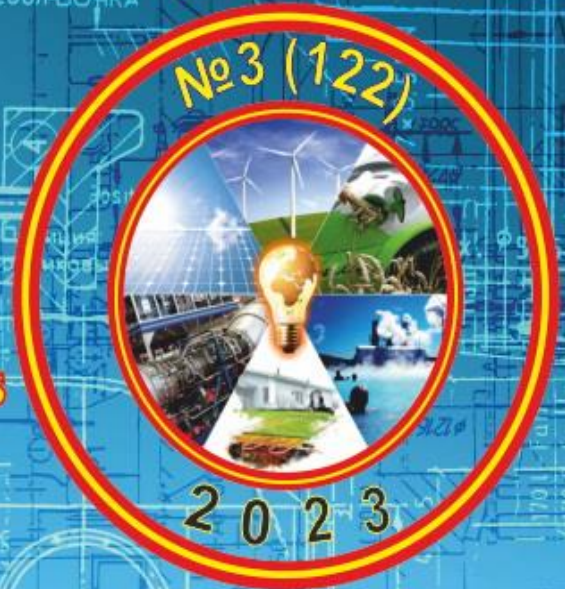
Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

DOI:10.37128/2520-6168-2023-3

**Machinery
Energetics
Transport
of Agribusiness**



**ТЕХНІКА
ЕНЕРГЕТИКА
ТРАНСПОРТ АПК**



Всеукраїнський науково-технічний журнал

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

№ 3 (122) / 2023

м. Вінниця - 2023

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

Журнал науково-виробничого та навчального спрямування
Видавець: Вінницький національний аграрний університет

Заснований у 1997 році під назвою «Вісник Вінницького державного сільськогосподарського інституту».
Правонаступник видання: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.
Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації
КВ № 16644–5116 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково – технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» /
Редколегія: Токарчук О.А. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2023. № 3 (122). С. 140.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету
(протокол № 7 від 02.12.2023 р.)*

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації №21906-11806 Р від 12.03.2016р.

*Журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» включено до переліку наукових фахових видань
України з технічних наук (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України
від 02.07.2020 року №886);*

- присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (Digital Object Identifier – DOI);

- індексується в CrossRef, Google Scholar;

- індексується в міжнародній наукометричній базі [Index Copernicus Value](#) з 2018 року.

Головний редактор

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Веселовська Н.Р. – д.т.н., професор, Вінницький національний аграрний університет

Відповідальний секретар

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік НААН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Солоня О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Граняк В.Ф. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Спірін А.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Іванчук Я.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Іскович – Лотоцький Р.Д. – д.т.н., професор, Вінницький національний технічний університет

Цуркан О.В. – д.т.н., професор, Вінницький національний аграрний університет

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Яронуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

Йордан Максимов – д.т.н., професор, Технічний університет Габрово (Болгарія)

Аудріус Жунда – к.т.н., доцент, Університет Вітовта Великого (Литва)

Відповідальний секретар редакції **Полєвода Ю.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет
Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет,
тел. (0432) 46–00–03

Сайт журналу: <http://tetapk.vsau.org/>

Електронна адреса: pophv@ukr.net



ЗМІСТ

I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

*Алієв Е.Б., Кошулько В.С., Кочережко Н.В.***ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНОГО ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ.....** 5*Igor Zozulyak***SIMULATION OF THE PROCESS OF VIBRATING SUNFLOWER DRYING.....** 14*Михалеви́ч В.М., Штуць А.А., Колі́сник М.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ ЗА РАХУНОК АНАЛІЗУ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК.....** 22*Yuri Paladiychuk, Inna Telyatnik, Marina Kubai***RESEARCH OF THE VIBRATORY FORMATION OF THE COMPASSION OF POWDER MATERIALS BY HYDRO-IMPULSE LOADING.....** 35*Яропуд В.М., Говору́ха В.Б., Дацюк Д.А.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЗАТОРА ВИСІВНОГО АПАРАТА СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР.....** 43

