

УДК 621.313.33:62-83:625.1/.2

В. І. ДОСКОЧ^{1*}, О. Ю. БАЛІЙЧУК^{2*}

^{1*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 893 79 70, ел. пошта doskoch.volodymyr@gmail.com, ORCID 0000-0002-9991-1650

^{2*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 341 80 82, ел. пошта o.y.baliichuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-0119-1446

ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ З ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТЕНДУ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Мета. Робота спрямована на розробку методики експериментального дослідження впливу зниженої напруги живлення на робочі та механічні характеристики асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором потужністю до 5 кВт. Дослідження орієнтоване на критично важливе технологічне обладнання підприємств залізничного транспорту (локомотивних депо, ремонтних заводів), яке в сучасних умовах часто експлуатується в режимах енергопостачання з низькими якісними показниками. **Методи.** У роботі застосовано комплексний аналіз технічного оснащення залізничних підприємств, аналітичні методи дослідження властивостей асинхронних машин та методи математичного аналізу результатів випробувань. Основу експериментальної частини складає метод безпосереднього навантаження на стенді взаємного навантаження, де в якості гальмівного пристрою використано машину постійного струму з незалежним збудженням. Процес включає попереднє зняття характеристик холостого ходу та неробочого ходу для калібрування вимірювальної системи. **Результати.** Розроблено та практично апробовано схему експериментального стенду, що дозволяє фіксувати координати електроприводу (момент, частоту обертання, струм) у широкому діапазоні навантажень. Встановлено, що використання генератора типу П-42 як навантажувального пристрою дозволяє створювати регульований гальмівний момент від 0 до 35 Н·м. Це забезпечує можливість моделювання режимів роботи асинхронних двигунів потужністю до 5 кВт при варіації живлячої напруги. Описана метрологічна база підтверджує високу точність отриманих даних для подальшої побудови реальних механічних характеристик. **Наукова новизна.** Автором вперше запропоновано використовувати стенд взаємного навантаження з генератором постійного струму співмірної до двигуна потужності, що працює на мережу з регульованою напругою, спеціально для оцінки стійкості роботи нетягових споживачів залізниці в умовах нестабільного енергопостачання. Також набув подальшого розвитку метод безпосереднього навантаження машин малої потужності, який, на відміну від аналітичних моделей, дозволяє враховувати реальні електромагнітні процеси в умовах відхилення параметрів мережі від номінальних значень. **Практична значимість.** Отримана методика та результати стендових випробувань є вихідними даними для прогностичного моделювання стабільності роботи промислового обладнання ремонтних підприємств залізниць. Практичне застосування результатів дозволить розробити технічні рекомендації щодо захисту критичного обладнання від негативного впливу низької якості електроенергії, а також обґрунтувати впровадження заходів із компенсації напруги та використання відновлюваних джерел енергії для безперебійної роботи локомотивних депо.

Ключові слова: нетягові споживачі, електрообладнання підприємств залізничного транспорту, стенд взаємного навантаження, критично важливе обладнання, робочі характеристики асинхронних двигунів, експериментальне визначення координат асинхронних електроприводів.

Вступ

В основі електроприводу більшості технологічного обладнання підприємств залізничного транспорту лежить асинхронний двигун із короткозамкненим ротором. За своїм виконанням це двигуни загальнопромислових серій – 4А, АІР, та ін. потужністю для основного обладнання від 0,37 кВт до 15 кВт.

Названі двигуни в умовах локомотивних

депо та ремонтних підприємств працюють від мережі електричної енергії, де характеристики напруги відрізняються недостатньою якістю. При цьому спостерігається погіршення робочих властивостей названих двигунів.

Попри те, асинхронний двигун повинен виконувати свою основну функцію – реалізовувати номінальний момент при зміні в певних межах живлячої напруги та частоти, обумовлених режимами роботи мережі.

Постановка завдання дослідження

Підприємством-виробником на вимогу [1] в об'ємі контрольних випробувань проводиться мінімальний перелік досліджень параметрів асинхронного двигуна: вимірювання опору обмоток постійному струму в холодному стані; визначення струму і втрат холостого ходу; визначення напрямку обертання, чи порядку чергування фаз; випробування ізоляції підвищеною напругою.

Також вказаний перелік, відповідно до [1] може бути доповнений випробуваннями на короткочасне перевантаження двигуна обертовим моментом та визначення мінімального обертового моменту при пуску. Названі параметри оцінюються за номінальної напруги.

