

УДК 621.33:62-585.3

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

МЕТОД ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ КРИТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В НЕНОМІНАЛЬНИХ УМОВАХ ЖИВЛЯЧОЇ МЕРЕЖІ

Мета. Провести аналіз впливу зміни напруги живлення на працездатність асинхронного двигуна, який працює із типовими навантаженнями з метою визначення граничних значень відхилень напруги за умови неможливості здійснення пуску та «перекидання» двигуна. Актуальність дослідження підтверджується тим, що особливе місце серед парку рухомого складу залізниць посідають тягові рухомі одиниці – локомотиви. **Методи.** Комплексний аналіз технічного оснащення та технології роботи залізничного транспорту, аналітичні методи дослідження робочих властивостей асинхронних електродвигунів, методи математичного аналізу. **Результати.** Технологічні процеси ремонту та обслуговування рухомого складу в умовах депо та ремонтних підприємств переважною більшістю своєю пов'язані із використанням промислового устаткування, яке обладнано електроприводом. Найчастіше цей електропривод – асинхронний. Живлення промислових підприємств залізничного транспорту, як і самих залізничних вузлів, здійснюється від Об'єднаної енергетичної системи України, яка впродовж повномасштабного вторгнення зазнає значних терористичних атак. Це призводить до зниження якісних та кількісних показників електричної енергії як в цілому по країні, так і на промислових підприємствах залізниць зокрема. З метою визначення потенційної працездатності критично важливого обладнання підприємств залізниць в умовах живлення електричною енергією низької якості пропонується метод оцінки, що базується на аналізі механічних характеристик асинхронних електроприводів з урахуванням реальних умов їх експлуатації. В якості критерію оцінювання потенційної працездатності електроприводу запропоновано використовувати суміщені механічні характеристики приводного двигуна та робочого органу із урахуванням реальних умов експлуатації. Результати аналізу їх взаємного розміщення дозволяють зробити висновок стосовно стійкості роботи електроприводу. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано ефективну методику визначення граничних значень усталеного відхилення живлячої напруги за умови забезпечення пускового моменту та перевантажувальної здатності двигуна на основі його каталожних даних. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані в якості вихідних даних для прогностичного моделювання стабільності роботи критично важливого обладнання при їх живленні електричною енергією із низькими якісними та кількісними показниками. На основі отриманих результатів може бути розроблено ряд рекомендацій стосовно організації безперебійного електропостачання таких нетягових споживачів залізничного транспорту із використанням енергії відновлюваним джерел. Матеріал дослідження може бути використано при впровадженні заходів із компенсації негативного впливу кількісних та якісних показників живлячої електричної енергії на надійність нетягових споживачів залізничного транспорту.

Ключові слова: нетягові споживачі, електрообладнання підприємств, оцінка працездатності обладнання, критично важливе обладнання, показники електричної енергії.

Вступ

Задача залізничного транспорту є забезпечення перевізного процесу, та своєчасне доставлення вантажів військового та цивільного призначення. Запорукою виконання графіків руху поїздів та своєчасного прибуття вантажів, серед всього іншого, є наявність та раціональне використання сучасного та справного рухомого складу.

Питання поточного утримання та ремонту

тягового рухомого складу вирішуються локомотивними депо та іншими підприємствами залізничного транспорту. Для цього названі підприємства забезпечуються різноманітним технологічним обладнанням, більшість із якого має асинхронний електропривод.

Постановка завдання дослідження

Для виконання операцій з технічного утримання локомотивного парку засобами депо та підприємств залізничного транспорту

необхідним є їх надійне електропостачання, що досить часто суміщене із електропостачанням цілого залізничного вузла.

Терористичні атаки на енергетичну систему України з боку країни-агресора суттєво знижують як кількісні (брак потужності генерації), так і якісні показники електричної енергії.

Погіршення якісних показників електричної енергії призводить до перебоїв в роботі технологічного обладнання, а також його передчасного виходу із ладу.