II. АГРОІНЖЕНЕРІЯ

*Борис М.М., Мартинюк А.В., Грицун А.В., Швець Л.В.***ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ РОТОРНИХ ОЧИСНИКІВ З ГОЛОВКАМИ КОРЕНЕПЛОДІВ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ.....** 53*Заєць М.Л.***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ КОРЕНЕПЛОДІВ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ З ВРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ НАЛИПАННЯ ҐРУНТУ НА ЇХНІЙ ПОВЕРХНІ.....** 63*Єленич А.П.***КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТРАКТОРІВ КОМПАНІЇ MASSEY FERGUSON.....** 71*Iryna Hunko, Oleksandr Kholodiuk, Roman Lipnitskiy***WAYS TO STABILIZE THE CONDITION OF THE TRANSPORTATION OF AGRICULTURAL PRODUCTS IN THE CONDITIONS OF LARGE-SCALE RUSSIAN AGGRESSION.....** 82*Olena Trukhanska***IMPROVING THE ORGANIZATION OF CENTRALIZED RESTORATION OF AGRICULTURAL EQUIPMENT PARTS.....** 90*Павленко С.І.***ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОБНИЦТВА КОМПОСТІВ З ПІДСТИЛКОВОГО ПОСЛІДУ В УМОВАХ ГОСПОДАРСТВА.....** 96*Shvets Ludmila***DEVELOPMENT OF MACHINE UNIT FOR RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF SOIL PROCESSING.....** 109

III. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

*Бойко С.М., Жуков О.А., Саблін О.І., Риков Г.Ю.***ПРИНЦИПИ ЗАСТОСУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В РЕГІОНАХ З ОБМЕЖЕНИМИ РЕСУРСАМИ ПИТНОЇ ВОДИ.....** 116*Граняк В.Ф., Кожушко О.В.***ЕКСПРЕС МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.....** 124*Svetlana Kravets***TECHNOLOGICAL PROGRESS IN SOLAR PANELS: ACHIEVEMENTS AND INNOVATIONS.....** 131



CONTENTS

I. APPLIED MECHANICS. MATERIALS SCIENCE. INDUSTRY MACHINERY BUILDING

<i>Elchyn Aliiev, Vitalii Koshulko, Nazar Kocherezhko</i> ОБІРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНОГО ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ.....	5
<i>Igor Zozulyak</i> SIMULATION OF THE PROCESS OF VIBRATING SUNFLOWER DRYING.....	14
<i>Volodymyr Mikhalevich, Andrii Shtuts, Mykola Kolisnyk</i> INVESTIGATION OF STAMPING BY WRAPPING PROCESSES THROUGH MATERIAL DEFORMATION MODELING ANALYSIS.....	22
<i>Yuri Paladiychuk, Inna Telyatnik, Marina Kubai</i> RESEARCH OF THE VIBRATORY FORMATION OF THE COMPASSION OF POWDER MATERIALS BY HYDRO-IMPULSE LOADING.....	35
<i>Vitalii Yaropud, Volodymyr Govorukha, Dmytro Datsiuk</i> EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DISPENSER OF THE SEEDING APPARATUS OF THE SELECTION SEEDER OF SMALL SEED CULTURES.....	43

II. AGROENGINEERING

<i>Mykola Borys, Andrii Martynyuk, Anatolii Hrytsun, Shvets Ludmila</i> FEATURES OF THE INTERACTION OF ROTARY CLEANERS WITH THE HEADS OF SUGAR BEET ROOTS.....	53
<i>Maksym Zayets</i> MODELING OF WORKING BODIES FOR THE EXTRACTION OF SUGAR BEET ROOTS TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF SOIL STICKING ON THEIR SURFACE.....	63
<i>Anatoliy Yelenych</i> DESIGN FEATURES OF TRACTORS MASSEY FERGUSON COMPANIES.....	71
<i>Iryna Hunko, Oleksandr Kholodiuk, Roman Lipnitskiy</i> WAYS TO STABILIZE THE CONDITION OF THE TRANSPORTATION OF AGRICULTURAL PRODUCTS IN THE CONDITIONS OF LARGE-SCALE RUSSIAN AGGRESSION.....	82
<i>Olena Trukhanska</i> IMPROVING THE ORGANIZATION OF CENTRALIZED RESTORATION OF AGRICULTURAL EQUIPMENT PARTS.....	90
<i>Sergii Pavlenko</i> TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF THE PRODUCTION OF COMPOSTS FROM LITTER MANURE IN THE CONDITIONS OF THE FARM.....	96
<i>Shvets Ludmila</i> DEVELOPMENT OF MACHINE UNIT FOR RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF SOIL PROCESSING.....	109

