

**Коваленко М.А.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**Маляр І.В.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД З МАЛОПОТУЖНИМ ТРИФАЗНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

*Комплексні стенди призначені для визначення таких характеристик: вимірювання опору ізоляції обмоток; випробування ізоляції обмоток на електричну міцність; випробування міжвиткової ізоляції обмоток; вимірювання струму і втрат холостого ходу; вимірювання напруги і втрат короткого замикання; вимірювання активного опору обмоток; випробування постійної напруги з вимірюванням струму витоку; вимірювання мінімального пускового моменту; вимірювання максимального пускового струму; визначення коефіцієнта потужності; визначення ковзання; випробування під навантаженням (з протидією або з допоміжним моментом); визначення полярності включення котушок; вимірювання швидкості обертання; вимірювання моменту на валу; вимірювання температури; вимірювання вібрації; вимірювання рівня шуму. Стенд виступає оновленням матеріально-технічної бази лабораторії і допомагає майбутнім і нинішнім студентам працювати та отримувати знання на більш сучасному рівні та розширює уявлення про теорію електричних машин та електротехніки.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун з КЗ ротором, короткозамкнений ротор, лабораторний стенд, характеристики АД.

**Вступ.** Асинхронний двигун (АД) – це електрична асинхронна машина для перетворення електричної енергії на механічну. Робота асинхронного двигуна полягає у взаємодії між обертовим магнітним полем, яке виникає за проходження трифазного змінного струму по обмотках статора та полем ротора. Цей струм зустрічається з індуктованим полем статора в обмотках ротора, що створює механічну енергію, яка змушує ротор обертатися в напрямі обертання магнітного поля. При цьому частота обертання магнітного поля статора відрізняється від швидкості обертання ротора.

Матеріально-технічна база кафедри електромеханіки (в умовах фактичної відсутності фінансування з боку держави і з урахуванням важкого економічного становища) застаріває. Більшість із наявних стендів для дослідження характеристик машин морально застаріла і потребує оновлення.

Обладнання, що використовується для досліджень та для забезпечення навчального процесу, майже відпрацювало нормативний термін експлуатації. Крім того, є потреба в зменшенні встановлених потужностей експериментальних стендів з метою енергозаощадження.

Модернізація лабораторної бази вищих навчальних технічних закладів електромеханічного спрямування за участю студентів необхідна для розвитку та підтримки високого науково-технічного рівня підготовки майбутніх фахівців, а

також підтримки у належному стані обладнання для практичних та лабораторних занять.

**Метою роботи** є розробка експериментального стенду для дослідження асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором для дослідницьких та навчальних потреб; а також безпосередньо оновлення матеріально-технічної бази кафедри електромеханіки на основі сучасної елементної бази.

Для розробки стенду необхідно більш детально розглянути конструкцію АД та зробити висновки щодо обраного типу ЕМПЕ – асинхронного двигуна з КЗ ротором.

Оскільки пускові моменти в цьому разі порівняно невеликі, то використання систем електропривода на базі АД з ФР не є виправданим. Окрім того, релейно-контакторна система керування передбачає лише ступінчасте регулювання швидкості та більш складна для включення її в сучасну автоматизовану систему. Недоліком АД з КЗ ротором є великий пусковий струм, який у 5–7 разів перевищує струм двигуна у роботі в номінальному режимі. Однак за його використання в системі електропривода типу ПЧ-АД цей недолік суттєво згладжується. Щодо системи ПЧ-АД, то вона характеризується широким діапазоном регулювання швидкості, а отримані характеристики мають високу жорсткість.

Тому в остаточному виборі двигуна наведемо таблицю основних переваг і недоліків, які наочно показують усі за та проти для кожного двигуна, що були описані вище.

Таблиця 1

Таблиця переваг і недоліків систем електродвигунів

Показники	Системи електричного приводу			
	РКС-ДПС	РКС-АД ДПС	РКС-АД ФР	ТП-Д
Діапазон регулювання швидкості	1:3	1:3	1:5000	1:20000
Жорсткість механічних характеристик	-	-	+	+
Перевантажувальна здатність	+	+	+	+
Економічність	-	-	+/-	+

Переваги цих двох методів полягають у такому:

- обмежене обслуговування;
- досить високий ККД у машинах з підвищеною енергоефективністю;
- високі та достатні динамічні властивості, обмежений струм у динамічних режимах, пусковий момент рівний або вищий номінального, низькі значення ковзання, обмежені навантаження на елементи конструкції ротора;
- ізолюваність від процесів у мережі живлення.

