

*В.В. ЧУМАК, М.А. КОВАЛЕНКО, І.Я. КОВАЛЕНКО, І.В. ТКАЧУК*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО ВИСОКОШВИДКІСНОГО КОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ЗМІННОГО СТРУМУ

Колекторні двигуни змінного струму потужністю від десятка до сотень ват мають широке застосування в електроприводах гнучких виробничих систем, промислових роботів, систем автоматики і транспортних засобів. Найбільш поширеним є використання універсальних колекторних електродвигунів змінного струму. Універсальними їх називають тому, що вони можуть працювати як від мережі змінного, так і постійного струму. Вони мають можливість плавно змінювати швидкість обертання приводу – його валу, який приводить у рух виконавчий механізм. Актуальним напрямком є проведення експериментальних досліджень універсальних колекторних двигунів змінного струму, які використовуються в якості приводу ручного електроінструменту. Це проводиться за рахунок використання спеціально розробленого експериментального стенду, який враховує особливості роботи таких електродвигунів. Метою роботи є експериментальне дослідження універсального колекторного двигуна змінного струму для оцінки його параметрів та характеристик. Для оцінки параметрів та характеристик такого двигуна приводу ручного електроінструменту розроблено експериментальний стенд, який враховує високу швидкість обертання вихідного валу приладу та дозволяє плавно змінювати навантаження для отримання робочих характеристик. В якості об'єкту дослідження використовується ручний електроінструмент всесвітньо відомого виробника Makita, модель GA5030. Конструктивно привідний двигун є колекторною машиною змінної напруги з послідовним збудженням. Регулювання швидкості обертання таких двигунів здійснюється за рахунок зміни напруги живлення, що подається на двигун. Розроблено структуру експериментального стенду по дослідженню високошвидкісних універсальних колекторних машин, проведено підбір всіх комплектуючих та праведно монтаж стенду, згідно з розробленою принциповою електричною та монтажною схемою. За допомогою розробленого стенду знято робочі характеристики досліджуваного двигуна P1,  $I_a$ ,  $\eta$ ,  $\cos\phi$ ,  $n$ ,  $M = f(P2)$ . Досліджуваний двигун відповідає заявленим характеристикам. Величина номінального ККД знаходиться в межах 36% при досить великому значенні коефіцієнта потужності  $\cos\phi \approx 0,98$ .

**Ключові слова:** експериментальне дослідження, універсальний колекторний двигун змінного струму, експериментальний стенд, робочі характеристики.

*V.V. CHUMAK, M.A. KOVALENKO, I.Y. KOVALENKO, I.V. TKACHUK*

## EXPERIMENTAL STUDY OF A UNIVERSAL HIGH-SPEED AC COLLECTOR MOTOR

AC collector motors with power from tens to hundreds of watts are widely used in electric drives of flexible production systems, industrial robots, automation systems and vehicles. The most common is the use of universal alternating current collector electric motors. They are called universal because they can work from both an alternating current and a direct current network. They have the ability to smoothly change the speed of rotation of the drive - its shaft, which sets the executive mechanism in motion. An actual direction is conducting experimental studies of universal alternating current collector motors, which are used as a drive for hand-held power tools. This is done through the use of a specially developed experimental stand that takes into account the peculiarities of the operation of such electric motors. The purpose of the work is an experimental study of a universal AC collector motor to evaluate its parameters and characteristics. To evaluate the parameters and characteristics of such a motor for the drive of a hand-held electric tool, an experimental stand was developed, which takes into account the high speed of rotation of the output shaft of the device and allows smoothly changing the load to obtain operating characteristics. The hand-held electric tool of the world-famous manufacturer Makita, model GA5030, is used as the research object. Structurally, the drive motor is a collector machine of variable voltage with series excitation. The speed of rotation of such motors is regulated by changing the power supply voltage supplied to the motor. The structure of the experimental stand for the study of high-speed universal collector machines was developed, all components were selected and the stand was correctly assembled, according to the developed basic electrical and assembly diagram. Using the developed stand, the operating characteristics of the engine under study P1,  $I_a$ ,  $\eta$ ,  $\cos\phi$ ,  $n$ ,  $M = f(P2)$  were recorded. The engine under study meets the stated characteristics. The value of the nominal efficiency is within 36% with a rather large value of the power factor  $\cos\phi \approx 0.98$ .