III. ELECTRICAL ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>Serhii Boiko, Oleksii Zhukov, Oleg Sablin, Hennadii Rykov</i> PRINCIPLES OF APPLICATION OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN REGIONS WITH LIMITED DRINKING WATER RESOURCES.....	116
<i>Valerii Hraniak, Oleksandr Kozhushko</i> EXPRESS METHOD OF DETERMINING INSTANT CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS.....	124
<i>Svetlana Kravets</i> TECHNOLOGICAL PROGRESS IN SOLAR PANELS: ACHIEVEMENTS AND INNOVATIONS.....	131



УДК 621.313.333

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-14

ЕКСПРЕС МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Граняк Валерій Федорович, к.т.н., доцент
Кожушко Олександр, студент
Вінницький національний аграрний університет

Valerii Hraniak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Oleksandr Kozhushko, student
Vinnytsia National Agrarian University

Актуальною тенденцією протягом останнього десятиріччя є зростаюча важливість автоматизованих електроприводів, які використовують асинхронні електродвигуни. Це пов'язано з розвитком теоретичних методів моделювання їхньої роботи з високою точністю і зниженням вартості силової напівпровідникової техніки, що сприяло покращенню ефективності та зменшенню вартості таких систем. Ця тенденція призвела до розширення застосування асинхронних двигунів не лише в традиційних системах електроприводу з легкими умовами пуску, але також у тягових системах та системах з великими пусковими моментами, які зазвичай використовували двигуни постійного струму.

Однак це також призвело до технічних викликів у проектуванні та експлуатації асинхронних двигунів через їхні особливі механічні характеристики, які мають децю занижене значення пускового моменту. Цей недолік може бути усунутий шляхом збільшення потужності двигуна при проектуванні, але це може призвести до зменшення ККД і збільшення вартості електроприводу.

Тому важливо проводити подальші дослідження для покращення пускових характеристик асинхронних двигунів. З урахуванням цього, асинхронні двигуни залишаються найбільш поширеними електричними машинами, які використовуються в різних галузях. Їх використання в промисловості зростає, і їхнє застосування постійно розширюється. Розробка експрес методів визначення моментних характеристик, які дозволить знизити трудомісткість визначення пускових моментів асинхронних двигунів, є актуальною завданням, яке має велике значення в практиці.

У цій статті пропонується експрес метод визначення моментних характеристик асинхронних електродвигунів, що допомагає значно зменшити складність випробування таких машин. Також розроблено загальну математичну модель для контролю моментних характеристик електричних машин, яка дозволяє однозначно встановити залежність пускового моменту асинхронного двигуна від кутового положення ротора на основі даних, отриманих під час експериментів.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, пусковий момент, кут повороту, вимірювальний контроль, математична модель, ротор, статор.

Ф. 21. Рис. 1. Літ. 9.

1. Постановка проблеми

Низька ефективність засобів контролю моментних характеристик може бути пояснена передусім обмеженими можливостями використовуваного типового методу вимірювання, що полягає у наступному: ротор ОК загальмовується, і на статор обмотки подається номінальна напруга, що призводить до швидкого нагрівання об'єкта контролю протягом короткого проміжку часу (приблизно 10 секунд). Таким чином, можливо провести лише одне вимірювання моменту і кута, або моменту і напруги живлення, поки температура обмотки змінюється від кімнатної до розрахункової робочої. Після цього ОК охолоджується протягом кількох годин, встановлюється нове кутове положення ротора і нова напруга живлення за допомогою подільної головки. Зазначений вимірювальний експеримент повторюється 18-20 разів. Отже, загальна трудомісткість контролю залежності пускового моменту від кутового положення ротора приблизно становить 36 нормо-годин для одного двигуна. Аналогічно трудомістким є і контроль залежності пускового моменту від напруги живлення.



Тож виходячи з сказаного є очевидним, що розробка методів визначення моментних характеристик асинхронних двигунів, що дозволили б підвищити продуктивність таких вимірювань, є актуальною науково-прикладною задачею.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для підвищення продуктивності засобів контролю моментних характеристик запропоновано метод неперервного контролю залежності пускового моменту від кутового положення ротора. Основна ідея методу включає в себе наступне.

Зовнішній привідний двигун з фіксованою наперед заданою швидкістю обертає ротор об'єкта контролю і одночасно вимірюється момент на його роторі та кутове положення ротора протягом одного повного оберту ротора об'єкта контролю. Швидкість обертання ротора об'єкта контролю регулюється таким чином, щоб відтворити умови досліду короткого замикання ($s \approx 1$), при цьому забезпечуючи, щоб температура обмоток статора досліджуваного двигуна за час контролю моментної характеристики не перевищила розрахункового робочого значення.