До недоліків цих двох методів можна віднести:

- необхідність незалежної вентиляції за глибокого регулювання швидкості;
- зміна параметрів схеми заміщення внаслідок нагріву, що ускладнює керування;
- високі значення  $dV$ ,  $dt$  породжують стрес ізоляції;
- виникнення хвильових процесів у великих значеннях довжини з'єднувальних дротів.

#### Загальні відомості про виріб.

Стенд призначений для випробування асинхронних електродвигунів змінного струму частотою 50 Гц, напругою 220 і 380 В з короткозамкненими і фазними роторами, потужністю до 100кВт після капітального ремонту.

Схема стенда передбачає проведення прийнятно-здавальних випробувань електродвигунів з короткозамкненим та фазним ротором в обсязі вимог ГОСТ 183-74.

Встановлене на стенді обладнання дає змогу проводити такі види випробувань: дослід холостого ходу (ХХ) та дослід короткого замикання (КЗ).

Окрім цього, такі стенди дають змогу виміряти опір ізоляції обмоток щодо корпусу і між фазами обмоток; провести випробування ізоляції обмоток щодо корпусу на електричну міцність. Для збірки

експериментального стенду нам необхідні були асинхронний двигун, навантаження для асинхронного двигуна і регулятор напруги.

Був обраний асинхронний двигун, в якому замінили обмотку статора, також встановлений новий ротор з валом (рис. 1).

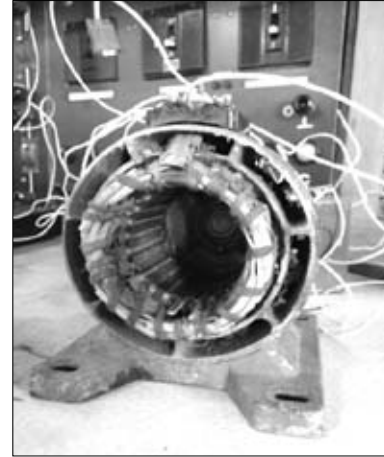


Рис. 1. АД із заміненою обмоткою статора

Оскільки нам необхідно було підключити навантаження для пуску асинхронного двигуна, ми обрали машину постійного струму в режимі генератора, що зображена на рисунку 2.

Після цього ми з'єднали за допомогою муфти машину постійного струму та асинхронний двигун.

Згодом необхідно було під'єднати регулятор напруги до АД.

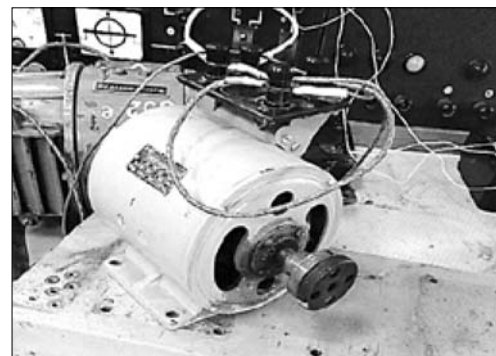


Рис. 2. Машина постійного струму

Позаяк схема підключення живлення була зібрана за схемою «зірка», а інвертор для точної роботи потребував схему «трикутник», була виконана робота з переключення двигуна на схему «трикутник».

Для забезпечення плавного регулювання і швидкодії розроблена спеціальна схема перетворювача напруги. Його використання значною мірою збільшує час безперервної роботи

трифазного двигуна і економить електроенергію. Перетворювач дає змогу довести ККД до 98%. Це досягається збільшенням частоти комутації. Механічні регулятори на таке не здатні.

Дія подібного перетворювача ґрунтується на принципі подвійного перетворення напруги.

1. На початковому етапі виконується регулювання напруги мережі шляхом його випрямлення і фільтрування, що досягається за допомогою використання системи конденсаторів.

2. Далі настає черга електронного управління, завдяки якому для струму виставляється частота, відповідна заздалегідь обраному режиму.

3. У результаті виникають прямокутні імпульси, які коригуються обмоткою статора двигуна, що дає змогу вивести її на рівень синусоїди.