**Keywords:** experimental study, universal alternating current collector motor, experimental stand, operating characteristics.

**Вступ.** Колекторні електродвигуни змінного струму широко застосовуються в різних галузях промисловості [1]. Їх значне поширення пояснюється наявністю цілого ряду характеристик [2, 3]: високий пусковий і перевантажувальний момент, високу швидкість, широкий діапазон плавного регулювання частоти обертання.

Колекторні двигуни змінного струму потужністю від десятка до сотень ват мають широке застосування в електроприводах гнучких виробничих систем, промислових роботів, систем автоматики і транспортних засобів. За способом збудження такі двигуни діляться на двигуни з електромагнітним збудженням і з магнітоелектричним збудженням (зі збудженням від постійних магнітів) [4]. Залежно від будови, принципу дії та призначення електричні двигуни класифікують за джерелом споживаного струму (постійного чи змінного, однофазного чи трифазного), за споживаною потужністю: великою або малою [5]. За умовами застосування електродвигуни бувають спеціального та універсального призначення.

Великого поширення набуло використання універсальних колекторних електродвигунів. Універсальними їх називають тому, що вони можуть працювати як від мережі змінного, так і постійного струму [6-7]. Вони дають також можливість плавно змінювати швидкість обертання приводу – його валу, який приводить у рух виконавчий механізм [8]. Цього вимагає, наприклад, електричний привід швейної машини, шурупове-ртя, електродриля, побутової техніки. За допомогою них приводяться в рух механізми трамваїв і тролейбусів, локомотивів та електротранспортерів.

Універсальний колекторний двигун має наступні переваги над традиційним двигуном постійного струму [9]:

- менша величина пускового струму, що особливо актуально для техніки, яка використовується в побуті;
- агрегат можна включати безпосередньо в мережу, повністю відсутня необхідність в установці допоміжних пристосувань;
- швидкохідність і повна відсутність залежності від частоти мережі;

© В.В. Чумак, М.А. Коваленко, І.Я. Коваленко, І.В. Ткачук, 2023

– при наявності схеми керування, у випадку виходу з ладу електронного регулятора, сам агрегат залишається в робочому стані (але буде експлуатуватися на повну потужність).

Також, універсальні колекторні двигуни мають недоліки, які потрібно враховувати при умовах експлуатації. Тільки в цьому випадку можна бути впевненим у відповідності пристрою всім висунутим вимогам:

- має менше значення ККД, так як присутня індуктивність і втрати на перемагнічування статора;
- істотно менший максимальний обертовий момент (особливо у високошвидкісному виконанні);
- відносно невелика надійність і нетривалий експлуатаційний термін, необхідність у регулярному технічному огляді та профілактичному ремонті.

Отже, універсальні колекторні електродвигуни поєднують в собі переваги двигунів постійного струму, є доступними та мають задовільне значення питомої потужності, що обумовлює їх використання в портативних та водночас потужних електромеханічних пристроях [10].

В роботі проведено аналіз існуючих стендів для випробування універсальних колекторних машин. Основні вимоги до таких стендів були сформовані ще за радянського союзу і регламентуються відповідними ГОСТ, на основі яких сформовані основні етапи та процедури випробування таких машин [11]. Це класичні системи, що представляють собою сам досліджуваний агрегат та навантаження/привідний двигун. Для навантаження генераторів та двигунів постійного струму використовувались багатоступінчаті реостати великої потужності. Для регулювання струму збудження в обмотці збудження таких машин використовувались проволочні реостати. Програмою таких випробувань [12] передбачено отримання робочих характеристик  $P_1$ ,  $I_a$ ,  $\eta$ ,  $n=f(P_2)$ , регулювальних характеристик для двигунів паралельного та незалежного збудження  $n=f(I_3)$  та генераторів  $I_3=f(I_a)$ .

Однак, на сьогоднішній день відсутні доступні рішення по експериментальному дослідженню ручного електроінструменту. В основу існуючих стендів покладено сучасні мікропроцесорні системи в сукупності із ШІМ, цифровими вимірювальними пристроями та комп'ютеризованими засобами обробки та візуалізації отриманих результатів. Подальший аналіз результатів проводиться в ручному або автоматичному режимі. Однак, основним недоліком таких систем є їх висока вартість та необхідність у висококваліфікованому обслуговуючому персоналі, складність пуску та наладки таких систем. Тому актуальним є розробка універсального стенду для дослідження колекторних машин змінного струму. Побудованих на сучасній та доступній елементній базі.