Для реалізації цього методу пропонується структурна схема автоматизованого контролю, яку представлено на рисунку 1.

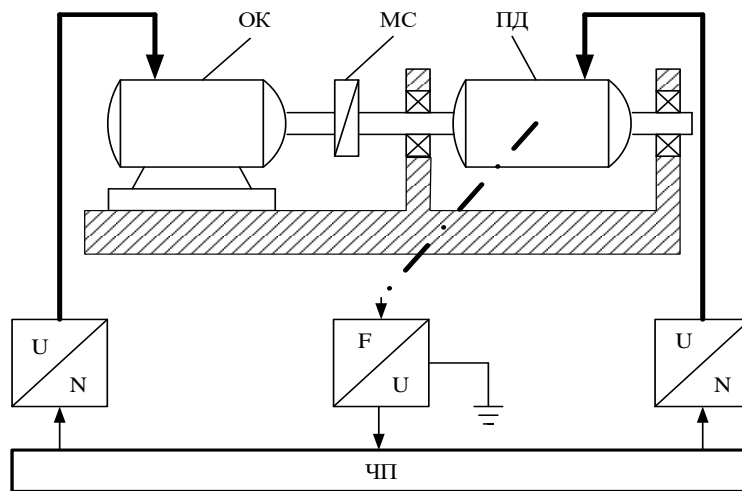


Рис. 1. Узагальнена структурна схема засобу автоматизованого контролю моментної характеристики АД

Пристрій, що реалізує запропонований метод, складається з наступних компонентів: основа, привідний двигун, вихідний вал з підшипниками, сенсор зусилля, який встановлений на основі перетворювача і з'єднаний зі статором привідного двигуна вимірювальним важелем, пускові пристрої привідного двигуна і об'єкта контролю, а також мікропроцесорну систему управління.

Метод виконується за наступним алгоритмом:

1. Об'єкт контролю жорстко закріплюється на основі вимірювального перетворювача, і його ротор з'єднується з вихідним валом привідного двигуна за допомогою муфти.
2. Живлення об'єкта контролю та привідного двигуна подається від електричної мережі за допомогою пускових пристроїв.
3. Привідний двигун з вимірювальним перетворювачем встановлено балансірно.
4. Перед включенням привідного двигуна та об'єкта контролю в електричну мережу в оперативній пам'яті мікропроцесорної системи управління встановлюються початкова адреса і розмір буфера, в якому будуть зберігатися масиви вимірних значень моменту і кута повороту ротора.
5. Потім мікропроцесорна система управління запускає привідний двигун та об'єкт контролю.
6. Привідний двигун обертає ротор об'єкта контролю через муфту. Під час обертання контрольований параметр $M_{нов}$ передається з ротора об'єкта контролю на муфту МС та на корпус привідного двигуна. При цьому на сенсор зусилля через вимірювальний важіль діє сила F_i , яка пропорційна $M_{нов}$.
7. Напряга U_i на виході сенсора зусилля, пропорційна F_i , через аналого-цифровий перетворювач записується в оперативну пам'ять.
8. Після завершення одного повного оберту ротора об'єкта контролю привідний двигун і об'єкт контролю вимикаються, а в оперативній пам'яті мікропроцесорної системи управління формується



масив вимірних значень сили F_i . При цьому адреси в цьому масиві упорядковані за кутовим положенням ротора.

9. Після цього визначається масив результатів пускового моменту, який використовується для подальшого аналізу і контролю моментних характеристик ОК.

Після цього визначається масив результатів пускового моменту:

$$M_{нов} = F_i \cdot l, \quad (1)$$

l – довжина вимірювального важеля.

Представлену схему та підхід до автоматизованого контролю можна застосовувати також під час контролю залежності пускового моменту від напруги живлення, моменту інерції ротора та динамічного моменту. Проте дане твердження потребує теоретичного обґрунтування.

Основними елементами представленої узагальненої структурної схеми експрес контролю моментних характеристик електричних машин є такі: об'єкт контролю ($M_n = f(\alpha)$, $M_k = f(U_k)$, J , M_δ); муфта спряження; привідний двигун; рухома частина вимірювального перетворювача; сенсор зусилля.