З точки зору впливу на роботу асинхронних електроприводів більш суттєвими за наслідками дії є несиметрія живлячої напруги та відхилення напруги [1, 2, 3, 4]. Однак, в умовах браку потужності генерації в енергетичній системі відхилення напруги від номінального значення проявляється суттєвіше, ніж її несиметрія [3].

Відомо, що відхилення напруги призводить до зміни частоти обертання ротора навантаженого двигуна, зміни активних втрат та споживаної реактивної потужності, що призводить до зміни показників, які характеризують роботу двигуна [1, 2, 3, 4].

Зміна величини живлячої напруги призводить до зміни моменту, який реалізується асинхронним двигуном, а, отже, і зовнішнім виглядом його механічної характеристики. В процесі експлуатації від мережі з низькою якістю електричної енергії вбачається можливим таке відхилення напруги, при якому конкретний асинхронний двигун із певним навантаженням або не запуститься в хід, або зупиниться під час роботи. Постає задача дослідити механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні його напруги живлення, а також визначити граничні значення відхилення напруги живлення за умови неможливості здійснення пуску та «перевертання» двигуна.

Мета дослідження

Провести аналіз впливу зміни напруги живлення на працездатність асинхронного двигуна, який працює із типовими навантаженнями з метою визначення граничних значень відхилень напруги за умови неможливості здійснення пуску та «перекидання» двигуна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню якості живлячої електричної енергії в промислових мережах, і її впливу на роботу електроприймачів присвячено ряд робіт [5, 6, 7, 8], які було опубліковано протягом останніх років.

Так, в [5] проаналізовано негативний вплив електричної енергії низької якості на експлуатаційні показники електроустановок. Особливу увагу приділено розкриттю причин погіршення якості електричної енергії в мережах промислових підприємств, так як це беззаперечно призводить до зниження надійності та ефективності роботи електроспоживачів. В роботі проілюстровано розкид, який мають статистичні показники якості електричної енергії в живлячих мережах промислових підприємств, в тягових мережах електрифікованого транспорту та в мережах живлення нетягових споживачів підприємств залізничного транспорту, що обумовлює актуальність даного дослідження.

В роботі [6] автори розглядають вплив несиметрії живлячої напруги, як одного із показників якості електричної енергії, на робочі характеристики асинхронних двигунів. На власноруч зроблений імітаційній моделі двигуна потужністю 11 кВт отримано залежності моменту, механічної потужності, ККД та часові діаграми перехідних процесів при його прямому пуску, коли коефіцієнт несиметрії напруги становить 2%. Також в [6] показано, що несиметрія напруги суттєво впливає на енергетичні показники асинхронного двигуна – ККД та коефіцієнт потужності, однак в роботі не міститься результатів моделювання власне механічної характеристики асинхронного двигуна при коефіцієнті несиметрії до і понад 2%, а також названої характеристики при усталеному відхиленні напруги живлення.

Періодичні коливання напруги в [7] розглядаються як результат накладання додаткових суб- та інтергармонік на основну гармоніку живлячої напруги. При цьому аналізують вібрацію та пульсації крутного моменту асинхронного двигуна.

В дослідженні [8] запропоновано альтернативний метод визначення коефіцієнта несиметрії напруги з використанням середнього значення лінійних напруг і коефіцієнта несиметрії струму. Для підтвердження адекватності запропонованого методу результати моделювання порівняно із експериментальними даними отриманими на трьох різних асинхронних двигунах.

Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій доводить необхідність розробки інженерного методу оцінки впливу усталеного відхилення напруги живлення асинхронного двигуна на його механічну характеристику.

Основний матеріал дослідження

Важливою характеристикою асинхронного

двигуна, що дозволяє оцінити його працездатність в певних умовах та з певним видом навантаження є його механічна характеристика, тобто залежність виду $n=f(M)$ [9 - 12].

