

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-53-60>

УДК 621.33:629.4

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА МОТОР-ВЕНТИЛЯТОРА ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВУ

Рябов Є.С., Юр'єва О.Ю., Іванов С.В., Жуков А.Ю.

DETERMINATION OF THE RATIONAL VOLTAGE FOR THE INDUCTION MOTOR OF A BLOWER USED FOR COOLING OF LOCOMOTIVE TRACTION MOTORS

Riabov Ye.S., Yurieva O.Yu., Ivanov S.V., Zhukov A.Yu.

Удосконалення допоміжних систем рухомого складу, які забезпечують охолодження тягового електрообладнання, є важливим напрямом підвищення тягово-енергетичних показників рухомого складу магістральних і промислових залізниць. Це визначає актуальність роботи. На сучасному рухомому складі для охолодження тягового електрообладнання використовують мотор-вентилятори з асинхронними двигунами. Регулювання витрати повітря у таких системах здійснюється зміною частоти обертання електродвигуна. При цьому змінювання лінійної напруги може здійснюватися за багатьма законами, внаслідок чого виникає необхідність визначення раціональної величини напруги електродвигуна при фіксованій частоті живлення для забезпечення найвищої енергетичної ефективності електроприводу. У роботі розглянуто трифазний шестиполосний короткозамкнений асинхронний електродвигун потужністю 35 кВт, номінальною лінійною напругою 400 В, номінальною частотою живлення 100 Гц для приводу вентилятора охолодження тягових електродвигунів. Показано, що внаслідок зміни атмосферних умов – температури та атмосферного тиску – потужність електродвигуна може змінюватися у діапазоні від 23 кВт до 33 кВт. Виконані розрахунки характеристик електродвигуна при зміні потужності дозволили визначити, що при зменшенні потужності доцільно зменшувати лінійну напругу, оскільки це підвищує коефіцієнт корисної дії електродвигуна, найбільше збільшення якого становить 0,31 %. Лінійна напруга електродвигуна при номінальній частоті живлення може змінюватися у діапазоні 360–400 В. Досліджено роботу електродвигуна при частоті обертання ротора 2/3 від номінальної, що забезпечує відповідну

витрату охолодного повітря. Виконано розрахунки параметрів електродвигуна та визначено, що найбільші значення ККД відповідають режимам роботи з лінійною напругою 199–234 В для діапазону потужності 6,8–9,8 кВт. Для вказаного діапазону лінійної напруги зростання ККД становить 1,17–2,76 %. При роботі електродвигуна з частотою обертання 1/3 від номінальної найбільше підвищення ККД дорівнює 14,1 % та 19,82 %, досягається при лінійній напрузі 61 В та 44 В при потужності 1,2 кВт та 0,85 кВт відповідно. Для більш точного визначення лінійної напруги з урахуванням втрат у перетворювачі, додаткових втрат у електродвигуні від вищих гармонік струму та напруги, відхилень параметрів електродвигуна та вентиляційного тракту доцільно використання *research controller*, який оцінює потужність, яка споживається електроприводом мотор-вентилятора.

Ключові слова: енергоефективність, енергозбереження, електропривод, асинхронний двигун, мотор-вентилятор, рухомий склад, локомотив

Вступ. Підвищення енергоефективності тягового рухомого складу є важливим фактором для стабільного функціонування та подальшого розвитку вітчизняного залізничного магістрального та промислового транспорту. Перш за все, це стосується наявного рухомого складу, при ремонті та модернізації якого необхідно впровадження енергоресурсозбережних технологій.

Споживання електроенергії допоміжними системами рухомого складу сягає 20 % від загальної кількості електроенергії, що

витрачається на тягу поїздів. При цьому частка, що припадає на нерегульовані приводи вентиляторів охолодження силового електроустаткування, становить не менше 80 % від загальних енерговитрат на власні потреби [1, 2]. На наявному рухомому складі регулювання продуктивності мотор-вентиляторів не передбачене, хоча у більшості випадків продуктивність мотор-вентиляторів перевищує необхідну. Це призводить до неефективного споживання енергії. Наприклад, на магістральних електровозах робота з повною продуктивністю складає лише 25 % часу, а решту часу робота може здійснюватися з витратою, яка становить третину від номінальної [3]. При цьому споживання енергії у такому режимі зменшується приблизно у 10 разів.