Для двигунів критично важливого технологічного обладнання локомотивних депо та ремонтних підприємств залізничного транспорту в умовах реальної експлуатації характерним є живлення напругою при значних відхиленнях від нормативних значень. Таким чином, практичний інтерес при оцінці працездатності такого обладнання являють собою робочі характеристики не стільки при номінальній напрузі, скільки в умовах реальної експлуатації, коли відхилення напруги є суттєвими.

Мета дослідження

Розробити методику експериментального дослідження впливу зниженої напруги живлення на робочі характеристики асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором потужністю до 5 кВт, які отримують з використанням стенду взаємного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню дослідження робочих характеристик асинхронних двигунів протягом останнього часу приділено значну кількість публікацій. Частина робіт [2 – 3] присвячується безпосередньо експериментальному визначенню параметрів та робочих характеристик на стендах взаємного навантаження або подібних, а більшість проаналізованих робіт [4 – 10] – методам аналітичної їх побудови на основі розрахункових даних, математичного та імітаційного моделювання з використанням пакету MATLAB.

В роботі [2] автори порівнюють основні традиційні методи дослідження характеристик асинхронних двигунів з усталеними еталонними методами з метою пошуку найбільш точного методу визначення характеристик двигуна, що є критично важливим тоді, коли мова йде про

здійснення ефективного векторного керування. Запропонований авторами експериментальний метод безпосереднього визначення характеристик двигуна має похибку в 6,5% у порівнянні з іншими обчислювальними методами, основаними на ряді припущень, похибка яких становить 19,65%.

Авторами в [3] розглядається ряд схемних рішень систем взаємного навантаження при дослідженні асинхронних двигунів тягового рухомого складу. Розглянуто системи «асинхронний двигун- асинхронний генератор» з механічним перетворювачем частоти у вигляді редуктора, ремінного варіатора або гідравлічної передачі; систему «асинхронний двигун – синхронний генератор» із ланкою постійного струму, реалізованою за допомогою двомашинного мотор-генераторного агрегату; систему «асинхронний двигун – асинхронний генератор» із одним або двома напівпровідниковим частотними перетворювачами як з'єднаних ланкою постійного струму, так і не з'єднаних нею; систему «асинхронний двигун – генератор постійного струму»; систему «асинхронний двигун – синхронний генератор». В ході порівняльного аналізу виявлено переваги і недоліки, сформульовано експлуатаційні обмеження розглянутих систем.

В [4] порівняно статичні робочі характеристики асинхронного двигуна, отримані в ході імітаційного моделювання в системі MATLAB при реалізації принципів FOC-керування (Field Oriented Control), яке наближає характеристики асинхронного двигуна до характеристик машин постійного струму, та скалярного керування. В результаті продемонстровано переваги FOC, як кращого метода керування електроприводами змінного струму.

Роботу [5], присвячено моделюванню стаціонарних та перехідних режимів трифазних асинхронних двигунів, та їх робочих характеристик. Розглянута в [5] MATLAB-модель дозволяє зімітувати різні методи пуску двигуна, для оцінки їхнього впливу на пускові струми, пусковий момент та його загальну продуктивність.

В роботі [6] показано метод моделювання механічних характеристик асинхронних двигунів на основі класичного виразу для механічної характеристики з урахуванням всіх параметрів схеми його заміщення. Описаний тут метод підходить для швидкої валідації даних, отриманих із аналітичних виразів, або для порівняння результатів моделювання із експериментальними даними, або результатами, отриманими на інших моделях.

При необхідності отримати високо адекватну

статичну характеристику асинхронного двигуна необхідно враховувати змінні параметри математичної моделі асинхронного двигуна, як це показано в [7]. В представленій моделі враховано змінні індуктивність намагнічування, а також момент інерції обертових мас, з'єднаних із ротором, що підвищує адекватність результатів моделювання.

В роботах [8, 9] міститься практичний алгоритм побудови механічних характеристик асинхронних двигунів на основі аналітичних розрахунків. Так, в [8], представлено метод розрахунку механічних характеристик трифазних асинхронних двигунів, які живляться від однофазної мережі, де обертове магнітне поле створюється завдяки вмиканню послідовно в одну фазу конденсаторів. Задача розв'язується як крайова у трифазній нерухомій системі координат. В математичній моделі двигуна враховується насичення магнітопроводу та витіснення струму. А в роботі [9] запропоновано алгоритм розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором при різних частотах напруги живлення. В основу розрахунку покладено математичну модель асинхронного двигуна, в якій також враховується насичення магнітопроводу і витіснення струму в стержнях короткозамкненого ротора. Електромагнітні процеси у двигуні описуються системою нелінійних рівнянь електричної рівноваги, записаної в перетворених до ортогональних осей координат, яка розв'язується ітераційним методом Ньютона разом з методом продовження по параметру.