Механічна характеристика асинхронного двигуна в загальному випадку визначається виразом [9 - 12]:

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right) + (x_1 + x_2')^2 \right]}. \quad (1)$$

Перехід від форми представлення характеристики у вигляді залежності $M=f(s)$ до визначеної стандартом $n=f(M)$ здійснюється з урахуванням того, що $n=n_1 \cdot (1-s)$. Однак, як можна побачити у виразі (1) містяться параметри схеми заміщення асинхронного двигуна. І, хоча при розрахунку механічної характеристики вони приймаються сталими, проте в більшості випадків вони залишаються невідомими для конкретних двигунів через відсутність даної інформації, як у каталогах на електричні машини, так і в довідниковій літературі.

При практичній побудові механічних характеристик асинхронних двигунів за наявними каталожними даними користуються виразом формули Клосса [9-12]:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}, \quad (2)$$

де $s_{\text{кр}}$ - критичне ковзання, значення якого можна визначити за приблизною формулою:

$$s_{\text{кр}} \approx s_{\text{ном}} \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right),$$

де $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$ - кратність максимального моменту двигуна.

Із виразу (1) видно, що для асинхронного двигуна момент $M_{\text{ном}} \sim U_{\text{ном}}^2$ пропорційний квадрату величини живлячої напруги. Тоді, при відхиленні напруги до певного іншого значення U_y момент, створений двигуном $M_y \sim U_y^2$.

Відношення моменту $M_{\text{ном}}$ при номінальній нарузі до моменту M_y при відхиленні напруги становить:

$$\frac{M_{\text{ном}}}{M_y} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_y^2} = \left(\frac{U_{\text{ном}}}{U_y} \right)^2,$$

звідки:

$$M_y = M_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{U_y}{U_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (3)$$

Відповідно до [13] усталене значення відхилення напруги δU_y дорівнює:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \quad (4)$$

Оскільки ступінь впливу зміни напруги на механічну характеристику оцінюється за модулем числа δU_y , а в дослідженні розглядається лише вплив від зниження напруги живлення, то $U_{\text{ном}} > U_y$ і, відповідно до виразу (4), $\delta U_y < 0$, отже, запишемо вираз (4) у вигляді:

$$\delta U_y = \frac{U_{\text{ном}} - U_y}{U_{\text{ном}}} = 1 - \frac{U_y}{U_{\text{ном}}}. \quad (5)$$

Запишемо вираз (3) з урахуванням виразу (5):

$$M_y = M_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{U_y}{U_{\text{ном}}} \right)^2 = M_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta U_y)^2. \quad (6)$$

Вираз (6) дозволяє отримати значення моменту асинхронного двигуна, яке відповідає заданому усталеному відхиленню напруги δU_y .

Максимальний усталений момент асинхронного двигуна при цьому ж усталеному відхиленні напруги δU_y буде відповідно:

$$M_{\max y} = M_y \cdot \lambda = M_{\text{ном}} \cdot \lambda \cdot (1 - \delta U_y)^2. \quad (7)$$

Підставимо вираз (7) до виразу (2) і отримаємо:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{ном}} \cdot \lambda \cdot (1 - \delta U_y)^2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (8)$$

Вираз (8) являє собою видозмінений вигляд формули Клосса, за допомогою якої можна побудувати механічну характеристику асинхронного двигуна з урахуванням впливу відхилення напруги на основі каталожних даних.

Використовуючи вираз (8) побудуємо механічні характеристики асинхронного двигуна типу АІР63В4 при відсутності відхилення напруги ($\delta U_y = 0$), при нормально допустимому за [13] відхиленні напруги ($\delta U_y = 0,05$) та гранично допустимому за [13] відхиленні напруги ($\delta U_y = 0,1$). Деякі електричні параметри двигуна АІР63В4, необхідні для побудови механічної характеристики, наведено в табл. 1.