Регулювання частоти обертання мотор-вентиляторів передбачає зміну параметрів живлення асинхронного двигуна залежно від навантаження тягових електричних машин, охолодження яких забезпечується мотор-вентилятором [3]. Аналіз сучасних систем живлення мотор-вентиляторів показує, що для найпоширенішим для живлення та керування асинхронними двигунами мотор-вентиляторів локомотивів є використання автономних інверторів напруги [4, 5]. Керування електродвигунами здійснюється зміною напруги та частоти [6]. Оскільки для мотор-вентиляторів не має вимог до високої точності, швидкодії тощо, то раціональним є використання скалярних систем керування.

Для частотно-керованих асинхронних двигунів регулювання напруги здійснюють залежно від частоти обертання. Найуживанішим способом є пропорційний закон зміни напруги та частоти, який описується виразом $U/f = \text{const}$. Для вентиляторного навантаження закон зміни напруги та частоти описується виразом $U/f^2 = \text{const}$. Регулювання за цими законами забезпечує зміну магнітного потоку для підтримання номінального значення кратності максимального моменту, що важливо для забезпечення стійкої роботи механізмів. Однак наведені закони регулювання не дають відповіді про показники енергоефективності електродвигуна та електроприводу в цілому.

Для забезпечення роботи електроприводу з високими показниками енергетичної ефективності використовуються різні стратегії, які мінімізують втрати у електродвигунів [7, 8]. Перший підхід базується на системі керування на основі моделі втрат – Loss Model Controller

(LMC), яка використовується у системі керування частотним перетворювачем [9, 10]. Другий підхід використовує контролер, який визначає та оцінює параметри системи, research controller. Алгоритм керування, реалізований у цьому контролері, працює таким чином: для заданого крутного моменту та частоти обертання вимірюється вхідна потужність, потім змінюється керована координата доти, доки не буде знайдена найменша вхідна потужність [11, 12]. Втім, для мотор-вентиляторів охолодження тягового електрообладнання, режими роботи яких можуть бути визначені наперед, можливо визначити раціональні параметри живлення електродвигуна.

Метою роботи є визначення раціональної напруги асинхронного двигуна для приводу мотор-вентилятора охолодження тягових двигунів локомотивів при зміні режиму роботи мотор-вентилятора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для зменшення споживання енергії мотор-вентиляторами охолодження тягових електродвигунів локомотивів використовують регулювання витрати охолодного повітря [2, 3]. Зазвичай, використовується три ступені: перший – з витратою повітря, що дорівнює 1/3 номінальної, другий – витратою 2/3 від номінальної, третій – з номінальною витратою. Вибір ступеня регулювання витрати охолодного повітря залежить від навантаження тягового електродвигуна.

Витрата охолодного повітря визначає потужність вентилятора, яка, в свою чергу, впливає на споживану потужність електродвигуна мотор-вентилятора.

Потужність вентилятора залежить від густини повітря ρ згідно виразу

$$N = N_0 \cdot \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (1)$$

де N_0 , ρ_0 – потужність вентилятора та густина повітря в початковому стані.

Втім, відомо, що аеродинамічні характеристики вентилятора та вентиляційного тракту залежать від густини повітря, яка визначається температурою та атмосферним тиском за виразом

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \quad (2)$$

де p_0, T_0 – атмосферний тиск та температура повітря при початковому стані;

p, T – атмосферний тиск та температура, для яких розраховується густина повітря ρ .

При змінюванні витрати охолодного повітря пропорційно змінюється частота обертання асинхронного двигуна. При цьому відбувається зміна потужності мотор-вентилятора, яка визначається згідно закону подібності вентиляторів,

$$N = N_{ном} \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^3, \quad (3)$$

де $N_{ном}$ – потужність вентилятора при частоті обертання $n_{ном}$, яка відповідає номінальній витраті повітря;

n – частота обертання, для якої визначається потужність N .

