

УДК 621.313.33:621.316.7:621.3.078

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2026-109-17>

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕЯКІСНОЇ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У НЕРЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

Доскоч Володимир Ігорович,

аспірант

Українського державного університету науки і технологій

ORCID ID: 0000-0002-9991-1650

Балійчук Олексій Юрійович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри «Електротехніка та електромеханіка»

Українського державного університету науки і технологій

ORCID ID: 0000-0003-0119-1446

У статті досліджено вплив зниження якості електричної енергії на технічні показники роботи систем нерегульованого асинхронного електроприводу технологічного обладнання підприємств залізничного транспорту. Обґрунтовано актуальність тематики в умовах нестабільності параметрів живлячої напруги, спричиненої дефіцитом генеруючих потужностей в наслідок пошкодження об'єктів енергетичної інфраструктури. Виконано аналіз складу та розподілу потужностей електроприводів критично важливого обладнання локомотивних депо, за результатами якого встановлено, що більшість приводів має потужність до 5 кВт, що створює передумови для впровадження локальних резервних джерел електропостачання. На основі модифікованого виразу формули Клосса отримано сукупності механічних характеристик асинхронних двигунів із урахуванням усталеного відхилення напруги в діапазоні, характерному для реальних умов експлуатації мереж напругою 0,4 кВ. Визначено гранично допустимі значення відхилення напруги, за яких забезпечуються необхідні умови пуску, перевантажувальна здатність та стійкість роботи електроприводів різних типорозмірів. Показано, що електроприводи механізмів із сталим моментом статичного опору є найбільш чутливими до зниження напруги, тоді як приводи турбомеханізмів характеризуються вищою стійкістю. Експериментальні дослідження, виконані на стенді взаємного навантаження, підтвердили адекватність аналітичного підходу до побудови механічних характеристик при зміні напруги живлення. Отримані результати дозволяють кількісно оцінювати вплив неякісної електроенергії на працездатність електроприводів, прогнозувати ресурс обладнання та обґрунтовувати доцільність застосування резервних систем електропостачання, зокрема на основі відновлюваних джерел енергії для забезпечення безперервності технологічних процесів.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, нерегульований електропривод, якість електричної енергії, відхилення напруги, механічна характеристика, пусковий момент, підприємства залізничного транспорту.

Doskoch Volodymyr, Baliichuk Olexsii. Analysis of the influence of poor-quality supply voltage on the operating characteristics of induction motors in unregulated electric drives

The article investigates the impact of reduced electrical energy quality on the technical performance of unregulated asynchronous electric drive systems for technological equipment of railway transport enterprises. The relevance of the topic in conditions of instability of supply voltage parameters caused by a shortage of generating capacities as a result of damage to energy infrastructure facilities is substantiated. An analysis of the composition and distribution of electric drive capacities of critically important locomotive depot equipment is performed, the results of which show that most drives have a capacity of up to 5 kW, which creates the prerequisites for the introduction of local backup power sources. Based on the modified expression of the Kloss formula, a set of mechanical characteristics of asynchronous motors is obtained, taking into account the steady-state voltage deviation in the range characteristic of real operating conditions of networks with a voltage of 0.4 kV. The maximum permissible voltage deviation values are determined, under which the necessary starting conditions, overload capacity and stability of operation of electric drives of various sizes are ensured. It is shown that electric drives of mechanisms with a constant moment of static resistance are the most sensitive to voltage drops, while drives of turbomechanisms are characterized by higher stability. Experimental studies performed on a mutual load stand confirmed the adequacy of the analytical approach to constructing mechanical characteristics when changing the supply voltage. The results obtained allow us to quantitatively assess the impact of poor-quality electricity on the performance of electric drives, predict the resource of equipment and justify the feasibility of using backup power supply systems, in particular based on renewable energy sources to ensure the continuity of technological processes.

Key words: *induction motor, unregulated electric drive, electric power quality, voltage deviation, mechanical characteristic, starting torque, railway transport enterprises.*

Актуальність проблеми. Тяговий рухомий склад залізниць та підприємства по його технічному утриманню, обслуговуванню та ремонту (локомотивні депо, ремонтні підприємства залізничного транспорту) носять характер стратегічно важливих об'єктів. Така характеристика надана їм безсумнівно через те, що вчасна подача справного рухомого складу є запорукою надійного і якісного перевізного процесу, передумовою своєчасного доставлення вантажів перш за все військового та цивільного призначення. Значну кількість технологічного устаткування вказаних підприємств обладнано нерегульованим асинхронним електроприводом. В умовах постійних терористичних атак з боку країни-агресора, спрямованих перш за все на руйнування цілісності об'єднаної енергетичної системи України, реальні характеристики напруги суттєво відрізняються від своїх нормативних показників. Це обумовлює специфічні умови для роботи нетягових споживачів залізничного транспорту в цілому та електроприводів технологічного обладнання підприємств транспорту зокрема. Внаслідок цього може як скорочуватись термін служби приводних електродвигунів, так і взагалі унеможлиблюватись робота технологічного обладнання через те, що наявні характеристики живлячої напруги не забезпечують надійності пуску, чи перевантажувальної здатності двигунів. Тому питання дослідження впливу електричної енергії зниженої якості на техніко-економічні показники нерегульованих асинхронних електроприводів устаткування підприємств залізничного транспорту є безумовно актуальною задачею, розв'язанню якої присвячується дана робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема якості електричної енергії та її вплив на роботу промислових електроспоживачів не нова. Цьому питанню присвячується достатньо велика кількість публікацій за останні роки. Зокрема в [1] автори розкривають причини погіршення якості електричної енергії в мережах промислових підприємств, так як це беззаперечно призводить до зниження надійності та ефективності роботи електроспоживачів, проводять аналіз негативного впливу електричної енергії зниженої якості на експлуатаційні показники електроустановок. Наводять статистичні показники якості електричної енергії в живлячих мережах промислових підприємств, тягових мережах електрифікованого транспорту та в мережах живлення нетягових споживачів