Визначимо номінальну швидкість обертання:

$$n_{\text{ном}} = n_1 \cdot (1 - s_{\text{ном}}) = 1500 \cdot (1 - 0,12) = 1320 \text{ об/хв}$$

Критичне ковзання для двигуна становить:

$$\begin{aligned} s_{\text{кр}} &\approx s_{\text{ном}} \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = \\ &= 0,12 \cdot \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,499. \end{aligned}$$

Таблиця 1

Параметри електродвигуна АІР63В4 [14]

Номінальна потужність, кВт	Синхронна частота обертання, об/хв	Номінальне ковзання	Кратність максимального моменту
0,37	1500	0,12	2,2

Номінальний момент дорівнює:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{370}{1320} = 2,68 \text{ Нм.}$$

Підставимо, отримані в ході попередніх розрахунків, дані в вираз (8), задаємося рядом, який містить 10 значень s із проміжку $(0...1)$ та

визначимо механічні характеристики двигуна АІР63В4 при номінальній напрузі та її відхиленні на 5% та 10% від номінального значення. Результати розрахунків представимо в табл. 2.

За даними табл. 2 кількісно побудуємо механічні характеристики асинхронного двигуна типу АІР63В4.

Таблиця 2

Розрахунок механічних характеристик електродвигуна АІР63В4 при відхиленні напруги

s	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1
n , об/хв	1500	1350	1200	1050	900	750	600	450	300	0
$\delta U_y = 0$										
M , Нм	0	2,27	4,07	5,20	5,75	5,89	5,79	5,57	5,29	4,71
$\delta U_y = 0,05$										
M , Нм	0	2,05	3,67	4,69	5,19	5,31	5,23	5,02	4,77	4,25
$\delta U_y = 0,1$										
M , Нм	0	1,84	3,29	4,21	4,66	4,77	4,69	4,51	4,28	3,81

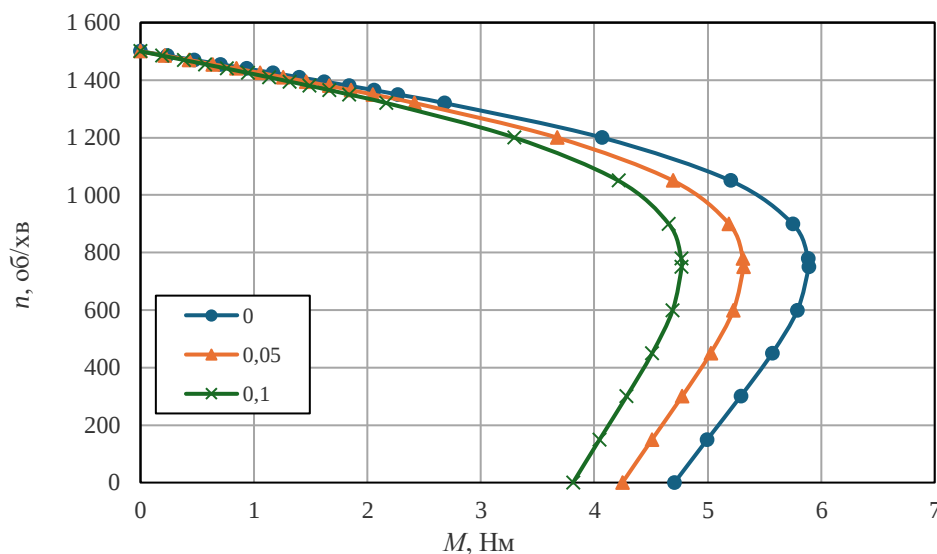


Рис. 1. Механічні характеристики асинхронного двигуна типу АІР63В4 при номінальній напрузі та її відхиленні на 5% та 10% від номінального значення

Як можна бачити на рис.1, механічні характеристики по мірі збільшення величини усталеного відхилення напруги δU_y зміщуються ліворуч в напрямку осі ординат, тобто момент, який буде реалізовувати двигун, при однаковій швидкості обертання із ростом усталеного відхилення напруги буде зменшуватися.