**Актуальність.** Колекторні двигуни змінного струму є розповсюдженим класом електричних машин, які практично не мають конкуренції в ручному електроінструменті та побутових пристроях.

Актуальним напрямком є проведення експериментальних досліджень універсальних колекторних двигунів змінного струму, які використовуються в якості приводу ручного електроінструменту. Це проводиться за рахунок використання спеціально розробленого експериментального стенду, який враховує особливості

роботи таких електродвигунів.

Окремим завданням експериментального дослідження таких двигунів є підтвердження їх паспортних даних, параметрів та характеристик: споживаної потужності, ККД,  $\cos\phi$ , швидкості обертання і т.ін. Обумовлено це невідповідністю зазначених паспортних даних електродвигуна його реальним показникам. Трапляється, невідповідність як паспортних значень: зазначеної потужності, швидкості обертання так і конструктивних параметрів: матеріалу обмотки статора та ротора, типу та марки щіток і т.ін. Це суттєво впливає на експлуатаційну надійність та робочі характеристики ручного інструменту, часто призводить до передчасного виходу двигуна з ладу і значних матеріально-технічних витрат.

Однією із задач даної роботи є розробка експериментального стенду для дослідження універсальних колекторних двигунів змінного струму. Завдання ускладнюється тим, що ручний інструмент має різні габаритні розміри, а також відносно високу швидкість обертання вихідного валу, яка знаходиться в межах  $\approx 9000-15000$  об/хв.

**Метою** роботи є експериментальне дослідження універсального колекторного двигуна змінного струму для оцінки його параметрів та характеристик.

Для оцінки параметрів та характеристик універсального колекторного двигуна змінного струму приводу ручного електроінструменту необхідно розробити експериментальний стенд, який враховує високу швидкість обертання вихідного валу приладу та дозволяє плавно змінювати навантаження для отримання робочих характеристик.

**Об'єкт дослідження.** В якості об'єкту дослідження використовується ручний електроінструмент всесвітньо відомого виробника Makita, модель GA5030. Конструктивно привідний двигун є колекторною машиною змінної напруги з послідовним збудженням. Регулювання швидкості обертання таких двигунів здійснюється за рахунок зміни напруги живлення, що подається на двигун. Параметри досліджуваного електродвигуна наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – параметри досліджуваного універсального колекторного двигуна

Параметр	Величина	Одиниці виміру
Номінальна активна споживана потужність	710,0	Вт
Діапазон напруги живлення	230-246	В
Номінальний струм	3,2	А
Швидкість обертання вихідного шпинделя в режимі неробочого ходу	11000	об/хв
Коефіцієнт передачі редуктора вихідного шпинделя	3,7	–
Активна довжина/діаметр ротора електродвигуна	55/29,5	мм
Величина повітряного проміжку	0,35	мм

**Розробка експериментального стенду.** На рис. 1 наведено принципову схему експериментального стенду по дослідженню колекторних двигунів змінного струму приводу електроінструменту.