З (1)–(3) виходить, що при незмінності частоти обертання потужність вентилятора змінюватиметься.

Повна потужність, яка споживається асинхронним електродвигуном при заданій частоті обертання і потужності вентилятора, можна виразити через вхідну потужність, знаючи лінійну напругу U , фазний струм I , коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ та ККД асинхронного двигуна η :

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta. \quad (4)$$

Регулювання лінійної напруги U при незмінній частоті обертання призводить до зміни струму, ККД, коефіцієнту потужності електродвигуна. Тому регулюючи лінійну напругу можна досягнути режиму роботи, у якому повна потужність, визначена за (4) буде мінімальною. Однак більш зручним є мінімізація активної потужності, яка споживається від джерела живлення. Це потребує визначення величини лінійної напруги, при якій досягається найвищих ККД електродвигуна. Цей підхід використано у статті.

Для дослідження обрано мотор-вентилятор, який застосовується для охолодження тягових електродвигунів магістральних та маневрових тепловозів. З технічної документації випливає, що потужність вентилятора, який використовується для охолодження трьох тягових електродвигунів одного візка,

становить 26 кВт при частоті обертання 1980 об/хв. Приймемо, що потужність вказана для температури 20 °С та тиску 101,325 кПа. При цих умовах густина повітря становить 1,205 кг/м³.

За вимогами нормативної документації на рухомий склад для кліматичних умов, в яких знаходиться територія України, обладнання має виконуватися при роботі з температурою у діапазоні від мінус 40°С до плюс 40°С. Згідно даних кліматичних спостережень атмосферний тиск може змінюватися від 94,65 кПа до 103,21 кПа.

Тоді густина повітря згідно з (2) при найнижчій температурі та підвищеному тиску становитиме 1,541 кг/м³, а при найвищій температурі та найнижчому тиску – 1,052 кг/м³. Тобто зміна густини повітря змінюється майже у 1,5 рази. Обчислена за (1) потужність становитиме 33 кВт при найнижчій температурі та 23 кВт при найвищій температурі при номінальній частоті обертання мотор-вентилятора. Зміна потужності асинхронного двигуна в такому діапазоні суттєво вплине на енергетичні показники допоміжного електроприводу.

Для дослідження обрано трифазний шестиполосний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, який може бути використаний із серійними вентиляторами, які застосовуються для охолодження тягових електродвигунів. Розрахунки асинхронного двигуна та його характеристик виконано авторами відповідно до [13, 14] при живленні синусоїдною напругою. Температура обмоток приймалася такою, що дорівнює 150°С. Технічні параметри електродвигуна наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Номінальні параметри електродвигуна

Параметр	Значення
Потужність, кВт	35
Напруга лінійна, В	400
Частота живлення, Гц	100
Струм фазний, А	70,4
Частота обертання, об/хв	1980
ККД, %	92,2
Коефіцієнт потужності	0,78

У табл. 2 наведено розрахункові параметри досліджуваного електродвигуна при зміні потужності від 33 кВт до 23 кВт, що відповідає зміні потужності при коливанні температури охолодного повітря. Розрахунки виконано для лінійної напруги 400 В та частоти живлення 100 Гц.

Таблиця 2

Розрахункові параметри електродвигуна при зміні потужності

Параметр	Значення			
Потужність, кВт	33	30	26	23
Напруга лінійна, В	400	400	400	400
Частота живлення, Гц	100	100	100	100
Струм фазний, А	66,9	61,7	55,4	50,7
Частота обертання, об/хв	1981	1982	1985	1987
ККД, %	92,3	92,3	92,12	91,88
Коефіцієнт потужності	0,771	0,759	0,736	0,712

З даних табл. 2 слідує, що при зміні потужності електродвигуна при незмінній напрузі та частоті живлення частота обертання ротора практично не змінюється (збільшення становить 6 об/хв, що становить 0,3 %). Через зменшення потужності зменшується коефіцієнт потужності, оскільки зменшується активна (моментна) складова струму. Фазний струм зменшується не пропорційно зменшенню потужності, оскільки водночас змінюється коефіцієнт потужності (4). Водночас ККД знижується з 92,3 % до 91,88 % при зміні потужності від 33 кВт до 23 кВт.