підприємств залізничного транспорту. Представлені в [1] результати дозволяють зробити висновок, що навіть в нормальних режимах роботи енергетичної системи питання підвищення якості електричної енергії в мережах живлення нетягових споживачів залізничного транспорту потребує як інженерних, так і адміністративно-технічних рішень. Більше того, коли в результаті форс-мажорних обставин, спричинених військовим станом та втручанням третіх сторін нормативні параметри живлячої мережі не дотримуються, а потреба у надійній роботі критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту стоїть доволі гостро, виникає потреба у визначенні гранично допустимих характеристик напруги з міркувань забезпечення працездатності основного виробничого устаткування, обладнаного електроприводом.

У роботі [2] розкривається питання якісної та кількісної оцінки впливу характеристик живлячої напруги зокрема в напрямку їх погіршення на такі важливі показники роботи електроприводу як його ресурс та механічні характеристики. Встановлено, що при зміні напруги змінюється форма механічної характеристики двигуна, а при значному зниженні напруги на повністю завантаженому двигуні момент опору механізму може перевищити обертовий момент, що призведе до «перекидання» двигуна та його зупинки. Аналіз матеріалу дослідження [2] показує, що зниження напруги живлення погіршує і умови пуску двигунів, так як при цьому зменшується його пусковий момент. Також у [2] зазначено, що при тривалій роботі асинхронного двигуна зі зниженою напругою в результаті прискореного зносу ізоляції скорочується термін його служби, наведено кількісні показники такого скорочення.

Роботу [3] присвячено дослідженню впливу несиметрії живлячої напруги, як одного із показників якості електричної енергії, на робочі характеристики асинхронних двигунів. З цією метою авторами розроблено імітаційну модель двигуна потужністю 11 кВт, за допомогою якої отримано залежності моменту, механічної потужності, коефіцієнта корисної дії (ККД) та часові діаграми перехідних процесів при його прямому пуску, за умови, що коефіцієнт несиметрії напруги становить 2 %. Також в [3] показано, що несиметрія напруги суттєво впливає на енергетичні показники асинхронного двигуна – ККД та коефіцієнт потужності, однак у роботі не міститься власне механічної

характеристики асинхронного двигуна при коефіцієнті несиметрії до і понад 2 %, а також названої характеристики при усталеному відхиленні напруги живлення, яке в умовах дефіциту потужності генерації проявляється сильніше, ніж її небаланс.

Вплив інших характеристик напруги на роботу асинхронних двигунів розглядається також у [4]. Тут зокрема розглядаються періодичні коливання напруги як результат накладання додаткових суб- та інтергармонік на основну гармоніку живлячої напруги і при цьому аналізують такі експлуатаційні показники, як вібрація, що спричиняється та пульсацією крутного моменту асинхронного двигуна.

Електроприводи технологічного устаткування, яке використовується при екіпуванні локомотивів в локомотивних депо та на пунктах технічного обслуговування (ПТО) можна віднести до критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту через участь їх у неперервному технологічному процесі [5]. Так для забезпечення роботи пневмотранспортної установки і витискальних баків на піскосушарці використовується компресорна установка із резервуаром стисненого повітря. Робочою машиною компресорної установки є гвинтовий або поршневий компресор із приводом від асинхронного двигуна. Із врахуванням продуктивності компресорної установки в якості привідного двигуна застосовується асинхронний двигун типу AIP180S4, або аналогічний із подібними параметрами. Також асинхронний електропривод мають димососи, пристрої для дуття в піч, а також привод барабанної сушарки. Приводи названих механізмів здійснюються від двигунів типу AIP80B4 та AIP80B6 [5]. Це дозволяє визначити діапазон потужностей електроприводів критично важливого технологічного обладнання. Для такого підприємства, як локомотивне депо або ПТО електрична потужність критично важливого обладнання з електроприводом лежить в межах від 1,1 до 22 кВт.

З урахуванням характерних особливостей побудови системи енергопостачання нетягових споживачів підприємств залізничного транспорту, описаних, зокрема в [6], а також, зважаючи на причини зниження якості електричної енергії в мережах цих підприємств через сумісну дію як факторів встановлених у [1], так і умов, спричинених збройною агресією та терористичними атаками на енергосистему України, а також наслідки для електроприймачів, розкритих у [1–4], особливий інтерес становить дослідження працездатності електроприводів ряду потужності 1,1–22 кВт, визначення гранично

допустимих відхилень характеристик живлячої напруги за умов забезпечення їх переважувальної здатності, надійності пускових операцій та ресурсу. Це дозволить адекватно прогнозувати термін служби критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту та вживати заходів щодо безперебійності їх живлення із залученням, наприклад, джерел резервного електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії.