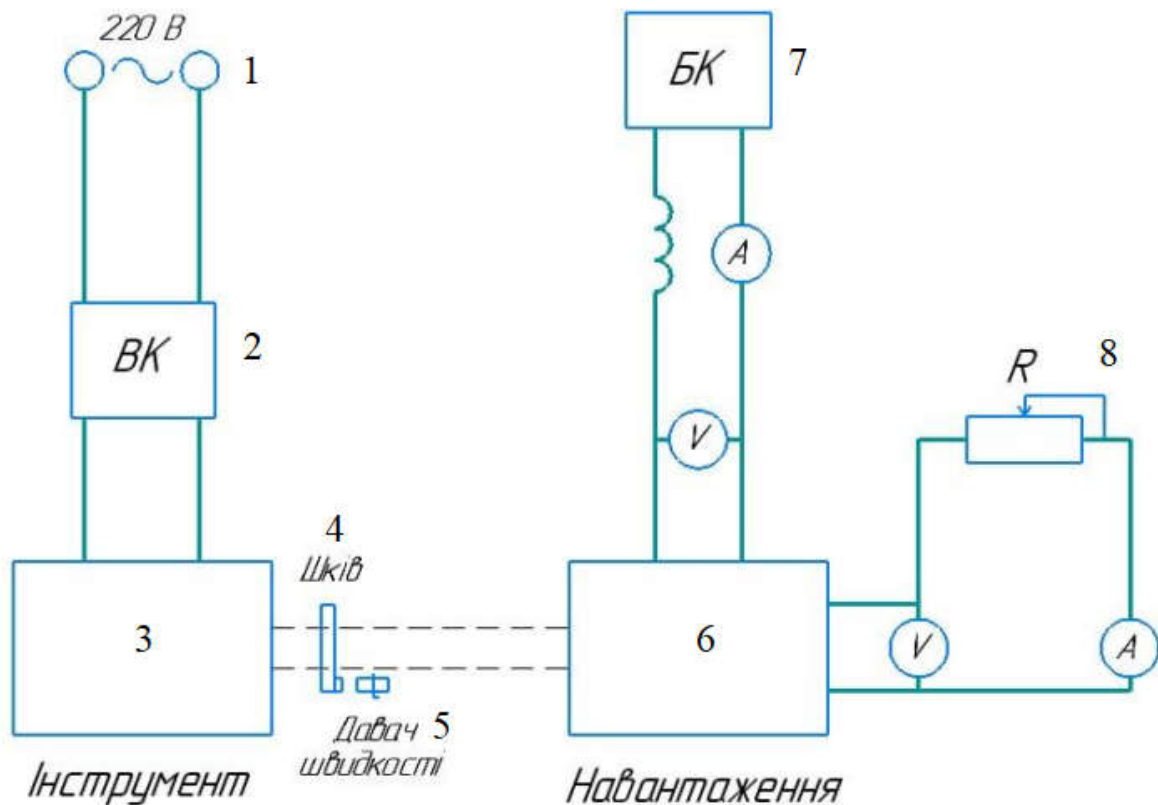


Рис. 1. Принципова схема розробленого стенду

На рис. 1 наведено: 1 – мережа живлення 220-230 В, 50 Гц; 2 – однофазний цифровий багатофункціональний вимірювальний комплекс; 3 – досліджуваний електроінструмент; 4 – шків передавальний; 5 – цифровий давач швидкості; 6 – навантаження досліджуваного інструменту; 7 – цифровий блок керування обмоткою збудження навантажувального генератора; 8 – активне навантаження досліджуваного двигуна та вимірювальні прилади.

Розглянемо більш детально всі елементи експериментального стенду. Вимірювальний комплекс (рис. 1, 2) оснащений власним рідкокристалічним дисплеєм дозволяє вимірювати вхідну напругу в межах 110-250 В і максимальним струмом до 20/100 А (без шунта та із шунтом). Також, прилад дозволяє вимірювати активну потужність навантаження, коефіцієнт потужності  $\cos\phi$ , частоту мережі та споживану енергію. Електрична схема підключення та загальний вигляд вимірювального комплексу показано на рис. 2.

В реальних умовах експлуатації ручного електроінструменту навантаженням є певний технологічний пристрій (різальний круг, свердло, бур і т.д.). Для передачі зусилля від привідного двигуна до навантажувального генератора виготовлено шків, що накручується на вал вихідного шпинделя двигуна і з'єднується його через ремінний привід із навантажувальним генератором. Передавальне число між досліджуваним двигуном на навантажувальним генератором за рахунок конфігурації шківа складає 1:1. Крім цього, в шків вмонтовано постійний неодимовий магніт, що використовується для давача швидкості.

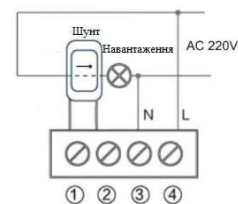


Рис. 2. Загальний вигляд вимірювального комплексу досліджуваного двигуна

В якості давача швидкості використовується цифровий вимірювальний прилад на основі давача Холла. Можливість захисту від перешкод. Даний давач швидкості має гарну стабільність, високу точність вимірювань. Зберігає останні результати вимірювань при вимкненні живлення, яке знаходиться в діапазоні: AC/DC 8-24 В, 30 mA. Діапазон вимірювань складає 10-20000 об/хв, що цілком відповідає поставленому завданню.

Навантаження досліджуваного двигуна реалізовано за класичною схемою: електродвигун-ремінна передача-навантажувальний генератор. В якості навантажу-

вального генератора використовується колекторна машина постійного струму з незалежним збудженням (рис. 3).