Оскільки при зменшенні потужності на валу мотор-вентилятора можливо зниження напруги живлення, розглянемо вплив зміни напруги на енергетичні показники електродвигуна. У табл. 3–6 наведені результати розрахунків параметрів асинхронного двигуна. Найнижча напруга відповідає номінальній кратності максимального моменту.

У табл. 3–6 жирним виділені максимальні значення ККД асинхронного двигуна. Саме при цих значеннях параметрів асинхронного двигуна його нагрів буде мінімальним.

Таблиця 3

Параметри електродвигуна при потужності 33 кВт

Параметр	Значення		
Потужність, кВт	33	33	33
Напруга лінійна, В	400	380	365
Частота живлення, В	100	100	100
Струм фазний, А	66,9	68,7	71
Частота обертання, об/хв	1981	1978	1975
ККД, %	92,3	92,2	92,0
Коефіцієнт потужності	0,771	0,789	0,8

Як видно з табл. 3–6, зміна напруги електродвигуна викликає зміну ККД. Для потужностей 33 кВт та 30 кВт ККД дещо зменшується при зниженні лінійної напруги. Для потужності 23 кВт та 26 кВт ККД зростає при зниженні напруги, хоча при цьому фазний струм підвищується. Це пояснюється тим, що

магнітні втрати в магнітопроводі асинхронного двигуна зменшуються більшою мірою, ніж зростають електричні втрати в обмотках. Частота обертання ротора змінюється на незначну величину. Коефіцієнт потужності збільшується в усіх варіантах, оскільки при зменшенні напруги зменшується магнітний потік.

Таблиця 4

Параметри електродвигуна при потужності 30 кВт

Параметр	Значення		
Потужність, кВт	30	30	30
Напруга лінійна, В	400	380	365
Частота живлення, В	100	100	100
Струм фазний, А	61,7	63,2	65,1
Частота обертання, об/хв	1982	1981	1979
ККД, %	92,3	92,3	92,2
Коефіцієнт потужності	0,759	0,779	0,794

Таблиця 5

Параметри електродвигуна при потужності 26 кВт

Параметр	Значення			
Потужність, кВт	26	26	26	26
Напруга лінійна, В	400	380	365	345
Частота живлення, В	100	100	100	100
Струм фазний, А	55,4	56,2	57,5	59,2
Частота обертання, об/хв	1985	1984	1982	1978
ККД, %	92,12	92,21	92,24	92,19
Коефіцієнт потужності	0,736	0,76	0,779	0,793

Таблиця 6

Параметри електродвигуна при потужності 23 кВт

Параметр	Значення				
Потужність, кВт	23	23	23	23	23
Напруга лінійна, В	400	380	365	345	330
Частота живлення, В	100	100	100	100	100
Струм фазний, А	50,7	51,6	52,0	53,3	55,1
Частота обертання, об/хв	1987	1986	1984	1982	1980
ККД, %	91,88	92,06	92,16	92,19	92,15
Коефіцієнт потужності	0,712	0,734	0,761	0,779	0,794

Таким чином, для режимів роботи зі зменшеною потужністю зниження лінійної напруги змінює ККД асинхронного двигуна. Найбільше підвищення ККД становить 0,31 % при потужності 23 кВт і лінійній напрузі 345 В. Виходячи з даних табл. 3–6 можна рекомендувати зміну лінійної напруги асинхронного двигуна у діапазоні 400–360 В при зміні його потужності.

Розглянемо режими роботи електродвигуна при частоті обертання 1320 об/хв, яка відповідає другому ступеню регулювання – 2/3 витрати повітря. Згідно з (3) найбільша потужність становитиме 9,8 кВт, найменша – 6,8 кВт.