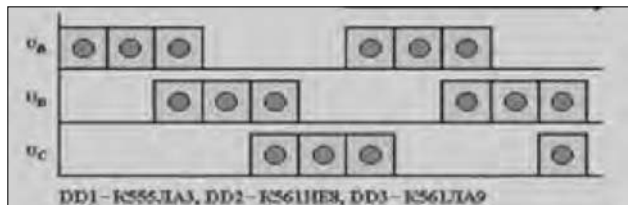


Рис. 3. Прямокутні імпульси, які коригуються обмоткою статора двигуна

Наведена нижче схема на рисунку 4 розрахована для живлення трифазного двигуна, який буде використовуватися в стенді. Пристрій призначений для двигуна, потужність якого не перевищує 0,55 кВт. Це забезпечує запас потужності, оскільки обраний двигун для стенду має потужність 0,275 кВт.

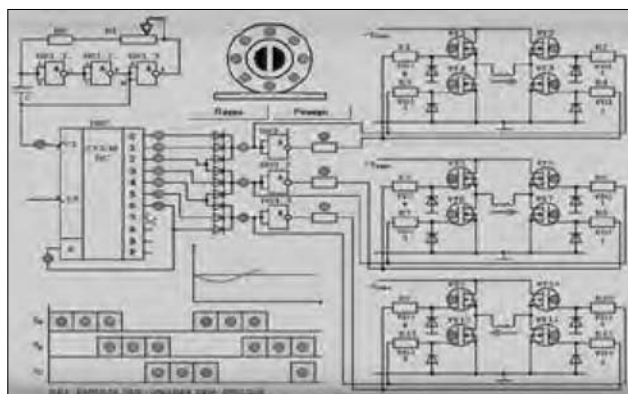


Рис. 4. Схема живлення трифазного двигуна потужністю 0,275 кВт

Після того, як всі основні компоненти були готові для підключення до експериментального стенду, була спроектована блок-схема стенду.

Спочатку було під'єднано машину постійного струму та асинхронний двигун до мережі,

а згодом відбулося під'єднання регулятора напруги до асинхронного двигуна та тахометра. Після монтажу стенду та підключення його до мережі можуть бути зняті характеристики двигуна в різних режимах роботи: холостий хід, режим короткого замикання, режим робочого ходу.

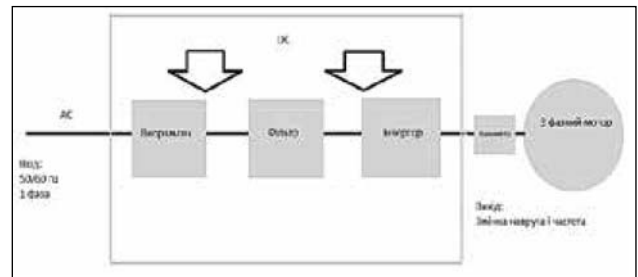


Рис. 5. Структурна блок-схема стенду

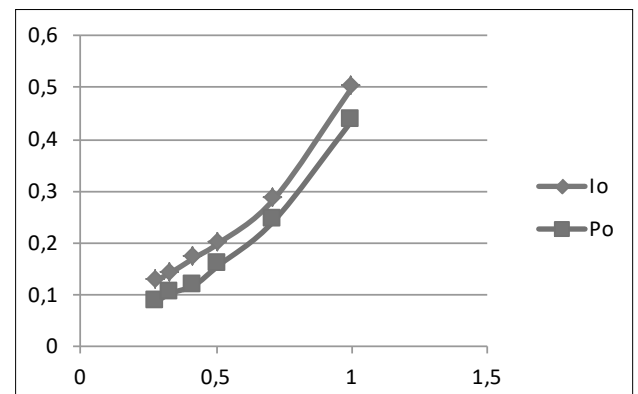


Рис. 6. Характеристика холостого ходу двигуна

Значення параметрів двигуна у відносних одиницях відображено у вигляді таблиці 2.

Наступним режимом двигуна, в який ми його переводили, був режим короткого замикання. Режим короткого замикання робився заклинюванням ротора або примусовою його зупинкою, гальмуванням, у такому режимі струм статора перевищує значення номінального струму в 5–7 разів. Цей режим є короткочасним.