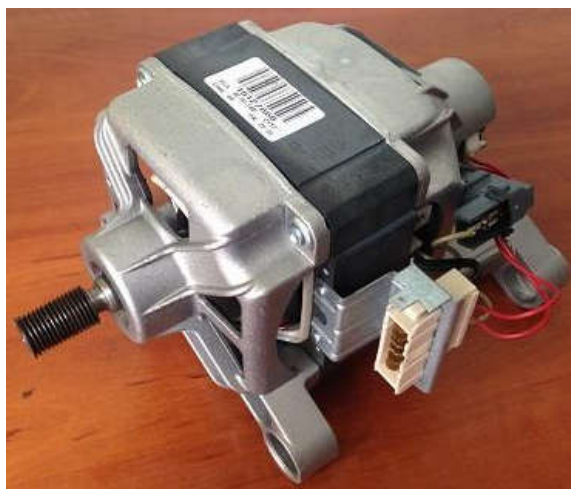


Рис. 3. Навантажувальний генератор експериментального стенду

Навантажувальний генератор виробника CESET CIM2/55-132/WHE1 можна знайти на пральних агрегатах, характеризуються потужністю  $\approx 850$  Вт та швидкістю обертання 17 000 об/хв.

Цифровий блок керування обмоткою збудження навантажувального генератора призначений для подачі та регулювання струму збудження генератора, а отже і привідного двигуна (рис. 4).

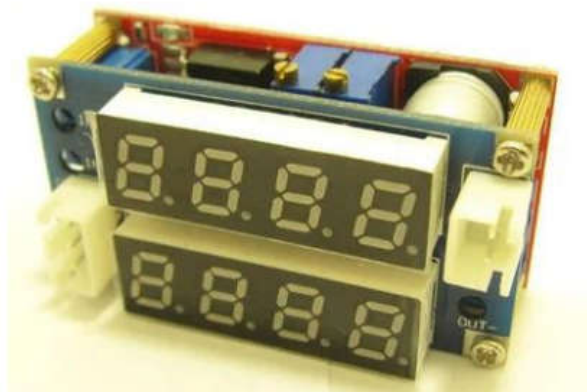


Рис. 4. DC/DC перетворювач СС/СV 5-30В

Цей перетворювач здійснює регулювання струму збудження навантажувального генератора за допомогою вбудованого потенціометра, також виконує вимірювальну функцію – показує на індикаторному дисплеї струм та напругу збудження навантажувального генератора.

В якості навантаження генератора використовується потужний проволочний реостат, оснащений цифровими вимірювальними приладами, що контролюють струм на напругу на навантаженні генератора.

Загальний вигляд змонтованого експериментального стенду по дослідженню універсального колекторного двигуна приводу ручного електроінструменту показано на рис. 5.

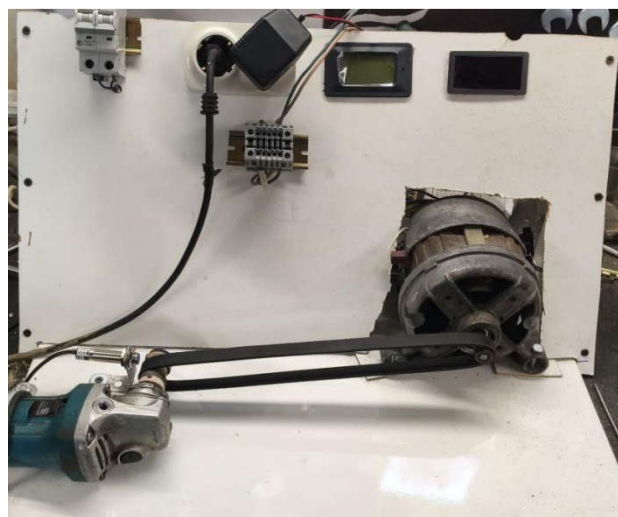


Рис. 5. Загальний вигляд розробленого експериментального стенду

У складі стенду використовується спеціальне кріплення для електроінструменту, що дозволяє проводити монтаж та дослідження інструменту різних габаритів.