З метою оцінки працездатності електропривода механізму, що працює із сталим моментом статичного опору $M_c = M_{\text{ном}} = \text{const}$ в певних конкретних умовах, сумістимо механічну характеристику двигуна із характеристикою механізму, як показано на рис. 2.

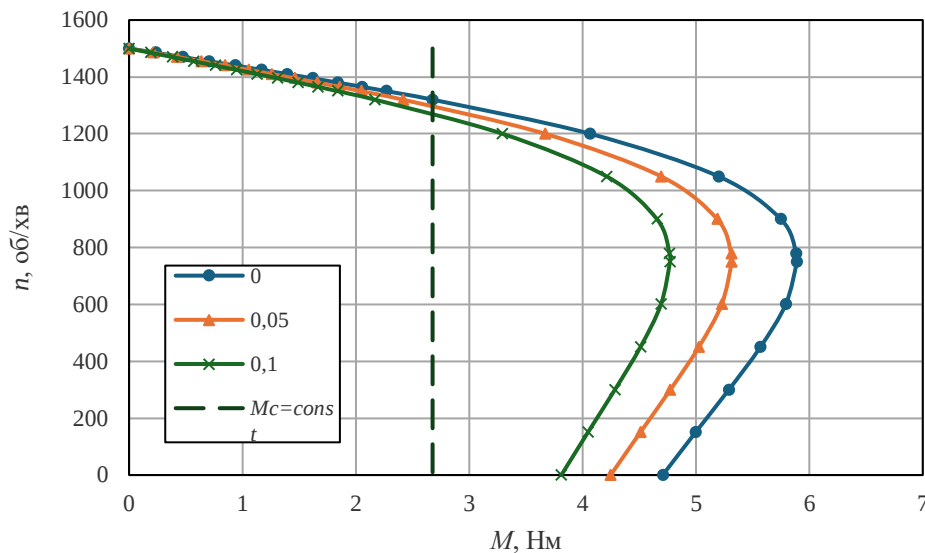


Рис. 2. Механічні характеристики асинхронного двигуна типу AIR63B4 суміщені із характеристикою приводимого в рух механізму

При взаємному розташуванні механічних характеристик двигуна і механізму, показаному на рис. 2, робота електроприводу є стійкою, т.я. забезпечуються умови достатності пускового моменту двигуна ($M_{\text{пуск}} > M_c$) та перевантажувальної здатності ($M_c < M_{\text{max}}$). Однак, при подальшому зростанні величини усталеного відхилення напруги δU_y до певних граничних значень потенційно створюється умова неможливості пуску асинхронного двигуна через зниження величини $M_{\text{пуск}}$ до значення, коли $M_{\text{пуск}} < M_c$.

Запишемо вираз (8), змінивши його із урахуванням названих граничних умов, отримаємо:

$$M_c = M_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot M_{\text{ном}} \cdot \lambda \cdot (1 - \delta U_y)^2}{\frac{1}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{1}}.$$

Виразимо із останнього виразу δU_y , при досягненні і перебільшенні якого двигун не запуснеться, бо $M_{\text{пуск}} < M_c$.

$$\delta U_y = 1 - \sqrt{\frac{\frac{1}{s_{\text{кр}}} + s_{\text{кр}}}{2 \cdot \lambda}}. \quad (9)$$

За виразом (9) визначається граничне значення усталеного відхилення напруги за умов неможливості пуску двигуна, що працює із механізмом, момент опору якого сталий і дорівнює номінальному моменту двигуна $M_c = M_{\text{ном}} = \text{const}$.