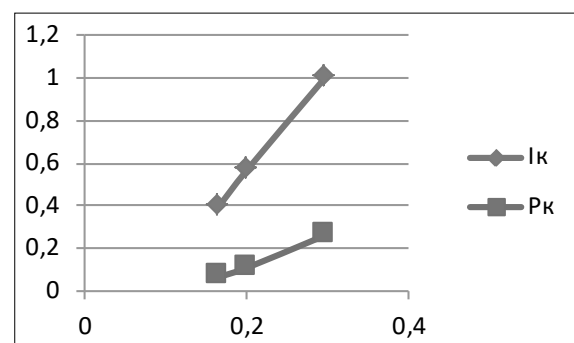


Рис. 7. Характеристика короткого замикання

Таблиця 2

## Параметри ХХ АД у відносних одиницях

І в.о.	Р в.о.	U в.о.
0,128571	0,086545	0,277273
0,142857	0,103273	0,331818
0,171429	0,118545	0,418182
0,2	0,157091	0,509091
0,285714	0,243636	0,713636
0,5	0,436364	1

Таблиця 3

## Дані характеристики короткого замикання

КЗ	U	P0	I
170	65	72	0,809249
250	44	30,6	0,462428
300	36	18	0,317919

Таблиця 4

## Значення ХКЗ у відносних одиницях

Іво	Рво	Uво
1	0,261818	0,295455
0,571429	0,111273	0,2
0,392857	0,065455	0,163636

Наступним режимом був режим робочого ходу у разі зміни напруги живлення двигуна.

Таблиця 5

## Значення даних робочого ходу

I	P1	U	I	n
Двигун	–	Генератор	Генератор	Двигун
0,80924855	378	29	6,3	1427
0,66473988	216	34	4,4	1448
0,57803468	126	37	2,75	1459
0,52023121	61,6	40	1	1472
0,40462428	15,4	0	0	1480

Після зняття значень робочих характеристик, щоб побудувати їх, потрібно знайти параметри із використанням паспортних даних двигуна.

Таблиця 6

## Шукані параметри двигуна

Рел	Рг	P1-Pг=ΣP	ΣPд	P2д
0,196465	182,7	195,3	97,65	280,35
0,132564	149,6	66,4	33,2	182,8
0,100237	101,75	24,25	12,125	113,875
0,081192	40	21,6	10,8	50,8
0,049116	0	15,4	7,7	7,7
cosφ	η	Мдв	n	s
0,707727	0,741667	1,8762	0,9513	0,0486
0,492332	0,846296	1,2056	0,9653	0,0346
0,330273	0,90377	0,7453	0,9726	0,0273
0,179407	0,824675	0,3295	0,9813	0,0186
0,057667	0,5	0,0496	0,9866	0,0133

Представимо результати розрахунків у вигляді графіків для більш чіткого розуміння процесу.

Струм холостого ходу електродвигуна невеликий і момент обертання, створюваний ним, дорівнює майже нулю. Це ми чітко бачимо з графіків.

Частота обертання в режимі холостого ходу майже дорівнює синхронній швидкості обертання. За навантаження асинхронного електродвигуна частота обертання падає, а ковзання зростає. Оскільки зростають ЕРС в обмотці ротора, то посилюється струм ротора і росте обертаючий момент. Через невеликий проміжок часу знову відновлюється стан рівноваги між навантажувальним моментом і моментом, що обертає за певної, більш низької частоти обертання.

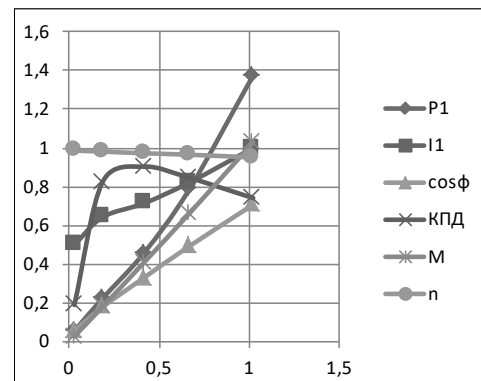


Рис. 8. Робочі характеристики двигуна потужністю 0,275 кВт

Залежність  $M2=f(P2)$  криволінійна, позаяк з ростом навантаження  $P2$  частота обертання  $n2$  дещо зменшується.