Варто зазначити, що питанню дослідження технічних показників роботи електроприводів на основі асинхронних двигунів протягом останнього часу також приділено значну кількість публікацій. Частина робіт [6–7] присвячується безпосередньо експериментальному визначенню параметрів та робочих характеристик на стендах взаємного навантаження або подібних, а більшість проаналізованих робіт [8–14] – методам аналітичної їх побудови на основі розрахункових даних, математичного та імітаційного моделювання з використанням пакету MATLAB.

Мета дослідження. Аналіз техніко-економічних показників роботи системи нерегульованого асинхронного електроприводу технологічного обладнання підприємств залізничного транспорту, зокрема його робочих та механічних характеристик при живленні електроенергією незадовільної якості на основі експериментальних та аналітичних даних.

Основний матеріал дослідження. Особливості технологічних процесів на залізничному транспорті впливають на взаємне розміщення об'єктів залізниць та зосередження певної кількості нетягових споживачів в окремих районах.

Так, на дільничних і сортувальних станціях розташовуються основні залізничні виробничі підприємства, як то основні локомотивні депо, депо екіпування та технічного огляду локомотивів, монтажні двори, вагонні депо пункти технічного огляду чи пункти контрольно-технічного огляду вагонів, пристрої для їх екіпування тощо. Крім основних підприємств, на великих станціях і вузлах розміщуються також котельні, насосні станції, очисні споруди та ряд інших підприємств, які у своїх виробничих процесах застосовують обладнання із електроприводом.

Основними джерелами живлення великої залізничної станції, а отже, і цілого ряду нетягових споживачів, як правило, виступають мережі та підстанції районних енергосистем, а на електрифікованих залізницях – тягові підстанції.

Правилами улаштування електроустановок визначено три категорії електроприймачів відповідно до забезпечення надійності

їх електропостачання [5; 15; 16]. Аналіз показав, що електроприймачами з асинхронним електроприводом першої та другої категорій є насосні станції перекачування стічних вод, поїзного та протипожежного водопостачання, компресорні станції екіпування, екіпувальні насоси для перекачування дизельного палива, оливи та води, обладнання із електроприводом пунктів технічного обслуговування ТО-2 локомотивів та вагонів, металообробні верстати ремонтно-механічних цехів депо [17]. Це обладнання повинно мати надійне і якісне електропостачання, а деяке з нього навіть системи безперебійного живлення.

Також зазначимо, що відповідно до технології ремонту та утримання тягового рухомого складу, в щоденній експлуатації, при поточних ремонтах (ПР), технічних обслуговуваннях (ТО) в об'ємах ТО-1 та ТО-2 виїзд локомотивів на лінію без проходження крізь пункт екіпування неможливий [5]. З цих міркувань електроприводи технологічного устаткування, що використовується при екіпуванні локомотивів будемо вважати критично важливими електроприймачами.

У результаті проведеного системного аналізу встановлено, що розподіл за номінальними потужностями електроприводів критичного обладнання в діапазоні від 1,0 до 22 кВт відповідає діаграмі на рис. 1.

З рис. 1 можна побачити, що більш розповсюдженими серед приводних двигунів є двигуни потужністю 2,0–5,0 кВт (45,7 % від усієї чисельності двигунів), а найближчими до них за частотою застосування є двигуни потужністю до 2,0 кВт (33 % від усієї чисельності). Двигуни потужністю 5,0–15 кВт становлять 11,3 %, а двигуни потужністю понад 15 кВт – 10 % від загальної чисельності критично важливого

обладнання з асинхронним електроприводом. Основні типи найбільш розповсюджених двигунів та їх технічні параметри представлено в табл. 1.

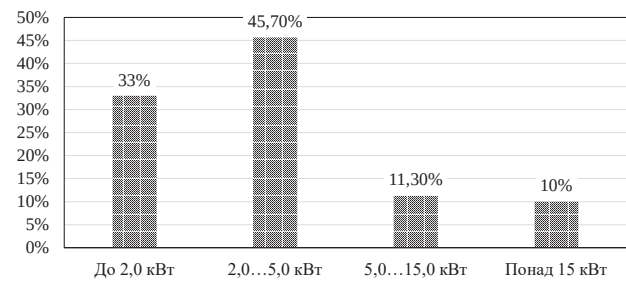


Рис. 1. Розподіл критично важливих електроприводів обладнання локомотивних депо за потужністю

У результаті дослідження показників якості електричної енергії на діючій ділянці електрифікованої змінним струмом між станціями Плетенний Ташлик та Можарове Знам'янської дирекції Регіональної філії «Одеська залізниця» акціонерного товариства «Укрзалізниця» отримано та статистично проаналізовано характеристики напруги в мережі напругою 0,4 кВ. Усталене відхилення напруги становило $-2,66\% < \delta U_y < 7,42\%$; небаланс напруги – $0 \leq K_{2y} \leq 3,43\%$ і відносна амплітуда середньоквадратичних значень кожної гармоніки $1,4 \leq K_y \leq 10,3\%$ [1]. Дві останні характеристики – небаланс напруги та відносна амплітуда середньоквадратичних значень кожної гармоніки перевищують граничні значення, наведені в [18]. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що навіть в нормальних режимах роботи енергетичної системи питання підвищення якості електричної енергії в мережах живлення нетягових споживачів залізничного транспорту потребувало як інженерних, так і адміністративно-технічних рішень. Тепер, коли