Визначимо це граничне значення δU_y для двигуна AIR63B4.

$$\delta U_y = 1 - \sqrt{\frac{\frac{1}{s_{\text{кр}}} + s_{\text{кр}}}{2 \cdot \lambda}} =$$

$$= 1 - \sqrt{\frac{\frac{1}{0,499} + 0,499}{2 \cdot 2,2}} = 0,25.$$

Таким чином при відхиленні напруги більше, ніж на 25% двигун AIR63B4, що працює із механізмом, момент статичного опору якого $M_c = M_{\text{ном}} = \text{const}$, не запуснеться через недостатність пускового моменту.

Однак, під час тривалої роботи усталене відхилення живлячої напруги $\delta U_y = 25\%$ не призведе до «перекидання» двигуна, т.я. забезпечується його перевантажувальна здатність ($M_c < M_{\text{max}}$). Зупинка двигуна відбудеться при такому значенні δU_y , коли при ковзанні $s = s_{\text{кр}}$, момент який розвиває двигун стане рівним моменту статичного опору механізму, тобто $M_c = M_{\text{ном}} = \text{const}$. Чисельне значення граничного δU_y можна визначити, змінивши вираз (9):

$$\delta U_y = 1 - \sqrt{\frac{\frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{кр}}}}{2 \cdot \lambda}} = 1 - \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \lambda}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{\lambda}}. \quad (10)$$

Як можна побачити із виразу (10) гранично допустиме значення δU_y , при якому у двигуна, що працює із навантаженням $M_c = M_{\text{ном}} = \text{const}$ відбувається «перекидання» визначається його перевантажувальною здатністю $\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$.

Для двигуна AIR63B4 відповідно до виразу (10) значення δU_y , при якому відбудеться його «перекидання», дорівнює:

$$\delta U_y = 1 - \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{2,2}} = 0,33.$$

Отже, при відхиленні напруги живлення на більше ніж 33% двигун АІР63В4 зупиниться і повторно не запуститься до тих пір, поки значення відхилення напруги не стане менше 25%.

Використовуючи вираз (8) розрахуємо і побудуємо механічні характеристики асинхронного двигуна АІР63В4 при $\delta U_y = 0,25$ та $\delta U_y = 0,33$ та порівняємо їх із характеристикою механізму, момент статичного опору якого $M_c = M_{ном} = const$. Взаємне розміщення отриманих на рис.3 характеристик із характеристикою приводимого в рух

механізму підтверджує раніше зроблені висновки.

Як вже було зазначено, при відхиленні напруги від номінального значення також виникають додаткові перегреви асинхронного двигуна через зростання струму в роторі [1, 2, 9]. Тому з міркувань збереження працездатності електропривода визначені граничні режими роботи мають однозначно виключатися штатною системою захисту.