Дослідження [10] вивчає динамічну поведінку асинхронних двигунів шляхом розробки та перевірки чотирьох різних математичних моделей, призначених для перехідних та пускових режимів. Ці моделі, виражені в системах координат α , β та d , q , аналізують частоту обертання, електромагнітний момент та профілі струму з різним рівнем складності, включаючи підходи на основі струму, потокозчеплення та електромагнітної постійної часу обмотки ротора. Варто відзначити, що моделі потокозчеплення чудово враховують складні перехідні явища, тоді як моделі на основі струму спрощують інтеграцію з дослідженнями енергосистем. Ці результати забезпечують надійну основу для аналізу роботи асинхронних двигунів за різних умов, таких як сценарії небалансу напруги та виходу з ладу, що дозволяє оптимізувати роботу двигунів в енергоємних галузях промисловості.

Проведений аналіз свідчить, що дослідження робочих та механічних характеристик

асинхронних двигунів є безумовно своєчасним та актуальним завданням при вирішенні проблеми працездатності промислових електроприводів.

Основний матеріал дослідження

Як визначено в [1, 3, 11], в обов'язкову програму контрольних (приймально-здавальних) випробувань асинхронних машин входять:

1. Вимірювання опору ізоляції обмоток по відношенню до корпусу машини і між обмотками.
2. Вимірювання опору обмоток постійному струму в практично холодному стані.
3. Визначення коефіцієнта трансформації (для двигунів із фазним ротором).
4. Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.
5. Випробування міжвиткової ізоляції статора і фазного ротора на електричну міцність.
6. Визначення струму та втрат холостого ходу.
7. Визначення струму і втрат короткого замикання.

Причому, як при масовому виробництві [1, 11], так і проведенні післяремонтних випробувань [3] обов'язковими для кожної окремої машини залишаються лише визначення струму і втрат холостого ходу, випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.

Специфічними для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором є визначення струму та втрат холостого ходу та короткого замикання; визначення коефіцієнту корисної дії (ККД), коефіцієнта потужності, ковзання; визначення максимального, мінімального і початкового обертового моментів [11].

Початковий пусковий обертовий момент можна визначити із досліду короткого замикання, а максимальний (критичний, або «перекидаючий» момент) та мінімальний момент в процесі пуску може бути визначений із залежності обертового моменту від частоти обертання при навантаженні двигуна на генератор постійного струму. Даний дослід може виконуватися як із поглинанням енергії навантажувального генератора, так і з поверненням її [12].

Для вимірювання абсолютного значення обертового моменту може бути використано генератор постійного струму із незалежним збудженням при незмінному $I_z = const$, який працює на мережу постійного струму із регульованою напругою. Зміну навантаження двигуна

здійснюють регулюванням напруги мережі.

Для визначення шуканої кривої $M = f(n)$ асинхронного двигуна при випробуваннях вимірюють струм якоря генератора I_a та частоту обертання двигуна n (об/хв). Величину обертового моменту визначають за виразом:

$$M = 9,55 \cdot U_0 \cdot \frac{(I_a + I_0)}{n}, \quad (1)$$

де U_0 - електрорушійна сила (ЕРС) навантажувального генератора в режимі холостого ходу (ХХ), В; I_0 - струм холостого ходу генератора, А. Ці величини визначають попередньо із дослідів холостого ходу генератора постійного струму незалежного збудження при сталій частоті обертання та в двигунному режимі при сталому струмі збудження при знятті характеристики $I_0 = f(n)$ відповідно. Очевидно, що ці два досліді передують виконанню основного випробування.

В якості навантажувального генератора пропонується використовувати генератор постійного струму із незалежним збудженням типу П-42.

Схему дослідів холостого ходу генератора постійного струму із незалежним збудженням показано на рис. 1. На схемі умовними позначками показано: SA1, SA2 – двополюсний та триполюсний рубильники відповідно; FU1...FU5 – плавкі запобіжники; PA1 – амперметр постійного струму типу М2015; R1 – регульовальний реостат в колі обмотки збудження генератора постійного струму; G – генератор постійного струму типу П-42; М – асинхронний двигун; PV2 – вольтметр типу Е59; ТГ – датчик тахометра (первинний перетворювач) ДТ-5М; PV1 – тахометр ТЕ-4В