Таблиця 1

Параметри електродвигунів приводів критичного обладнання локомотивного депо

Параметр двигуна	Тип двигуна			
	AIP80B2	AIP90L4	AIP132S8	4A100S4
P_n , кВт	2,2	2,2	4,0	3,0
n_1 , об/хв	3000	1500	750	1500
η_n , %	83	81	83	82
$\cos \varphi_n$	0,87	0,83	0,7	0,83
s_n , %	5,0	7,0	4,5	4,3
M_n / M_n	2,0	2,1	1,8	2,0
$M_{\max} / M_n$	2,2	2,2	2,2	2,4
I_n / I_n	7,0	6,5	6,0	6,0
J , кг·м ²	0,0021	0,0056	0,042	0,0087
Маса, кг	13,2	17	56	36

в результаті форс-мажорних обставин, спричинених військовим станом та втручанням третіх сторін нормативні параметри живлячої мережі не дотримуються, а потреба у надійній роботі критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту стоїть доволі гостро, виникає потреба у визначенні гранично допустимих характеристик напруги з міркувань забезпечення працездатності основного виробничого устаткування, обладнаного електроприводом.

Важливою характеристикою асинхронного двигуна, що дозволяє оцінити його працездатність у певних умовах та з певним видом навантаження є його механічна характеристика, тобто залежність виду $n=f(M)$ [19; 20].

При практичній побудові механічних характеристик асинхронних двигунів за наявними каталожними даними користуються виразом формули Клосса [19; 20]:

$$M = \frac{2 \times M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (1)$$

Максимальний усталений момент асинхронного двигуна при усталеному відхиленні напруги δU_y буде відповідно [19]:

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

Підставимо вираз (2) до виразу (1) і отримаємо:

$$M = \frac{2 \times M_{\text{ном}} \times \lambda \times (1 - \delta U_y)^2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (3)$$

Вираз (3) являє собою видозмінений вигляд формули Клосса, за допомогою якої можна побудувати механічну характеристику асинхронного двигуна з урахуванням впливу відхилення напруги на основі каталожних даних [19].

В умовах форс-мажорних обставин, спричинених дією правового режиму воєнного стану та дефіцитом генеруючих потужностей лінійна напруга в чотирипровідній системі енергопостачання на затискачах 0,4 кВ за спостереженнями знижується від 0,4 кВ (при номінальному режимі) до 0,28 кВ (при максимальному негативному відхиленні), тобто усталене відхилення напруги знаходиться в межах $-30\% \leq \delta U_y \leq 0$.

Скориставшись виразом (3) отримаємо сукупності механічних характеристик двигунів, параметри яких наведено в табл. 1 при значеннях усталеного відхилення напруги $\delta U_y = 0; 5-30\%$.

Як можна бачити на рис. 2–5 пусковий, максимальний (критичний) та номінальний моменти зменшуються пропорційно значенню відхилення напруги δU_y . Тому для оцінки стійкості роботи електроприводу при суттєвому

відхиленні живлячої напруги необхідно порівнювати механічну характеристику двигуна із характеристикою навантаження механізму, який приводиться в рух.

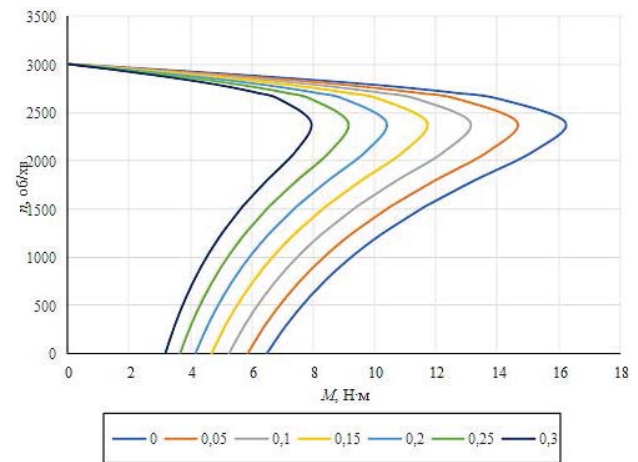


Рис. 2. Сукупність механічних характеристик асинхронного двигуна AIP80B2 при $\delta U_y = 0; 5-30\%$

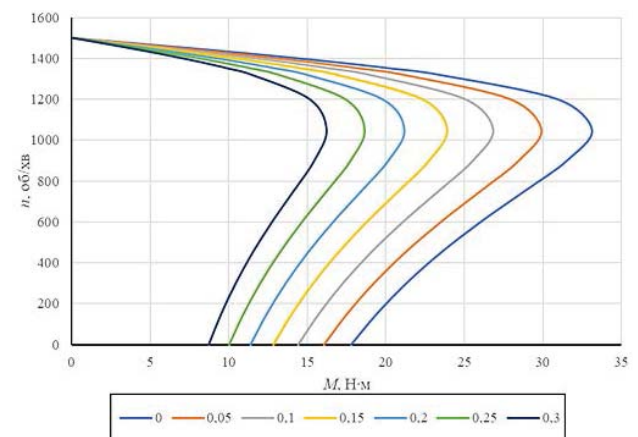


Рис. 3. Сукупність механічних характеристик асинхронного двигуна AIP90L4 при $\delta U_y = 0; 5-30\%$