**Результати дослідження.** За допомогою розробленого стенду знято робочі характеристики досліджуваного двигуна. Отримані дані наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – експериментальні дані досліджуваного двигуна

№	$I_1$ , А	$U_1$ , В	$P_1$ , Вт	$n$ , об/хв	$U_r$ , В	$I_r$ , А	$P_r$ , Вт
0	1,54	232	350	8680	0	0	0
1	2,3	231	503	7050	0	0	0
2	2,62	227	575	6400	20,4	2,1	42,84
3	2,9	224	629	6006	26,6	2,6	69,16
4	3,23	227	707	5870	28,1	3	84,3

Перша знята точка під №0 має передбачає режим неробочого ходу, без будь-якого навантаження. Точка №1 знята без навантаження генератора, але при під'єднаній ремінній передачі. Даний інструмент за паспортними даними споживає 710 Вт потужності, при номінальному навантаженні, що підтверджується отриманим значенням потужності 707 Вт при номінальному струмі 3,2 А, що свідчить про адекватність отриманих даних та точність вимірювального комплексу.

Робочі характеристики розраховувались наступним чином:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1} \quad (1)$$

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n} \quad (2)$$

$$P_2 = P_1 - \sum p \quad (3)$$

$$\sum p = p_{\text{я}} + p_{\text{з}} + \Delta p_{\text{щ}} + p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{д}} \quad (4)$$

де  $P_1$  – споживана активна потужність двигуна;  $p_{\text{я}}$  – активні втрати в обмотці якоря двигуна;  $p_{\text{з}}$  – втрати в послідовній обмотці збудження;  $\Delta p_{\text{щ}}$  – втрати в щітково-колекторному вузлі;  $p_{\text{с}}$  – втрати в магнітному осерді статора та ротора;  $p_{\text{мех}}$  – механічні втрати;  $p_{\text{д}}$  – додаткові втрати.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

Результати розрахунку робочих характеристик досліджуваного двигуна наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – результати розрахунку робочих характеристик

$P_1$ , Вт	$I_1$ , А	$n$ , об/хв	$M$ , Н·м	$P_2$ , Вт	$\eta$	$\cos\varphi$
350	1,54	8680	0	0	0	0,98
503	2,3	7050	0,042	116	0,23	0,94
575	2,62	6400	0,067	168	0,29	0,96
629	2,9	6006	0,087	203	0,32	0,96
707	3,23	5870	0,11	255	0,36	0,96

На рис. 6 показано робочі характеристики досліджуваного універсального колекторного двигуна змінного струму.

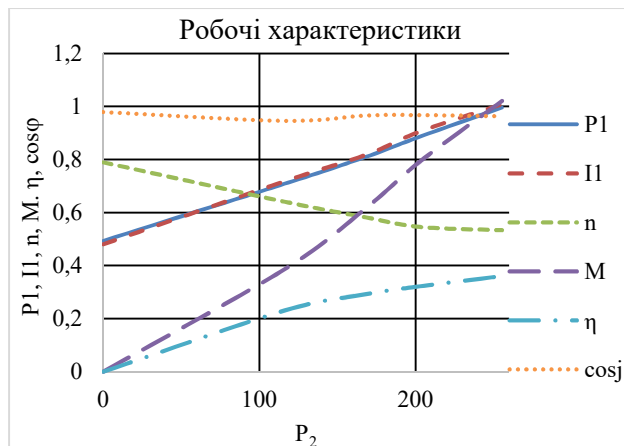


Рис. 6. Робочі характеристики досліджуваного двигуна

Досліджуваний двигун характеризується високою швидкістю обертання ротора ( $\approx 32000$  об/хв), що обумовлює високі механічні втрати та втрати в магнітному осерді. Сумарні втрати неробочого ходу складають 320 Вт. Високі механічні та магнітні втрати обумовлені високою частотою перемагнічування магнітного осердя статора та ротора та високою швидкістю обертання, що обумовлює ріст вентиляційних втрат та втрат в редукторі. За рахунок цього вже в режимі неробочого ходу коефіцієнт потужності складає  $\cos\varphi \approx 0,98$ . Високі магнітні та механічні втрати обумовлюють досить низьке значення ККД, що при номінальній споживаній потужності  $P_1=720$  Вт навантаженні становить  $\eta=36\%$ . Традиційно, характер ККД має зростаючий характер, що пояснюється зміною співвідношення між постійними та змінними втратами та ростом активного навантаження.

Швидкість обертання з ростом навантаження на валу зменшується, що пояснюється ростом активної складової струму в якорі двигуна.