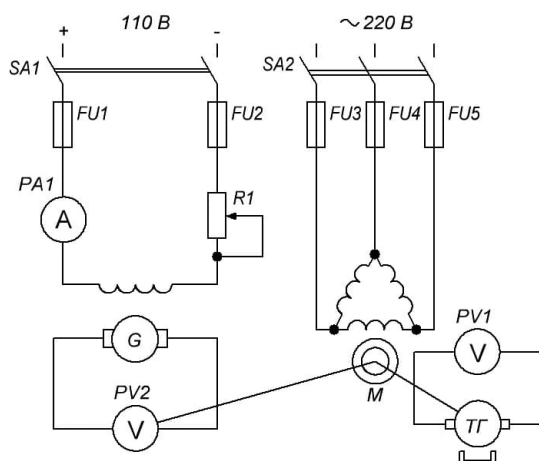


Рис. 1. Схема дослідів холостого ходу генератора постійного струму

Метод зняття характеристики холостого ходу [12] полягає в тому, що струм збудження

генератора постійного струму плавно знижують, починаючи із максимального значення до нуля. Змінюють полярність обмотки збудження і плавно підвищують струм збудження до максимального значення, а потім знову знижують до нуля та, змінивши полярність, плавно підвищують до максимального значення. Характеристикою холостого ходу буде крива $U_0 = f(I_a)$, абсциси якої є середньоарифметичними абсцисами аналогічних кривих при розмагніченні та намагніченні машини струмом збудження прямої полярності.

Частоту обертання двигуна при холостому ході визначають при номінальній напрузі в колі якоря і номінальному струмі збудження. При цьому температура обмотки збудження повинна бути близькою до робочої [12]. Для виконання названого дослідів використовуємо схему, яку представлено на рис. 2.

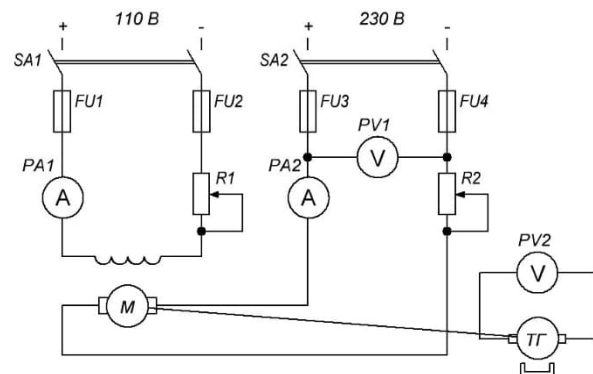


Рис. 2. Схема дослідів з визначення $I_0 = f(n)$ машини постійного струму в режимі двигуна

На рис. 2: SA1, SA2 – двополюсні рубильники; FU1...FU4 – плавкі запобіжники; PA1, PA2 – амперметри постійного струму типу М2015; PV1 – вольтметр типу Е59; R1 – регульовальний реостат в колі збудження машини постійного струму; R2 – пусковий реостат в колі якоря машини постійного струму; М – машина постійного струму типу П-42; ТГ – датчик тахометра ДТ-5М; PV2 – тахометр ТЕ-4В.

Паспортні дані генератора П-42 наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики генератора П-42				
P_H , кВт	U_H , В	I_H , А	n_H , об/хв	η_H
3,6	230	15,65	1450	0,775

Метрологічні властивості електровимірювальних приладів, які використовуються в цих дослідів, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Метрологічні властивості застосованих електровимірювальних приладів [13 – 16]

Тип	Найменування	Діапазон виміру	Клас точності (похибка)
E59	Вольтметр	0...600 В	0,5
M2015	Амперметр	0...30 А	0,2
ДТ-5М	Первинний перетворювач	0...9000 об/хв	-
ТЕ-4В	Тахометр	500...1000 об/хв	±55 об/хв
		1000...4000 об/хв	±40 об/хв

Таблиця 3

Характеристика холостого ходу при збудженні машини струмом «прямої полярності»

I_3, A	0	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,61	0,65	0,71
$U_0 \text{ розм, В}$	6	126	142	158	174	188	200	212	218	230
$U_0 \text{ нам, В}$	-6	112	132	150	166	180	194	208	217	230
$U_0, \text{В}$	0	119	137	154	170	184	197	210	217,5	230

Таблиця 4

Характеристика холостого ходу при збудженні машини струмом «зворотної полярності»

I_3, A	0	-0,3	-0,35	-0,4	-0,45	-0,5	-0,55	-0,6	-0,65	-0,71
$U_0 \text{ розм, В}$	-6	-127	-144	-159	-174	-189	-202	-212	-221	-230
$U_0 \text{ нам, В}$	6	-114	-133	-150	-167	-182	-196	-208	-220	-232
$U_0, \text{В}$	0	-120,5	-138,5	-154,5	-170,5	-185,5	-199	-210	-220,5	-231

Використовуючи описаний вище метод отримання характеристики холостого ходу, фіксуємо характеристики машини постійного струму типу П-42 при збудженні струмом «прямої полярності» (див. табл. 3) та «зворотної полярності» (див. табл. 4).