Аналіз представленої схеми дозволяє дійти висновку, що в даному випадку необхідно застосовувати поняття вимірювального контролю [1], тому що при його виконанні вимірюються контрольовані моментні характеристики. Дане поняття включає в себе як процедуру вимірювання (порівняння з мірою), так і процедуру контролю (порівняння з нормою). Оскільки результат вимірювання суттєво впливає на достовірність контролю, то в даному випадку зосередимо увагу на операціях перетворення вхідного сигналу у вихідний.

Тож розглянемо більш детально метрологічні операції, що виконуються у виділених складових наведеної узагальненої структурної схеми (рис. 1).

Модель привідного двигуна. Для здійснення автоматизації контролю залежності пускового моменту від куткового положення ротора необхідно застосувати привідний двигун, який дозволить із малою швидкістю обертати вал об'єкту контролю і забезпечить умови близькі до умов виконання досліду короткого замикання ($s \approx 1$). Під час контролю залежності $M_k = f(U_k)$, динамічного моменту, моменту інерції привідний двигун має бути знеструмленим ($s = 1$).

Основним елементом привідного двигуна є електрична машина, що може бути асинхронною, кроковою, синхронною, постійного струму і т. ін. Для побудови узагальненої математичної моделі в якості вихідної вибираємо модель узагальненої електричної машини [2], для якої справедливі наступні співвідношення:

- рівняння напруг:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s\alpha} + \frac{d}{dt} L_{s\alpha} & \frac{d}{dt} M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M & r_{r\alpha} + \frac{d}{dt} L_{r\alpha} & L_{r\beta} \omega_r & M \omega_r \\ -M \omega_r & -L_{r\alpha} r_{r\beta} + \frac{d}{dt} L_{r\beta} & \frac{d}{dt} M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} M & r_{r\beta} + \frac{d}{dt} L_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

- рівняння електромагнітного моменту:

$$M_{EM} = M \cdot (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}), \quad (3)$$

- рівняння руху

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_c = M_{EM}. \quad (4)$$

Отже система рівнянь електромеханічного перетворення енергії привідним двигуном, складається з чотирьох рівнянь, складених на основі законів Кірхгофа (2), а також рівнянь (3) і (4), які частіше всього об'єднують і отримують систему з п'яти рівнянь.

Функція перетворення рухомої частини. В якості вихідної вибираємо схему засобу контролю пускового моменту [3, 4], тому що її функціональні можливості не обмежуються тільки на контролі пускового моменту. Дана архітектура технічних засобів може бути покладена в основу побудови



засобів вимірювального контролю залежностей $M_n = f(\alpha)$, $M_k = f(U_k)$, моменту інерції ротора J та динамічного моменту M_δ .

В даному засобі контролю виконується наступна послідовність вимірювальних перетворень. Пусковий момент із вихідного вала ОК через МС, корпус ПД і вимірювальний важіль із довжиною l діє на сенсор зусилля.

Скористаємося засадами теорії електромеханічного вимірювального перетворення [2, 4, 5] і отримаємо диференційне рівняння, що описує процес руху рухомої частини запропонованого перетворювача. Під час обертання твердого тіла (рухома частина ВП) навколо своєї осі добуток моменту інерції на кутове прискорення дорівнює сумі моментів сил, що діють на тіло, відносно тієї ж осі, тобто:

$$J \cdot \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (5)$$

де J – момент інерції рухомої частини ВП; φ – кут повороту рухомої частини перетворювача; M – моменти, що діють на рухому частину перетворювача.

На рухому частину вимірювального перетворювача під час її руху діють такі моменти.

1) Обертальний момент представляє собою в загальному випадку $M(t)$, що зумовлений дією вхідної величини ($M_n = f(\alpha)$, $M_k = f(U_k)$, J , M_δ).

2) Протидійний момент, зумовлений пружними властивостями сенсора зусилля

$$M_{,p} = -C \cdot \varphi(t), \quad (6)$$

де C – жорсткість сенсора зусилля.

3) Момент заспокоєння, що дорівнює добутку коефіцієнта заспокоєння P на кутову швидкість обертання:

$$M_{,} = -P \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (7)$$

Підставимо значення отриманих моментів у (5) і матимемо:

$$J \cdot \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + P \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} + C \cdot \varphi(t) = M(t). \quad (8)$$

Перетворимо (5) до загальноновживаного вигляду:

$$\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega \frac{d\varphi(t)}{dt} + \omega^2 \varphi(t) = \frac{M(t)}{J}. \quad (9)$$

де $\omega = \sqrt{C/J}$ – власна частота вільних (недемпфованих) коливань перетворювача; $\varepsilon = P/(2 \cdot \sqrt{JC})$ – ступінь заспокоєння вільних коливань.