Згідно з законами частотного регулювання при зниженні частоти живлення необхідно зниження напруги, якою живиться асинхронний двигун. У табл. 7–9 наведено результати розрахунків параметрів електродвигуна при різній потужності. У табл. 7–9 значення лінійної напруги 267 В можна отримати для пропорційного закону частотного регулювання ($U/f = \text{const}$); значення 178 В – для квадратичного ($U/f^2 = \text{const}$).

Таблиця 7

Параметри електродвигуна при потужності 9,8 кВт

Параметр	Значення					
	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Потужність, кВт	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Напруга лінійна, В	267	251	234	217	199	178
Частота живлення, Гц	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
Струм фазний, А	39,4	38,6	38,4	39,5	40,2	42,4
Частота обертання, об/хв	1326	1325	1324	1321	1320	1316
ККД, %	89,65	90,15	90,55	90,82	90,81	90,59
Коефіцієнт потужності	0,6	0,648	0,697	0,759	0,777	0,810

Таблиця 8

Параметри електродвигуна при потужності 8,3 кВт

Параметр	Значення					
	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Потужність, кВт	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Напруга лінійна, В	267	251	234	217	199	178
Частота живлення, Гц	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
Струм фазний, А	36,8	35,6	34,9	35,3	36,3	37,1
Частота обертання, об/хв	1327	1326	1325	1323	1321	1319
ККД, %	88,77	89,42	90,0	90,56	90,69	90,67
Коефіцієнт потужності	0,55	0,6	0,652	0,722	0,765	0,784

Таблиця 9

Параметри електродвигуна при потужності 6,8 кВт

Параметр	Значення					
	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Потужність, кВт	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Напруга лінійна, В	267	251	234	217	199	178
Частота живлення, Гц	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
Струм фазний, А	34,4	32,9	31,8	31,3	31,4	32,1
Частота обертання, об/хв	1328	1327	1326	1325	1324	1322
ККД, %	87,4	88,2	89,0	89,9	90,16	90,1
Коефіцієнт потужності	0,489	0,539	0,593	0,671	0,696	0,744

Аналіз табл. 7–9 показує, що зміна лінійної напруги супроводжується зміною фазного струму, ККД та коефіцієнту потужності. При цьому найменші значення ККД відповідають найбільшому значенні напруги 267 В. Це є наслідком роботи при значному магнітному потоці, що призводить до збільшення магнітних втрат.

При зниженні лінійної напруги спочатку спостерігається спадання фазного струму, а потім йде його зростання. При цьому найбільший ККД не відповідає режиму з

мінімальним струмом. Найбільші значення ККД відповідають роботі з лінійною напругою 199–234 В для різних значень потужності. На цей діапазон напруги припадають мінімальні значення струмів. Для розглянутих режимів зростання ККД становить 1,17–2,76 %.

Таким чином, при роботі електродвигуна з частотою 2/3 від номінальної при зміні лінійної напруги змінюється ККД електродвигуна. Найвищі значення ККД досягаються при лінійній напрузі 199–234 В, найнижчі – при лінійній напрузі 267 В. Змінювання лінійної напруги відповідає пропорційному закону частотного регулювання.

Розглянемо роботу електродвигуна при частоті обертання 660 об/хв, яка відповідає 1/3 витрати повітря. Найбільша потужність у цьому режимі складе становитиме 1,2 кВт, найменша – 0,85 кВт.

У табл. 10 та 11 наведено результати розрахунків параметрів електродвигуна при роботі з частотою обертання 660 об/хв. Лінійна напруга 133 В відповідає зміні напруги за пропорційним законом частотного регулювання, напруга 44 В – за квадратичним законом.