За експериментальними даними із табл. 3 та 4 побудовано графічні залежності $U_0 = f(I_3)$ при прямій та зворотній полярності струму збудження машини. Графіки цих залежностей показано на рис. 3 та 4 відповідно.

Як можна бачити на рис. 3 та 4, знята за описаним методом характеристика холостого ходу фактично являє собою середню лінію повної петлі гістерезису (в інших координатах) при намагніченні та розмагніченні електротехнічної сталі, використаної при виготовленні осердь даної машини.

В результаті проведення досліду неробочого ходу в режимі двигуна для машини П-42 відповідно до схеми на рис. 2 визначено, що струм $I_0 = 0,7 \text{ A}$, і становить від номінального струму машини:

$$\frac{I_0}{I_{\text{ном}}} = \frac{0,7}{15,65} \cdot 100 = 4,5\%,$$

що є деяким середнім значенням для машин постійного струму потужністю до 10 кВт [17].

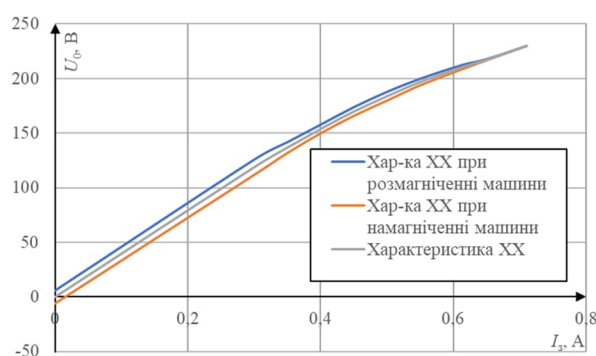


Рис. 3. Характеристики холостого ходу машини постійного струму типу П-42 в режимі генератора при збудженні струмом «прямої полярності»

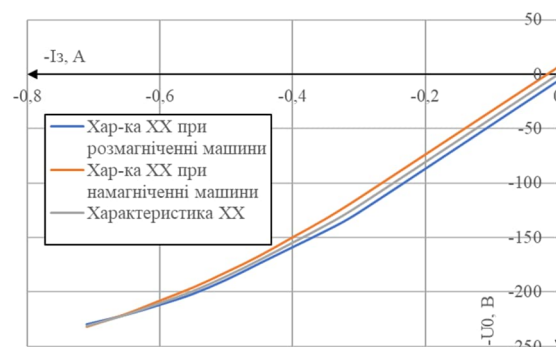


Рис. 4. Характеристики холостого ходу машини постійного струму типу П-42 в режимі генератора при збудженні струмом «зворотної полярності»

Якщо прийняти, що механічна характеристика двигуна, який приводить в рух генератор постійного струму, «жорстка» і його частота обертання в залежності від навантаження змінюється в діапазоні від 1490 об/хв (при холостому ході) до 1440 об/хв (при номінальному навантаженні), то момент, який забезпечить стенд із навантаженням у вигляді генератора типу П-42, визначений за виразом (1) при «холостому ході» генератора ($I_a = 0$ та $U_0 = 230$ В відповідно до рис. 3) та при струмі збудження $I_s = 0,71$ А, буде мінімальним і становитиме:

$$M_{\min} = 9,55 \cdot E_0 \cdot \frac{I_0}{n} = 9,55 \cdot 230 \cdot \frac{0,7}{1490} = 1,03 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

З урахуванням властивості електричних машин витримувати 25% перевантаження струмом, максимальний струм генератора буде $I_{a \max} = 1,25 \cdot I_n = 1,25 \cdot 15,65 = 19,6$ А, а, отже, найбільший момент навантаження, який реалізує цей генератор, складе:

$$M_{\max} = 9,55 \cdot E_0 \cdot \frac{I_{a \max} + I_0}{n_n} = 9,55 \cdot 230 \cdot \frac{19,6 + 0,7}{1440} = 31 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тобто, момент, створюваний системою навантаження стенду, лежить в діапазоні від 0 до $1,1M_{\text{ном}}$.