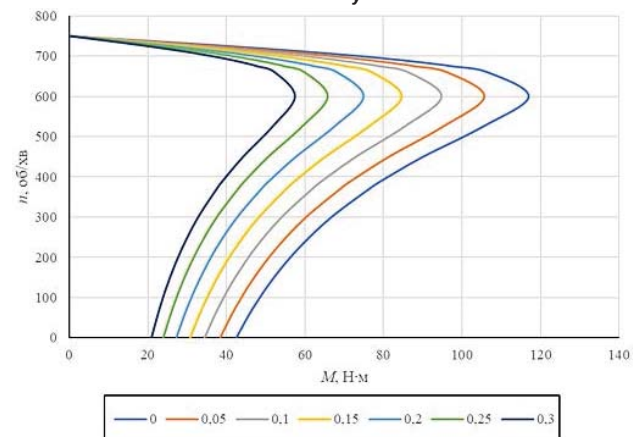


Рис. 4. Сукупність механічних характеристик асинхронного двигуна AIP132S8 при $\delta U_y = 0; 5-30\%$

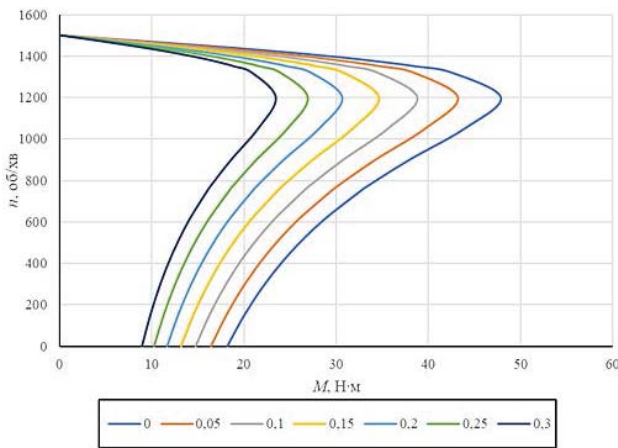


Рис. 5. Сукупність механічних характеристик асинхронного двигуна 4A100S4 при $\delta U_y = 0$; 5–30 %

На рис. 6 показано взаємне розташування сімейства механічних характеристик для асинхронного двигуна AIP63B4 [19] при відхиленні живлячої напруги в межах $\delta U_y = 0$; 5–30 % із характеристиками навантаження від типових механізмів. Залежність «а» – це графік $M_c = \text{const}$, властивий для більшості електроприводів метало оброблювальних верстатів, підйомно-транспортних засобів та промислового транспорту. Залежність «б» – характеристика моменту опору механізму $M_c \sim n^3$; «в» – $M_c \sim n^2$ відповідно. Останні дві криві характерні для загальнопромислових електроприводів, зокрема для турбомеханізмів (насосів та вентиляторів).

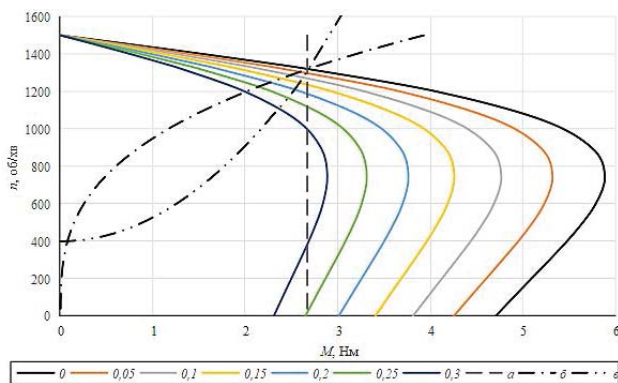


Рис. 6. Порівняння механічних характеристик асинхронного двигуна AIP63B4 [10] та характеристики моменту навантаження основних механізмів технологічного устаткування

Аналізуючи взаємне розташування кривих а, б, в та сукупності механічних характеристик двигуна, отриманих при $\delta U_y = 0$; 5–30 %, можна зробити висновок про те, що найбільш чутливими до відхилення напруги живлення

є електроприводи механізмів із сталим моментом статичного опору $M_c = \text{const}$.

Електроприводи механізмів, які мають залежність моменту опору від швидкості обертання, що відповідають кривим б та в, є більш стійкими до відхилення живлячої напруги в межах $\delta U_y = 0$ –30 %. Так, в такого роду електроприводах при відхиленні напруги буде змінюватися продуктивність робочого органу, або незначно збільшуватися тривалість процесу пуску, проте, достатність пускового моменту та перевантажувальна здатність двигуна очевидно буде забезпечена.

Підібраний за потужністю двигун перевіряється за допустимим перевантаженням і повинен задовольняти умові $(3-4) \times M_c \leq M_{\text{max}}$ [21].

Таким чином, для забезпечення перевантажувальної здатності двигуна з урахуванням значення коефіцієнта λ для загальнопромислових асинхронних двигунів статичний момент опору механізму зазвичай має знаходитись в межах:

$$M_c = (0,5-0,9) \times M_{\text{ном}} \quad (4)$$

Якщо у вираз (3) підставити вираз (4) та прийняти, що в момент пуску $M_{\text{пуск}} = M_c$, а ковзання $s=1$, то можна визначити гранично допустиме значення усталеного відхилення напруги ΔU_y для асинхронного двигуна за умови забезпечення необхідного пускового моменту.

$$\delta U_y = 1 - \sqrt{\frac{k \times \left(\frac{1}{s_{\text{кр}}} + s_{\text{кр}} \right)}{2 \times \lambda}}, \quad (5)$$

де $k=0,5-0,9$ – коефіцієнт, який враховує завантаження приводного двигуна моментом статичного опору.