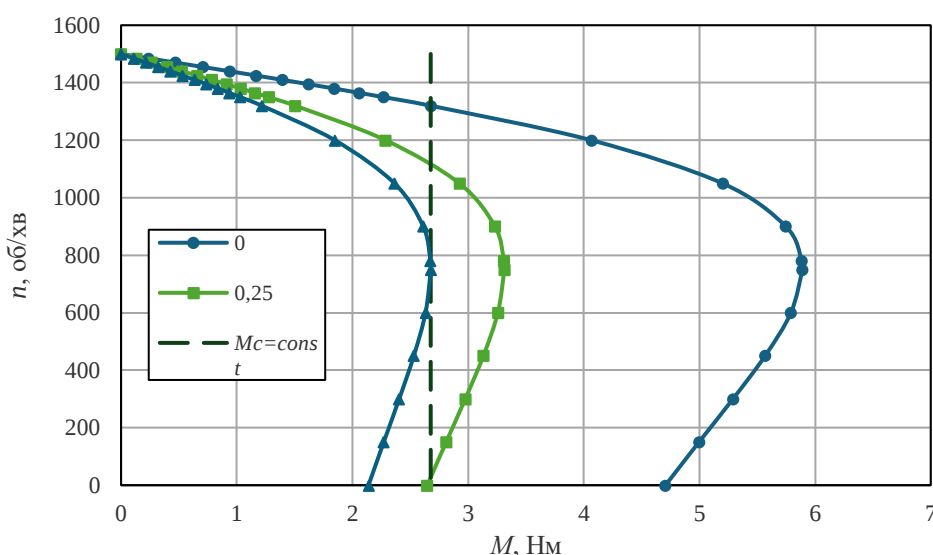


Рис. 3. Механічні характеристики асинхронного двигуна типу АІР63В4 при $\delta U_y = 0,25$ та $\delta U_y = 0,33$ суміщені із характеристикою приводимого в рух механізму

Наукова новизна та практична значимість

Вперше запропоновано ефективну методику визначення граничних значень усталеного відхилення живлячої напруги за умови забезпечення пускового моменту та переважувальної здатності двигуна на основі його каталожних даних

Вперше запропоновано уточнену методику побудови механічних характеристик асинхронних двигунів з урахуванням усталеного відхилення живлячої напруги δU_y на основі формули Клосса.

Вперше визначено аналітичні вирази, які дозволяють отримати значення граничних δU_y за умов забезпечення достатності пускового моменту та переважувальної здатності двигуна.

Отримав подальший розвиток метод порівняння механічної характеристики приводного двигуна, побудованої для конкретних умов його роботи, з характеристикою механізму, який приводиться в рух в якості критерію оцінювання працездатності електроприводу.

Отримані результати можуть бути

використані в якості вихідних даних для прогностичного моделювання стабільності роботи критично важливого обладнання при їх живленні електричною енергією із низькими якісними та кількісними показниками. На основі отриманих результатів може бути розроблено ряд рекомендацій стосовно організації безперебійного електропостачання таких нетягових споживачів залізничного транспорту із використанням енергії відновлюваних джерел. Матеріал дослідження може бути використано при впровадженні заходів із компенсації негативного впливу кількісних та якісних показників живлячої електричної енергії на надійність нетягових споживачів залізничного транспорту.

Висновки

Для асинхронного двигуна типу АІР63В4 побудовано механічні характеристики при відхиленні живлячої напруги на 5% та 10%.

Визначено, що асинхронний двигун АІР63В4, який працює на механізм із статичним моментом опору $M_c = M_{ном} = const$, не забезпечує достатність пускового моменту вже при

$\delta U_y=25\%$, а його «перекидання» відбувається при $\delta U_y=33\%$.

Отримані в ході даного дослідження граничні умови будуть використані при розробці прогностичних моделей для оцінки стабільності роботи критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту в умовах низької якості живлячої напруги.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сиченко В. Г. Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2015. № 94. С. 25–30. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/148273>.
2. Improvement of energy indicators of conventional electric driving asynchronous motors of non-standard technological equipment at the enterprises for repair of railway rolling stock through the use of energy-saving motors / O. Bondar та ін. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Т. 294. С. 01007. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929401007>.
3. Adamova S. Analysis of the electricity quality effect on the work of electric receivers. *Scientific bulletin of the Tavria Agrotechnological State University*. 2018. Т. 8, № 2. URL: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2018-2-39>.
4. Influence of feeding electric energy quality on heating of the auxiliary machines of ac electric rolling stock / O. Y. Baliichuk та ін. *Science and transport progress, bulletin of dniproperovsk national university of railway transport*. 2014. № 3(51). С. 34. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2014/25800>.
5. Оцінка впливу якості електроенергії на ефективність електроспоживання / В. Кузнецов та ін. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2018. № 100. С. 85–95. URL: <https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/eis/article/view/407>.