Залежність струму  $I1=f(P2)$  являє собою характеристику, близьку до прямої. Це свідчить про те, що з підвищенням навантаження струм  $I1$  збільшується практично пропорційно щодо корисної потужності. Ця залежність виходить не з початку координат, оскільки двигун у режимі холостого ходу ( $P2=0$ ) використовує з мережі струм холостого ходу  $I0$ , величина якого у асинхронних двигунів більша, ніж у трансформаторів. Останнє пояснюється наявністю механічних втрат і повітряного проміжку на шляху магнітного потоку двигуна. Струм холостого ходу в асинхронних двигунах може досягати 20–30% від номінального струму  $I1ном$ .

Залежність  $\cos\phi1=f(P2)$  показує: за малих навантажень  $\phi1$  має низькі значення (0,2 0,3). Зі збільшенням навантаження коефіцієнт потужності збільшується, досягаючи максимуму (0,75 0,85) за навантаження, близького до номінального. Останнє пояснюється тим, що за будь-якого навантаження двигуна, включаючи режим холостого ходу, двигун використовує з мережі намагнічуючий (реактивний)

струм приблизно однакової величини. Тому в режимі холостого ходу і за невеликих навантажень використовується з мережі струм має значний реактивний складник, що і є причиною низького значення  $\cos\phi$ . З підвищенням навантаження збільшується активний складник струму  $P$ , коефіцієнт потужності підвищується. У разі перевантажень, що відповідають малим частотам обертання,  $\cos\phi$  зменшується, що пояснюється збільшенням індуктивного опору обмотки ротора за збільшення ковзання.

З цього можна зробити висновки, що характеристики, які зняти з нашого досліджуваного двигуна, є дуже схожими до вигляду стандартних характеристик асинхронних двигунів, що використовуються у виробництві та у лабораторних стендах кафедри електромеханіки. Це означає, що монтаж, побудова та підключення всіх елементів двигуна були зроблені правильно. Отже, цей стенд можна використовувати як стенд для проведення лабораторних робіт та зняття основних характеристик асинхронних двигунів у майбутньому.

**Висновки.** Розроблено експериментальний стенд для дослідження асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором для дослідницьких та навчальних потреб.



Рис. 9. Готовий стенд для дослідження АД з КЗ-обмотко

Розроблений стенд дає змогу зняття робочих характеристик асинхронного двигуна в трифазному режимі; зняття характеристик холостого ходу асинхронного двигуна в трифазному режимі; зняття характеристик короткого замикання асинхронного двигуна в трифазному режимі.

Використання стенду дає змогу модернізувати лабораторне обладнання навчального закладу та підвищити якість підготовки фахівців напряму «Електромеханіка».

#### Список літератури:

1. Низкогуз П.В. Експериментальний стенд для дослідження асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Комплексна робота. Ч.2. Дипломна робота. К.: НТУУ «КПІ», 2016 р. 56 с.
2. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982 г. 504 с.
3. URL: <http://electricalschool.info/econom/721-chastotnyjj-preobrazovatel-dlja.html>

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

*Стенд выступает обновлением материально-технической базы лаборатории и помогает будущим и нынешним студентам работать и получать знания на более современном уровне; расширяет представления о теории электрических машин и электротехники. Функциональные возможности стенда заключаются в возможности снятия характеристик ЭМД и, кроме этого, такие стенды позволяют измерить сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса и между фазами обмоток; провести испытания изоляции обмоток относительно корпуса на электрическую прочность; сделать измерения сопротивления обмоток постоянному току в практически холодном состоянии; осуществить испытания межвитковой изоляции и определение коэффициента трансформации.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с КЗ ротором, короткозамкнутый ротор, лабораторный стенд, характеристики АД.

### EXPERIMENTAL STAND FOR THE INVESTIGATION OF AN INDUCTION MOTOR WITH A SQUIRREL-CAGE ROTOR

*The stand is an update of the material and technical base of the laboratory and helps future and current students to work and receive knowledge at a more modern level and broadens their understanding of the theory of electrical machines and electrical engineering. The functionality of the stand consists in the possibility of removing the EMFE characteristics and in addition, such stands allow measuring the insulation resistance of the windings relative to the housing and between phases of the windings; to test the insulation of the windings with respect to the housing for electrical strength; make DC winding resistance measurements in a practically cold state; carry out tests of interturn isolation and determination of the coefficient of transformation.*

**Key words:** asynchronous motor with squirrel-cage rotor, short-circuited rotor, laboratory stand, characteristics of asynchronous motor.