У табл. 2 представлено гранично допустимі значення δU_y для асинхронних двигунів, параметри яких наведено в табл. 1 за умови забезпечення необхідного пускового моменту при $k=0,7$, отриманих за виразом (5).

Таблиця 2

Гранично допустимі значення δU_y для асинхронних двигунів при $k=0,7$

Тип двигуна	AIP80B2	AIP90L4	AIP132S8	4A100S4
$\delta U_y, \%$	11	23	6	12

Як можна бачити із результатів, представлених у табл. 2, при відхиленні напруги в середньому до значення $\delta U_y = -13 \%$ представлені двигуни не забезпечують необхідного пускового моменту, що робить пускову операцію, або неможливою, або збільшує тривалість пускового періоду.

Для експериментального дослідження зміни техніко-економічних показників (робочих характеристик) асинхронних електроприводів, що працюють в умовах неякісної електричної енергії, зокрема при її відхиленні в межах $\delta U_y = 0-30\%$, можна використовувати методику та схемне рішення, представлені в [22].

Технічні параметри досліджуваного двигуна наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Номинальні дані двигуна типу А51-4А

P_n , кВт	n , об/хв	U_n , В	I_n , А	η_n , %	$\cos\phi_n$
4,5	1440	220/380	17/9,9	83,5	0,83

У результаті проведеного експериментального дослідження отримано графіки залежностей $n=f(M)$ при номінальній напрузі та відхиленні напруги $\delta U_y = 0-30\%$. Сукупність названих характеристик показано на рис. 7.

Як можна бачити на рис. 7, характер зміни моменту двигуна при відхиленні напруги при експериментальному дослідженні співпадає із раніше показаним на рис. 2–5, які було отримано в ході аналітичного розрахунку із використанням виразу (3). Це підтверджує можливість застосування останнього для побудови механічних характеристик асинхронних двигунів при відхиленні живлячої напруги.

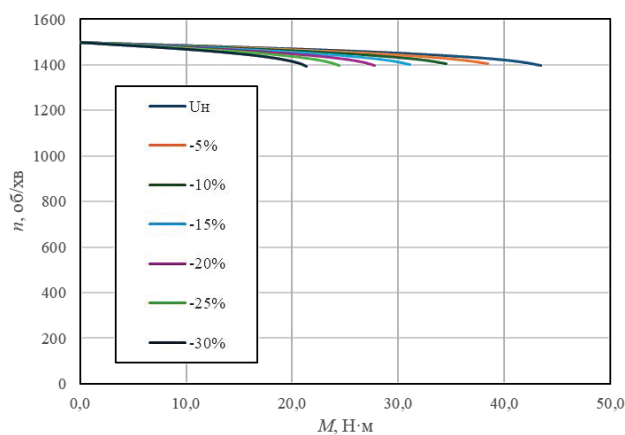


Рис. 7. Сукупність характеристик $n=f(M)$ двигуна типу А51-4А при навантаженні генератором постійного струму П-42 та відхиленні живлячої напруги $\delta U_y = 0-30\%$

На рис. 7 механічні характеристики містять лише частину, де $0 \leq M \leq M_{\max}$, це обумовлено перевантажувальною здатністю генератора П-42, номінальний струм якоря якого становить $I_{я} = 15,65$ А, а максимальний відповідно — $I_{я \max} = 20$ А. Частину характеристики,

де $M_{\text{пуск}} \leq M \leq M_{\max}$ для даної конфігурації дослідного стенду можна отримати шляхом її імітаційного моделювання в середовищі MATLAB Simulink.

Таким чином, використовуючи стенд, схему якого представлено в [22], можна фіксувати безпосередньо криву $n=f(M)$, а також робочі характеристики у вигляді залежностей $P_1, I_1, \eta, \cos\phi, s=f(P_2)$ як при $U_1 = U_{\text{ном}}$, так й при значеннях напруги $U_1 < U_{\text{ном}}$ у діапазоні навантажень за моментом $0 \leq M \leq M_{\max}$ 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 [22].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Аналізом встановлено, що в цілому ряд потужностей електричних двигунів критично важливого обладнання промислових підприємств залізничного транспорту є достатньо широким і покриває діапазон від 0,37 кВт до 22 кВт.

Більшість критично важливих електроприводів має потужність до 5 кВт (78,7%), що дає змогу для забезпечення безперебійного живлення споживачів такої потужності облаштовувати джерела резервного енергопостачання з використанням відновлюваної енергетики.

Навіть в нормальних режимах роботи енергетичної системи питання підвищення якості електричної енергії в мережах живлення нетягових споживачів залізничного транспорту потребує як інженерних, так і адміністративно-технічних рішень. Більше того, коли в результаті форс-мажорних обставин, спричинених військовим станом та втручанням третіх сторін нормативні параметри живлячої мережі не дотримуються, а потреба у надійній роботі критично важливого обладнання підприємств залізничного транспорту стоїть доволі гостро.

Класичний метод розрахунку механічних характеристик асинхронних електродвигунів з використанням виразу формули Клосса отримав подальший розвиток і тепер дозволяє враховувати значення усталеного відхилення напруги живлення двигуна, а отже, дозволяє кількісно оцінити вплив відхилення напруги на механічну характеристику асинхронного двигуна.