Розв'язок (9) у загальному випадку для довільного вхідного сигналу x має вигляд

$$\varphi(t) = \frac{1}{J} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2} \omega} \cdot e^{(-\varepsilon\omega x)} \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2} \omega x) \cdot M(t-x) dx. \quad (10)$$

Функція перетворення редуктора. Обертальний момент привідного двигуна визначається як:

$$M_{\text{ПД}}(t) = M_{\text{ЕМ}}(t) - M_{\text{ПД}}^{\text{II}}. \quad (11)$$

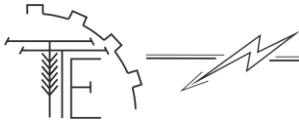
Обертальний момент на виході редуктора є сумою складових моментів:

$$M_p = M_{\text{нов}} + (M_{\text{ОВ}}^{\text{II}} + M_{\text{ВП}}^{\text{II}} + M_{\text{ПД}}^{\text{II}}) + M_{\text{МС}}^{\text{II}}. \quad (12)$$

Під час дослідження динамічних процесів у приводах [6] можна представляти ротор ОК і муфту спряження, ротор приводу і редуктор у вигляді матеріальних точок, які мають певні моменти інерції, а ідеалізовані безінерційні зв'язки між ними не мають маси і характеризуються пружністю та дисипативними властивостями [7].

3. Постановка проблеми

Для значного покращення продуктивності пропонується проводити контроль моментних характеристик у проміжку часу, коли температура обмоток статора об'єкта контролю змінюється від кімнатної до розрахункової робочої. Цей підхід повинен бути застосований під час контролю таких параметрів, як залежність пускового моменту від кутового положення ротора, залежність пускового моменту від напруги живлення, моменту інерції та динамічного моменту.

**4. Виклад основного матеріалу**

Припустимо, що зовнішні сили або моменти, прикладені до зосереджених мас. Тому обертальний момент на виході редуктора визначається з рівняння:

$$M_p^* = \frac{M_p}{i \cdot \eta} = \frac{1}{i \cdot \eta} \cdot ((M_{OB}^{\Pi} + M_{ВП}^{\Pi} + M_{ПД}^{\Pi}) + M_{МС}^{\Pi}) \quad (13)$$

де i – передавальне число редуктора; η – коефіцієнт корисної дії редуктора.

Зведення моментів інерції ротора ОК (J_{OB}) і муфти спряження ($J_{МС}$) до привідного двигуна здійснюється через квадрат передавального числа i редуктора:

$$J = J_{ДП} + \frac{J_{OB} + J_{МС}}{i^2}, \quad (14)$$

де $J_{ДП}$ – момент інерції привідного двигуна.

Методики, які дозволяли б враховувати особливості хвильової передачі редуктора, на сьогоднішній день відсутні. Тому зробимо припущення, що жорсткість хвильового редуктора має лінійну статичну характеристику [8]. У зв'язку з цим, для визначення розподілу моментів у хвильовому редукторі, складемо рівняння балансу моментів та потужностей у вигляді:

$$\begin{cases} M_{\cdot} + M_{\cdot\omega} + M_p = 0 \\ M_{\cdot} \cdot \omega_{\cdot} + M_{\cdot\omega} \cdot \omega_{\cdot} + M_p \cdot \omega_{\cdot} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

де $\omega_{ПД}$ – кутова швидкість обертання вхідного вала редуктора; $\omega_r = \omega_{ПД} / i$ – кутова швидкість обертання вихідного вала редуктора.

Тоді момент $M_{П}$ на корпусі привідного двигуна, з урахуванням раніше зроблених припущень, визначається:

$$M_{П} = -M_{ПД} - M_p. \quad (16)$$

Використавши (11) і, підставивши значення M_p з (12), отримаємо момент на корпусі привідного двигуна у вигляді:

$$M_{П} = M_{ПД} + M_{нов} + \Delta M_C + M_{МС}^{\Pi}, \quad (17)$$

де $\Delta M_C = M_{OB}^{\Pi} + M_{ВП}^{\Pi} + M_{ПД}^{\Pi}$ – моменти опору, що викликають дисипативні сили об'єкта контролю, вимірювального перетворювача, муфти спряження та привідного двигуна; $M_{МС}^{\Pi}$ – момент ексцентриситету муфти спряження МС.