Споживаний струм  $I_1$  та потужність  $P_1$  зростають з ростом навантаження двигуна, що пояснюється ростом активної складової струму статора та потужності.

Залежність активних втрат в обмотці якоря та збудження від корисної потужності  $P_2$  показано на рис. 7.

Залежність (рис. 7) носить параболічний характер, оскільки активні втрати в обмотках прямопропорційні квадрату струму.

Механічна характеристика  $n=f(M)$  досліджуваного двигуна показана на рис. 8.

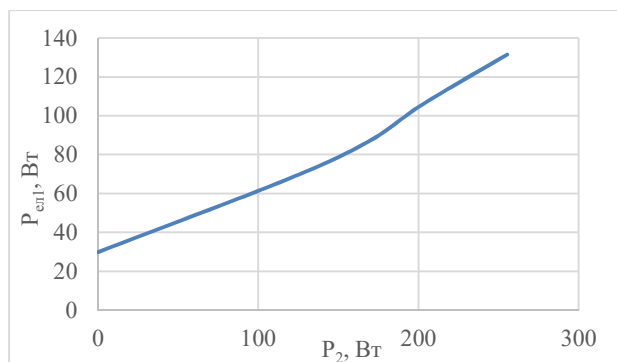


Рис. 7. Залежність активних втрат в обмотках від корисної потужності

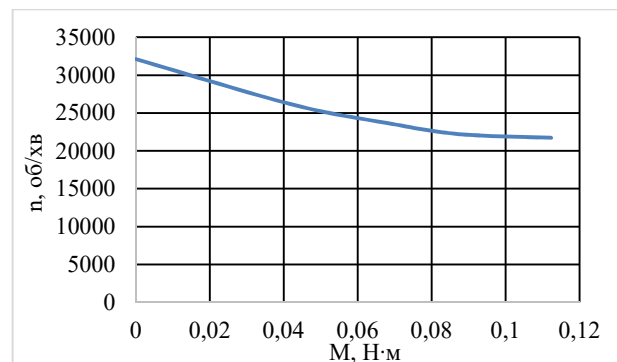


Рис. 8. Механічна характеристика досліджуваного двигуна

Механічна характеристика має класичний вигляд для двигунів постійного струму із послідовним збудженням. Оскільки даний тип двигуна характеризується значними втратами неробочого ходу, запуск без навантаження такого двигуна не є аварійним режимом і не призводить до неконтрольованого режиму розносу (критичного збільшення швидкості обертання).

**Висновки.** Розроблено автономний експериментальний стенд по дослідженню універсального високошвидкісного колекторного двигуна змінного струму із послідовним збудженням, що використовується переважно для приводу ручного електроінструменту потужністю від 500-2000 Вт, швидкістю 30000-35000 об/хв. Розроблений стенд у своєму складі має цифрові прилади, що з високою точністю і в широких межах проводять вимір всіх необхідних величин. Це розширює функціональні можливості стенду, обумовлює його універсальність та полегшує обробку результатів вимірювання та досліджень.

За допомогою розробленого стенду отримано та розраховано робочі характеристики досліджуваного універсального колекторного двигуна. Досліджуваний двигун відповідає заявленим характеристикам. Величина номінального ККД знаходиться в межах 36% при досить великому значенні коефіцієнта потужності  $\cos\varphi \approx 0,98$ , що пояснюється високим споживанням активної потужності з мережі в порівнянні із втратами, що споживаються на намагнічування магнітного осердя та створення основного магнітного потоку.

В результаті дослідження отримано всі робочі параметри, характеристики та втрати в активних та конструктивних елементах досліджуваного двигуна. Побудовано механічну характеристику, що відповідає класичним уявленням про машини постійного струму. Окремим питанням є відокремлення втрат неробочого

ходу на втрати в магнітному осерді і механічні втрати, що потребує проведення додаткових досліджень.