6. Горошко А., Кашталъян А. Вплив несиметрії напруги живлення на характеристики асинхронного двигуна. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Т. 353, № 3.2. С. 110–113. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-13>.
7. Induction Motors under Voltage Fluctuations and Power Quality Standards / P. Gnaciński та ін. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023. С. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1109/tec.2023.3342932>.
8. Improved method for determining voltage unbalance factor using induction motors / L. Guasch-Pesquer та ін. *Energies*. 2022. Т. 15, № 23. С. 9232. URL: <https://doi.org/10.3390/en15239232>.
9. Дубинець Л., Момот О., Маренич О. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В Лазар., 2004. 208 с.
10. Півняк Г., Шкрабець Ф., Дорогань В. Електричні машини : навч. посіб. Дніпропетровськ : Нац. гірн. ун-т, 2003. 328 с.
11. Осташевський М., Юр'єва Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. Харків : ФОП Панов А.М., 2017. 452 с.
12. Міліх В., Полякова Н. Розрахунок параметрів та характеристик електричних машин : метод. вказівки до розрахунк. завдання. Харків : НТУ "ХПІ", 2013. 54 с.
13. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. На заміну ДСТУ EN 50160:2014 ; чинний від 2023-12-08. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 53 с.
14. Електродвигун АИР63В4 ціни, характеристики, розміри АИР 63 В4 0,37 кВт 1500 об/хв. *ООО «СЛЕМЗ»*. URL: <https://slemz.com.ua/elektrodviguni/zagalnopromyslovi/elektrodvygun-air-63v24-037kvt-1500obhv> (дата звернення: 24.04.2025).

Надійшла в редколегію 05.05.2025

Прийнята до друку 03.07.2025

V. DOSKOCH, O. BALIICHUK

METHOD FOR ASSESSING THE PERFORMANCE OF CRITICAL ELECTRIC DRIVEN EQUIPMENT OF RAILWAY TRANSPORT ENTERPRISES IN NON-NOMINAL POWER NETWORK CONDITIONS

Purpose. Analyse the effect of supply voltage changes on the performance of an asynchronous motor operating under typical loads in order to determine the limit values of voltage deviations when it is impossible to start and ‘roll over’ the motor. The relevance of the study is confirmed by the fact that traction units – locomotives – occupy a special place among the rolling stock of railways. **Methods.** Comprehensive analysis of technical equipment and technology of railway transport, analytical methods for studying the operating properties of asynchronous electric motors, methods of mathematical analysis. **Results.** Technological processes of repair and maintenance of rolling stock in depots and repair enterprises are largely associated with the use of industrial equipment equipped with an electric drive. Most often, this electric drive is asynchronous. Power supply of industrial railway transport enterprises, as well as railway nodes themselves, is carried out from the United Energy System of Ukraine, which during the full-scale invasion is subjected to significant terrorist attacks. This leads to a decrease in the qualitative and quantitative indicators of electric energy both in the country as a whole and at industrial enterprises of railways in particular. In

order to determine the potential operability of critically important equipment of railway enterprises in conditions of low-quality electric energy supply, an assessment method is proposed, based on the analysis of the mechanical characteristics of asynchronous electric drives taking into account the real conditions of their operation. As a criterion for assessing the potential performance of an electric drive, it is proposed to use the combined mechanical characteristics of the drive motor and the working body, taking into account real operating conditions. The results of the analysis of their mutual placement allow us to draw a conclusion regarding the stability of the electric drive. **Originality.** An engineering method for determining the limit values of the steady-state deviation of the supply voltage, provided that the starting torque and overload capacity of the engine are provided, based on its catalog data, is proposed. **Practical significance.** The results obtained can be used as input data for predictive modeling of the stability of the operation of critical equipment when they are supplied with electrical energy with low qualitative and quantitative indicators. Based on the results obtained, a number of recommendations can be developed regarding the organization of uninterrupted power supply of such non-traction consumers of railway transport using energy from renewable sources. The research material can be used in the implementation of measures to compensate for the negative impact of quantitative and qualitative indicators of the supply of electrical energy on the reliability of non-traction consumers of railway transport.

Key words: non-traction consumers, electrical equipment of enterprises, equipment performance assessment, critical equipment, electrical energy indicators.