Функція перетворення муфти спряження. В результаті зміщення осі обертання вала ротора об'єкта контролю і вихідного вала редуктора виникає момент $M_{МС}^{\Pi}$. Причиною появи цього моменту є ексцентриситет, тобто незбіжність осі спряжених елементів кінематичної пари. Момент ексцентриситету визначається у відповідності з [6, 8]:

$$M_{МС}^{\Pi} = -e \cdot \cos \alpha, \quad (18)$$

де e – амплітуда моменту ексцентриситету.

Функція перетворення сенсора зусилля. Якщо в якості сенсора зусилля (СЗ) застосувати, наприклад, тензорезистивний сенсор, то за рахунок пружних властивостей його мембрани створюється протидійний момент $M_{пр}$ переміщенню вимірювального важеля. В результаті цього момент $M(t)$ перетворюється в кут повороту φ . У зв'язку з тим, що мембрани таких сенсорів мають велику жорсткість C , то вимірювальні важелі мають відхиляється на малі кути. Тому для малих кутів $\varphi \cong \sin \varphi$, а залежність між кутом повороту φ та переміщенням мембрани ΔL має вигляд:

$$\varphi(t) = \frac{\Delta L(t)}{l} \quad (19)$$

Оскільки мембрана сенсора є перетворювачем зусилля F в переміщення ΔL , то її функція перетворення [9] матиме вигляд:

$$\Delta L(t) = \frac{e \cdot r^4}{\xi \cdot h^3} \cdot F(t), \quad (20)$$

де r – радіус мембрани; h – товщина мембрани; ξ – модуль пружності мембрани; $e = 0,17$.

Отже, узагальнена математична модель засобу контролю моментних характеристик електричних машин матиме вигляд:



$$\begin{cases}
 \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s\alpha} + dL_{s\alpha}/dt & dM/dt & 0 & 0 \\ dM/dt & r_{r\alpha} + dL_{r\alpha}/dt & L_{r\beta}\omega_r & M\omega_r \\ -M\omega_r & -L_{r\alpha} & r_{r\beta} + dL_{r\beta}/dt & dM/dt \\ 0 & 0 & dM/dt & r_{r\beta} + dL_{s\beta}/dt \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \\
 M_{\gamma''} = M \cdot (i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} - i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta}); \\
 \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} \cdot [M_{\gamma''}(t) - M_p(t)]; \\
 M_p(t) = \frac{M_x(t) - M_{\gamma''}(t)}{i \cdot \eta}; \quad M_{\gamma''} = -e \cdot \cos \alpha; \\
 M_y(t) = M_{\gamma''}(t) + M_x(t) - M_{\gamma''}(t); \\
 M(t) = \frac{1}{J} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \exp(-\varepsilon\omega t) \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) \cdot M_y(t) dt,
 \end{cases} \quad (21)$$

в якій перші три рівняння являють собою узагальнену модель електричної машини привідного двигуна, четверте і п'яте рівняння відтворюють фізичні процеси, що відбуваються в редукторі та муфті спряження, а останнє рівняння описує процес руху рухомої частини вимірювального перетворювача. Дана модель може бути доповнена також функціями перетворення сенсора зусилля.

5. Висновки

Запропоновано експрес метод визначення моментних характеристик асинхронних електродвигунів, що дозволяє суттєво зменшити трудомісткість дослідного випробування таких машин.

Розроблено узагальнену математичну модель засобу контролю моментних характеристик електричних машин, що дозволяє однозначно встановити функціональну залежність значень пускового моменту асинхронного двигуна від кута повороту ротора на основі вимірювальної інформації, що отримується в результаті експериментального дослідження.

Список використаних джерел

1. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Поліщук Є. С. та ін.; за ред. проф. Є. С. Поліщука. Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. 544 с.
2. Остапівський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник. Київ: Каравелла, 2018. 452 с.
3. Wang G., Zhang G., Yang R., Xu D. Robust low-cost control scheme of direct-drive gearless traction machine for elevators without a weight transducer. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012. Vol. 48, № 3. P. 996–1005.
4. Яцун М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів. Львів: видавництво Львівської політехніки, 2010. 228 с.
5. Загірняк М. В. Електричні машини: підручник. Київ: Знання, 2009. 399 с.
6. Василега П. О. Електропривод робочих машин: підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.
7. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
8. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Механотроніка: навчальний посібник. Київ, 2012. 357 с.
9. Поліщук Є. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: підручник. Львів: Львівська політехніка, 2018. 359 с.