#### Список літератури

1. Wang W., H. Mi, Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, 2018, no.11, p. 3162. doi:10.3390/en1113162.
2. Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2020, no.13 (21), p. 5741. doi:10.3390/en13215741.
3. Radwan-Pragłowska N. Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator / Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Wegiel, Dariusz Borkowski // *Archives Of Electrical Engineering*, 2018, vol. 67(2), pp. 391-402. doi:10.24425/119648.
4. Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, no. 26, pp. 3084-3099. doi:10.3906/elk-1711-402.
5. Dehghanzadeh A., Behjat V., Banaei M. Dynamic modeling of wind turbine based axial flux permanent magnetic synchronous generator connected to the grid with switch reduced converter / Ali Reza Dehghanzadeh, Vahid Behjat, Mohamad Reza Banaei // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9(1), pp. 125-135. doi:10.1016/j.asej.2015.11.002.
6. Janon A. Making a case for a Non-standard frequency axial-flux permanent-magnet generator in an ultra-low speed direct-drive hydrokinetic turbine system / Akraphon Janon, Krittattee Sangounsak, Warat Sriwannarat // *AIMS Energy*, 2019, №.8(2), pp. 156-168. doi:10.3934/energy.2020.2.156.
7. Zhang Z. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines / Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Muyeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra // *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, pp. 815-827. doi:10.1080/0305215X.2016.1208191.
8. Mehmet Recep Minaz, Mehmet Çelebi Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, pp. 183-188. doi:10.1016/j.rinp.2016.10.026.
9. Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 173848 – 173854. doi:10.1109/ACCESS.2019.2957046.
10. V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, (5): 074 – 079. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074.
11. Коваленко М.А., Головко В.М., Коваленко І.Я., Святненко В.А. Експериментальна оцінка корекції потужності генератора автономної вітроелектроустановки. *Електротехніка та електронергетика*. 2022. №1. – с. 8-18.
12. Чумак, В., Островерхов, М., Коваленко, М., Головко, В., & Коваленко, І. (2022). Корекція вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроелектроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, 2 (8), 39–46. https://doi.org/10.20998/2079-

3944.2022.2.07.

#### References (transliterated)

1. Wang W., H. Mi, Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, 2018, no.11, p. 3162. doi:10.3390/en1113162.
2. Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2020, no.13 (21), p. 5741. doi:10.3390/en13215741.
3. Radwan-Pragłowska N. Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator. Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Wegiel, Dariusz Borkowski. *Archives Of Electrical Engineering*, 2018, vol. 67(2), pp. 391-402. doi:10.24425/119648.
4. Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine. Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, no. 26, pp. 3084-3099. doi:10.3906/elk-1711-402.
5. Dehghanzadeh A., Behjat V., Banaei M. Dynamic modeling of wind turbine based axial flux permanent magnetic synchronous generator connected to the grid with switch reduced converter. Ali Reza Dehghanzadeh, Vahid Behjat, Mohamad Reza Banaei. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9(1), pp. 125-135. doi:10.1016/j.asej.2015.11.002.
6. Janon A. Making a case for a Non-standard frequency axial-flux permanent-magnet generator in an ultra-low speed direct-drive hydrokinetic turbine system. Akraphon Janon, Krittattee Sangounsak, Warat Sriwannarat. *AIMS Energy*, 2019, No 8 (2), pp. 156-168. doi:10.3934/energy.2020.2.156.
7. Zhang Z. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines. Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Muyeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra. *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, pp. 815-827. doi:10.1080/0305215X.2016.1208191.
8. Mehmet Recep Minaz, Mehmet Çelebi Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, pp. 183-188. doi:10.1016/j.rinp.2016.10.026.
9. Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 173848 – 173854. doi:10.1109/ACCESS.2019.2957046.
10. Golovko V.M., Ostroverkhov M.Ya., Kovalenko M.A., Kovalenko I.Ya., Tsyplenkov D.V. Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, (5): 074 – 079. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074.
11. Kovalenko M.A., Holovko V.M., Kovalenko I.A., Sviatnenko V.A. Експериментальна оцінка корекції потужності генератора автономної вітроелектроустановки. *Електротехніка та електронергетика*. 2022. №1. – с. 8-18.
12. Chumak V., Ostroverkhov M., Kovalenko M., Holovko V., Kovalenko I. Корекція вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроелектроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonaliuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*, 2022, 2 (8), 39–46. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07.

Надійшла (received) 18.04.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Чумак Вадим Володимирович (Chumak Vadim Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8401-7931; e-mail: chumack\_kpi@ukr.net.

**Коваленко Михайло Анатолійович (Kovalenko Mykhaylo)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5602-2001; e-mail: kovalenko\_ma@i.ua.

**Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna Yakivna)** – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1097-2041; e-mail: 2048141@ukr.net.

**Ткачук Ігор Валерійович (Tkachuk Ihor)** – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5717-2458; e-mail: baja0073@gmail.com.