Електроприводи турбомеханізмів у діапазоні зміни $\delta U_y = 0\text{--}30\%$ мають більшу стійкість до роботи, ніж електроприводи механізмів із сталим моментом статичного опору $M_c = \text{const}$.

При відхиленні напруги в середньому до значення $\delta U_y = 13\%$ розглянуті двигуни не забезпечують необхідного пускового моменту, що робить пускову операцію, або неможливою, або збільшує тривалість пускового періоду.

Характер зміни моменту двигуна при відхиленні напруги при експериментальному дослідженні співпадає із отриманим для подібного двигуна в ході аналітичного розрахунку, що підтверджує можливість використання

запропонованого виразу для розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів при зміні напруги живлення.

Використання запропонованого дослідного стелю дозволяє фіксувати безпосередньо криву $n=f(M)$, а також робочі характеристики у вигляді залежностей $P_1, I_1, \eta, \cos\phi, s=f(P_2)$ як при $U_1 = U_{\text{ном}}$, так й при значеннях напруги $U_1 < U_{\text{ном}}$ у діапазоні навантажень за моментом $0 \leq M \leq M_{\text{max}}$ для двигунів потужністю до 5 кВт і синхронною частотою обертання 1500 об/хв з метою дослідження впливу відхилення напруги живлення на техніко-економічні показники нерегульованого асинхронного електроприводу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Оцінка впливу якості електроенергії на ефективність електроспоживання / В. Кузнєцов та ін. *Гірничо-електромеханіка та автоматика*. 2018. № 100. С. 85–95. URL: <https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/eis/article/view/407> (дата звернення: 24.07.2025).
2. Адамова С. Аналіз впливу якості електроенергії на роботу струмоприймачів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Т. 8, № 2. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/42> (дата звернення: 24.07.2025).
3. Горошко А., Каштальян А. Вплив несиметрії напруги живлення на характеристики асинхронного двигуна. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Т. 353, № 3.2. С. 110–113. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-13> (дата звернення: 12.08.2025).
4. Induction Motors under Voltage Fluctuations and Power Quality Standards / P. Gnaciński та ін. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023. С. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/tec.2023.3342932> (дата звернення: 12.08.2025).
5. Доскоц В. І., Балійчук О. Ю. Визначення ряду параметрів електроприводів критичного обладнання підприємств залізничного транспорту, як вихідних даних для моделювання стабільності їх роботи. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 29. С. 103–107. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325491> (дата звернення: 03.04.2025).
6. Experimental Benchmarking of Existing Offline Parameter Estimation Methods for Induction Motor Vector Control / B. K. Reddy та ін. *Technologies*. 2024. Т. 12, № 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12080123>
7. Шаповалов О. С., Карасьов О. П. Випробування асинхронних трифазних двигунів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2023. № 18. С. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2019/254550>
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejeng.2016.1.2.115>
9. 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> (дата звернення: 23.12.2025).
10. 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. DOI: <https://doi.org/10.2991/mecs-15.2015.39>
11. Popenda A. Mathematical Modelling of Induction Motor with a Saturated Magnetic Circuit. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2015. Т. 91, № 3. С. 145–150.
12. 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.
13. 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> (дата звернення: 10.12.2025).
14. 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>

15. Електропостачання промислових підприємств залізничного транспорту : навч. посіб. / І. Л. Бондар та ін. Дніпропетровськ : Маков Ю. В., 2012. 268 с.
16. Правила улаштування електроустановок : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 20.06.2014 № 469.
17. Доскоч В. І., Балійчук О. Ю., Муха А. М. До питання визначення ряду потужностей електродвигунів критично важливого технологічного обладнання промислових підприємств залізничного транспорту. Towards a Holistic Understanding: Interdisciplinary Approaches to Tackle Global Challenges and Promotion of Innovative Solutions: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, м. Дніпро, 13–14 берез. 2025 р. Дніпро, 2025. С. 104–106.
18. 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.
19. Доскоч В. І., Балійчук О. Ю. Метод оцінки працездатності критичного обладнання з електроприводом підприємств залізничного транспорту в неномінальних умовах живлячої мережі. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 30. С. 53–60. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2025/340123> (дата звернення: 01.10.2025).
20. Мілих В., Полякова Н. Розрахунок параметрів та характеристик електричних машин : метод. вказівки до розрахунк. завдання. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. 54 с.
21. Дубинець Л. В., Момот О. І., Маренич О. Л. Електричні машини. Синхронні машини. Машини постійного струму : навч. посіб. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В Лазар., 2007. 200 с.
22. Доскоч В. І., Балійчук О. Ю. Постановка експерименту з визначення координат асинхронного електроприводу з використанням стенду взаємного навантаження. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 31. С. 78–86. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2026/352135>

REFERENCES:

1. Kuznietsov, V., et al. (2018). Otsinka vplyvu yakosti elektroenerhii na efektyvnist elektrosposhyvannia [Assessment of the impact of power quality on the efficiency of electricity consumption]. *Girnycha Elektromekhanika ta Avtomatyka*, (100), 85–95. Retrieved from: <https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/eis/article/view/407> [in Ukrainian].
2. Adamova, S. (2018). Analiz vplyvu yakosti elektroenerhii na robotu strumopryimachiv [Analysis of the impact of electric power quality on the operation of current receivers]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 8(2). Retrieved from: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/42> [in Ukrainian].
3. Horoshko, A., & Kashtalian, A. (2025). Vplyv nesymetrii napruhy zhyvlennia na kharakterystyky asynkhronnoho dvyhuna [Influence of supply voltage unbalance on induction motor characteristics]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 353(3.2), 110–113. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-13> [in Ukrainian].
4. Gnaciński, P., et al. (2023). Induction motors under voltage fluctuations and power quality standards. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3342932>
5. Doskoch, V. I., & Balichuk, O. Yu. (2025). Vyznachennia riadu parametriv elektropryvodiv krytychnoho obladdnannia pidpriemstv zaliznychnoho transportu, yak vykhidnykh danykh dlia modeliuvannia stabilnosti yikh roboty [Determination of a range of parameters of electric drives of critical equipment of railway transport enterprises as initial data for modeling their operational stability]. *Transport Systems and Transportation Technologies*, (29), 103–107. <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325491> [in Ukrainian].
6. Reddy, B. K., et al. (2024). Experimental benchmarking of existing offline parameter estimation methods for induction motor vector control. *Technologies*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/technologies12080123>
7. Shapovalov, O. S., & Karasiov, O. P. (2023). Vyprovuvannia asynkhronnykh tryfaznykh dvyhuniv [Testing of three-phase induction motors]. *Elektromahnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti*, (18), 46–50. <https://doi.org/10.15802/ecsr2019/254550> [in Ukrainian].
8. Soliman, H. M. (2016). Studying the steady state performance characteristics of induction motor with field oriented control comparing to scalar control. *European Journal of Engineering and Technology*, 1(2), 18–25.
9. Jadhav, N. S., et al. (2024). Analysis characteristics and performance of induction motor using MATLAB. *Journal of Electrical and Digital Technologies*, 16–24.

10. Tengfei, M. (2015). Simulation study on mechanical properties of three-phase asynchronous motor. In *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Control Systems* (pp. 200–205). <https://doi.org/10.2991/mecs-15.2015.39>
11. Popenda, A. (2015). Mathematical modelling of induction motor with a saturated magnetic circuit. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(3), 145–150.
12. Malyar, V. S. (2016). Mechanical characteristics of a three-phase induction motor supplied from a single-phase network. *Electrical and Computer Engineering, NTU KhPI*, 112–120.
13. Malyar, V. S., Malyar, A. V., & Andreishyn, A. S. (2019). A method for calculating mechanical characteristics of induction motors with squirrel-cage rotor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (2), 9–13. <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.2.02>
14. Konuhova, M. (2025). Induction motor dynamics regimes: A comprehensive analysis. *Applied Sciences*, 15(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app15020350>
15. Bondar, I. L., et al. (2012). *Elektropostachannia promyslovykh pidpriemstv zaliznychnoho transportu [Power supply of industrial enterprises of railway transport]*. Dnipropetrovsk: Makov Yu. V. [in Ukrainian].
16. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine (2014). *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Electrical Installation Regulations]* (Order No. 469, June 20, 2014) [in Ukrainian].
17. Doskoch, V. I., Baliichuk, O. Yu., & Mukha, A. M. (2025). Do pytannia vyznachennia riadu potuzhnosti elektrodvyhuniv krytychno vazhlyvoho tekhnolohichnogo obladnannia promyslovykh pidpriemstv zaliznychnoho transportu [On determining the power range of electric motors of critically important technological equipment of railway transport enterprises]. In: *Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference "Towards a Holistic Understanding: Interdisciplinary Approaches to Tackle Global Challenges and Promotion of Innovative Solutions"* (pp. 104–106). Dnipro [in Ukrainian].
18. State Standard of Ukraine (2023). *DSTU EN 50160:2023. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks*. Kyiv: UkrNDNTs.
19. Doskoch, V. I., & Baliichuk, O. Yu. (2025). Metod otsinky pratsezdatsnosti krytychnoho obladnannia z elektropryvodom pidpriemstv zaliznychnoho transportu v nenominalnykh umovakh zhyvliachoi merezhi [Method for assessing the operability of critical electrically driven equipment of railway transport enterprises under non-nominal supply conditions]. *Transport Systems and Transportation Technologies*, (30), 53–60. <https://doi.org/10.15802/tsst2025/340123> [in Ukrainian].
20. Milikh, V., & Poliakova, N. (2013). *Rozrakhunok parametriv ta kharakterystyk elektrychnykh mashyn [Calculation of parameters and characteristics of electrical machines]*. Kharkiv: NTU "KhPI" [in Ukrainian].
21. Dubynets, L. V., Momot, O. I., & Marench, O. L. (2007). *Elektrychni mashyny. Synkhronni mashyny. Mashyny postiinoho strumu [Electrical machines. Synchronous machines. DC machines]*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport [in Ukrainian].
22. Doskoch, V. I., & Baliichuk, O. Yu. (2026). Postanovka eksperymentu z vyznachennia koordynat asynkhronnogo elektropryvodu z vykorystanniam stendu vzaiemnoho navantazhennia [Experimental procedure for determining induction electric drive coordinates using a mutual loading test bench]. *Transport Systems and Transportation Technologies*, (31), 78–86. <https://doi.org/10.15802/tsst2026/352135> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 06.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)