References

- [1] Polishchuk, E.S. (2003). *Metrolohiia ta vymiryuvalna tekhnika : pidruchnyk [Metrology and measuring technology: textbook]*. Lviv: Publishing House "Beskid Beat". [in Ukrainian].
- [2] Ostashevskiy, M.O., Yuryeva, O.Y. (2018). *Elektrychni mashyny i transformatory: navchalnyi posibnyk [Electric machines and transformers: tutorial]*. Kyiv: Caravella. [in Ukrainian].
- [3] Wang, G., Zhang, G., Yang, R., Xu, D. (2012). Robust low-cost control scheme of direct-drive gearless



- traction machine for elevators without a weight transducer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48 (3), 996–1005. [in English].
- [4] Yatsun, M.A. (2010). *Ekspluatatsiia ta diahnostuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ [Operation and diagnostics of electrical machines and devices]*. Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic. [in Ukrainian].
- [5] Zahirnyak, M.V. (2009). *Elektrychni mashyny: pidruchnyk [Electric machines: textbook]*. Kyiv: Knowledge. [in Ukrainian].
- [6] Vasilega, P.O. (2022). *Elektropryvod robochykh mashyn: pidruchnyk [Electric drive of working machines: textbook]*. Sumy: Sumy State University. [in Ukrainian].
- [7] Tolochko, O.I. (2016). *Modeliuvannia elektromekhanichnykh system. Matematychni modeliuvannia system asynkronnoho elektropryvodu: navchalnyi posibnyk [Modeling of electromechanical systems. Mathematical modeling of asynchronous electric drive systems: tutorial]*. Kyiv: NTUU "KPI". [in Ukrainian].
- [8] Loveykin, V.S., Romasevich, Y.O., Chovniuk, Y.V. (2012). *Mekhanotronika: navchalnyi posibnyk [Mechanotronics: tutorial]*. Kyiv. [in Ukrainian].
- [9] Polishchuk, E.S. (2018). *Metody ta zasoby vymyriuvan neelektrychnykh velychyn: pidruchnyk [Methods and means of measuring non-electric quantities: textbook]*. Lviv: Lviv Polytechnic. [in Ukrainian].

EXPRESS METHOD OF DETERMINING INSTANT CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

A current trend during the last decade is the growing importance of automated electric drives that use asynchronous electric motors. This is due to the development of theoretical methods for modeling their work with high accuracy and a decrease in the cost of power semiconductor technology, which contributed to improving the efficiency and reducing the cost of such systems. This trend has led to the expansion of induction motors not only in traditional electric drive systems with easy starting conditions, but also in traction systems and systems with large starting torques that normally used DC motors.

However, this has also led to technical challenges in the design and operation of induction motors due to their particular mechanical characteristics, which have a slightly lower starting torque value. This disadvantage can be eliminated by increasing the motor power in the design, but this can lead to a decrease in efficiency and an increase in the cost of the electric drive.

Therefore, it is important to conduct further research to improve the starting characteristics of induction motors. With this in mind, asynchronous motors remain the most common electric machines used in various industries. Their use in industry is growing, and their applications are constantly expanding. The development of express methods for determining torque characteristics, which will allow to reduce the complexity of determining the starting torques of asynchronous motors, is an urgent task that is of great importance in practice.

This article offers an express method for determining the torque characteristics of asynchronous electric motors, which helps to significantly reduce the complexity of testing such machines. A general mathematical model for controlling the torque characteristics of electric machines has also been developed, which makes it possible to unambiguously establish the dependence of the starting torque of an asynchronous motor on the angular position of the rotor on the basis of data obtained during experiments.

Key words: asynchronous electric motor, starting torque, angle of rotation, measuring control, mathematical model, rotor, stator.

F. 21. Fig. 1. Ref. 9.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Граняк Валерій Федорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Кожушко Олександр Вікторович – студент 5 курсу групи ЕІ-22-1 (Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: kozuskoaleksandr7@gmail.com).

Valerii Hraniak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University. (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Oleksandr Kozhushko – 5 year student of EI-22-1 mag group (Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics) of Vinnitsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnitsia, Ukraine, 21008, e-mail: kozuskoaleksandr7@gmail.com).