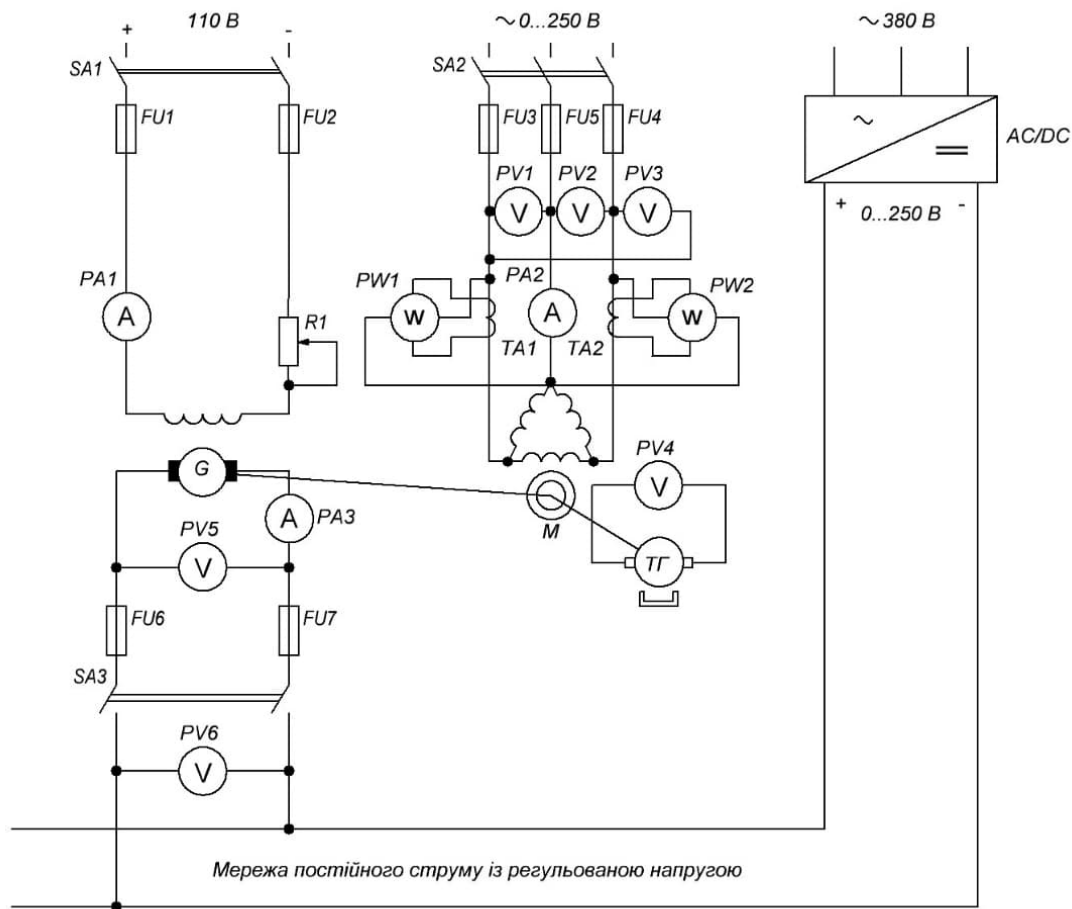


Рис. 5. Схема експериментального визначення координат асинхронного електроприводу на стенді із генератором постійного струму

Схема дослідів по визначенню координат асинхронного електроприводу на стенді із генератором постійного струму в якості навантаження показано на рис. 5.

Як можна бачити із рис. 5, живлення досліджуваного двигуна М здійснюється від регульованого джерела змінної трифазної напруги.

Вольтметри PV1...PV3 вимірюють лінійне значення цієї напруги. Амперметром PA2 вимірюємо лінійний струм, споживаний двигуном. Активну потужність, яку споживає досліджуваний двигун визначаємо методом двох ватметрів PW1, PW2, межі вимірювання яких за струмом розширено трансформаторами струму TA1 та

ТА2. Мережа постійного струму із регульованою напругою отримує живлення від тиристорного агрегату АТ320/230-1, позначеного на схемі у вигляді блоку АС/DC. Генератор постійного струму підключається до мережі через рубильник SA3, при цьому напругу мережі та генератора узгоджуємо за показаннями вольтметрів PV5, PV6. Струм якоря генератора визначаємо за показами амперметра PA3. Струм

збудження генератора контролюємо амперметром PA1.

Вал досліджуваного двигуна з'єднано із первинним перетворювачем тахометра ТГ, який навантажено на вольтметр PV4. За його показами визначаємо частоту обертання двигуна.

Основні характеристики та метрологічні властивості перелічених вище засобів вимірювальної техніки наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Метрологічні властивості засобів вимірювальної техніки, використаних в схемі на рис. 5

Тип	Найменування	Діапазон виміру	Клас точності (похибка)
E59	Вольтметри PV1...3, 5...6	0...600 В	0,5
M2015	Амперметри PA1, PA3	0...30 А	0,2
E59	Амперметр PA2	0...5 А	0,5
ДТ-5М	Первинний перетворювач ТГ	0...9000 об/хв	-
И54М	Трансформатори струму ТА1, 2	0,5...50 А	0,2
Д5065	Ватметри PW1,2	0...1500 Вт	0,5
ТЕ-4В	Тахометр PV4	500...1000 об/хв	±55 об/хв
		1000...4000 об/хв	±40 об/хв

Використовуючи стенд, схему якого представлено на рис. 5, можна фіксувати безпосередньо криву $M = f(n)$, а також робочі характеристики у вигляді залежностей P_1 , I_1 , η , $\cos\varphi$, $s = f(P_2)$ як при $U_1 = U_{ном}$, так й при значеннях напруги $U_1 < U_{ном}$ при сталій її частоті $f_1 = const$ в діапазоні навантажень за моментом від 0 до 35 Н·м для двигунів потужністю до 5 кВт і синхронною частотою обертання 1500 об/хв.

Так як переважна більшість електроприводів критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту має в основі асинхронний двигун потужністю до 5 кВт, то використання розглянутого схемного рішення дозволяє експериментально досліджувати вплив зниження напруги на окремі робочі характеристики і координати електроприводів в режимах близьких до умов реальної експлуатації.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше запропоновано для дослідження впливу зниження напруги живлення на робочі характеристики асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором потужністю до 4,5...5 кВт використовувати стенд взаємного навантаження, де в якості джерела гальмівного моменту використовується генератор постійного струму типу П-42 співмірної із досліджуваним двигуном потужності, що працює на мережу постійного струму із регульованою напругою.

Отримав подальший розвиток метод безпосереднього навантаження асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором малої потужності

при експериментальному дослідженні їх робочих та механічних характеристик на випробувальних стендах.

Отримана методика та результати стендових випробувань є вихідними даними для прогностичного моделювання стабільності роботи промислового обладнання ремонтних підприємств залізниць. Практичне застосування результатів дозволить розробити технічні рекомендації щодо захисту критичного обладнання від негативного впливу низької якості електроенергії, а також обґрунтувати впровадження заходів із компенсації напруги та використання відновлюваних джерел енергії для безперебійної роботи локомотивних депо.

Висновки

Розроблено методику експериментального визначення координат асинхронного електроприводу потужністю до 5 кВт та оцінки впливу на них зниження живлячої напруги.

Запропоновано схему дослідного стенду взаємного навантаження, де в якості джерела регульованого моменту опору використовується генератор постійного струму із незалежним збудженням, що працює на мережу із регульованою напругою.

Встановлено, що запропонований стенд може розвивати гальмівний момент в діапазоні 0...35 Н·м, таким чином моделюючи навантаження двигуна в межах від 0 до $1,1M_{ном}$, що для більшості електроприводів відповідає їх реальним умовам експлуатації.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (ІЕС 60034-1:2017, ІДТ). На заміну ГОСТ 28173-89 (МЭК 34-1-83); чинний від 2019-08-01. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 74 с.
2. Experimental Benchmarking of Existing Offline Parameter Estimation Methods for Induction Motor Vector Control / B. K. Reddy та ін. *Technologies*. 2024. Т. 12, № 8. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies12080123>.
3. Шаповалов О. С., Карасьов О. П. Випробування асинхронних трифазних двигунів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2023. № 18. С. 46–50. URL: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2019/254550>.
4. Hamdy Mohamed Soliman. Studying the Steady State Performance Characteristics of Induction Motor with Field Oriented Control Comparing to Scalar Control. *EJENG*. Т. 1, № 2. С. 18–25. URL: <https://doi.org/10.24018/ejeng.2016.1.2.115>.
5. Analysis Characteristics and Performance of Induction Motor Using MATLAB / N. S. Jadhav та ін. *JEDT*. 2024. С. 16-24. URL: <https://matjournals.net/engineering/index.php/JEDT/article/view/1123>
6. Tengfei M. Simulation Study on Mechanical Properties of Three-Phase Asynchronous Motor. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Control Systems*. 2015. С. 200–205. URL: <https://doi.org/10.2991/mecs-15.2015.39>.
7. Popenda A. Mathematical Modelling of Induction Motor with a Saturated Magnetic Circuit. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2015. Т. 91, № 3. С. 145–150..
8. Malyar V. S. Mechanical Characteristics of a Three-Phase Induction Motor Supplied from a Single-Phase Network. *Electrical and Computer Engineering, NTU KhPI*. 2016. С. 112–120.

9. Malyar V. S., Malyar A. V., Andreishyn A. S. A METHOD FOR CALCULATING MECHANICAL CHARACTERISTICS OF INDUCTION MOTORS WITH SQUIRREL-CAGE ROTOR. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019. № 2. С. 9–13. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.2.02>
10. Konuhova M. Induction Motor Dynamics Regimes: A Comprehensive Analysis. *Applied Sciences*. 2025. Т. 15, № 2. С. 1–15. URL: <https://doi.org/10.3390/app15020350>.
11. Безрученко В., Варченко В., Чумак В. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навч. посіб. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В Лазар., 2003. 252 с.
12. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. асинхронні машини: навч. посіб. / В. Грабко та ін. Вінниця: ВНТУ, 2007. 197 с.
13. E59. *zapadpribor.com*. URL: <https://zapadpribor.com/ua/e59/>
14. M2015. *zapadpribor.com*. URL: <https://zapadpribor.com/ua/m2015/>
15. Датчик тахометра ДТ-5 МЕТРОЛОГ. *Інтернет-магазин МЕТРОЛОГ - Все для точних вимірів*. URL: https://metrolog.com.ua/ua/product/datchik_tahometra_dt5
16. Тахометри магнітоіндукційні ТЕ-4В, магнітоіндукційний тахометр ТЕ-4В, Тахометр магнітоіндукційний ТЕ-4В, Тахометр ТЕ-4В - купити в Україні. *Лабораторні прилади, вимірювальний інструмент, випробувальне обладнання - поставка, ремонт обслуговування | ТОВ НВФ Стандарт-М*. URL: <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/tahometry/tahometry-magnitoindukcionnie-te4v?mova=uk>
17. Проективання електричних машин: навч. посіб. / Д. В. Ципленков та ін. Дніпро: НТУ "Дніпр. політехніка", 2020. 408 с.

Надійшла в редколегію 20.10.2025

Прийнята до друку 30.12.2025

V. DOSKOCH, O. BALICHUK

EXPERIMENTAL SETUP FOR DETERMINING THE COORDINATES OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE USING A MUTUAL LOAD STAND

Purpose. The work is aimed at developing a methodology for experimental research into the influence of reduced supply voltage on the operating and mechanical characteristics of squirrel-cage induction motors with a power of up to 5 kW. The research is focused on critically important technological equipment of railway transport enterprises (locomotive depots, repair plants), which in modern conditions is often operated in power supply modes with low quality indicators. **Methods.** The work uses a comprehensive analysis of the technical equipment of railway enterprises, analytical methods for studying the properties of asynchronous machines, and methods for mathematical analysis of test results. The experimental part is based on the method of direct loading on a mutual load stand, where a DC machine with independent excitation is used as a braking device. The process includes preliminary measurement of the characteristics of idling and non-working speed for calibrating the measuring system. **Results.** A scheme of an experimental stand has been developed and practically tested, allowing to fix the coordinates of the electric drive (torque, speed, current) in a wide range of loads. It has been established that the use of a P-42 type generator as a

loading device allows to create a regulated braking torque from 0 to 35 N·m. This provides the possibility of modeling the operating modes of asynchronous motors with a capacity of up to 5 kW with a variation of the supply voltage. The described metrological base confirms the high accuracy of the obtained data for the further construction of real mechanical characteristics. **Originality.** The author first proposed to use a mutual load stand with a DC generator of proportional power to the engine, operating on a network with regulated voltage, specifically to assess the stability of non-traction railway consumers in conditions of unstable power supply. The method of direct loading of low-power machines has also been further developed, which, unlike analytical models, allows taking into account real electromagnetic processes in conditions of deviation of network parameters from nominal values. **Practical significance.** The obtained methodology and bench test results are the initial data for predictive modeling of the stability of industrial equipment operation at railway repair enterprises. The practical application of the results will allow developing technical recommendations for protecting critical equipment from the negative impact of low-quality electricity, as well as justifying the implementation of voltage compensation measures and the use of renewable energy sources for the uninterrupted operation of locomotive depots.

Key words: non-traction consumers, electrical equipment of railway transport enterprises, mutual load stand, critical equipment, operating characteristics of asynchronous motors, experimental determination of the coordinates of asynchronous electric drives.