Таблиця 10

Параметри електродвигуна при потужності 1,2 кВт

Параметр	Значення					
	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Потужність, кВт	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Напруга лінійна, В	133	113	95	78	61	44
Частота живлення, Гц	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Струм фазний, А	29,9	24,4	21,2	19,0	18,3	20,5
Частота обертання, об/хв	664	663	662	660	657	650
ККД, %	71,57	77,45	81,3	84,2	85,67	84,46
Коефіцієнт потужності	0,243	0,326	0,423	0,556	0,728	0,89

Таблиця 11

Параметри електродвигуна при потужності 0,85 кВт

Параметр	Значення					
	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Потужність, кВт	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Напруга лінійна, В	133	113	95	78	61	44
Частота живлення, Гц	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Струм фазний, А	29,4	23,7	20,2	17,4	15,5	15,8
Частота обертання, об/хв	665	664	663	662	660	654
ККД, %	64,63	71,69	76,67	80,88	83,84	84,45
Коефіцієнт потужності	0,194	0,256	0,332	0,448	0,621	0,815

Результати табл. 10–11 свідчать, що зміна лінійної напруги приводить до зміни ККД. Найбільші значення ККД досягаються при лінійній напрузі 61 В та 44 В при потужності 1,2 кВт та 0,85 кВт відповідно. Зростання ККД становить 14,1 % та 19,82 %. При цьому найбільшим значенням ККД не відповідають

мінімуми струму. Найменші значення ККД досягаються при напрузі 133 В, яка відповідає пропорційному закону частотного регулювання.

На підставі проведених розрахунків та аналізу результатів отримано, що підвищення енергоефективності асинхронного двигуна може бути досягнуто зміною напруги живлення. Найбільше цей ефект проявляється при роботі зі зменшеною частотою обертання. Це пояснюється тим, що активні частини електродвигуна оптимально спроектовані для роботи при номінальних значеннях частоти та потужності. При зміні режимів розміри магнітопроводу та обмоток є «надлишковими», внаслідок чого виникають підвищені втрати.

Отримані результати показують, що для кожного режиму з фіксованою частотою живлення можна наперед визначити діапазон значень лінійної напруги асинхронного двигуна, у якому він буде працювати з найбільшим ККД при зміні потужності електродвигуна. Це є важливим, оскільки визначення потужності асинхронного двигуна безпосередньо під час роботи мотор-вентилятора неможливе. Це пов'язано з постійною зміною температури повітря та можливими відхиленнями параметрів вентиляційного тракту (наприклад, при забрудненні вентиляційних каналів).

Втім варто відзначити, що при живленні асинхронного електродвигуна при від інвертора напруги необхідно враховувати втрати в інверторі та втрати в електродвигуні від вищих гармонік струму та напруги. Визначення цих втрат потребує великого обсягу розрахунків та детальної інформації про параметри перетворювача та електродвигуна для вищих гармонік. Крім того, вказані втрати залежать від параметрів широтно-імпульсної модуляції, теплового стану обмоток електродвигуна та напівпровідникових приладів інвертора тощо. Іншим аспектом є те, що електродвигуни мають певний розкид параметрів, що є неминучим при його виготовленні. Для врахування цих факторів пропонується використання *research controller*, який оцінює потужність, яка споживається електроприводом при зміні лінійної напруги електродвигуна, та визначає у такий спосіб оптимальну напругу живлення електродвигуна для поточного режиму роботи мотор-вентилятора.

Висновки. Для підвищення енергетичної ефективності рухомого складу доцільним є регулювання продуктивності мотор-вентиляторів охолодження тягового електрообладнання. При використанні

електричного приводу мотор-вентиляторів це здійснюється регулюванням частоти обертання електродвигуна.

Особливістю роботи мотор-вентиляторів є зміна потужності при зміні параметрів атмосферного повітря. Це потребує оптимізації живлення електродвигунів для зменшення споживання енергії електроприводом вентиляторів.

В роботі досліджено вплив зміни напруги живлення електродвигуна на енергетичні показники при зміні його потужності при зміні температури та атмосферного тиску навколишнього середовища. Визначено, при номінальній частоті живлення раціональним є живлення з лінійною напругою 360–400 В при зміні потужності у діапазоні 23–33 кВт.

При частоті живлення, якій відповідає витрата охолодного повітря 2/3 від номінальної витрати, найвищі значення ККД досягаються при роботі з лінійною напругою 199–234 В при зміні потужності у діапазоні 6,8–9,8 кВт. При частоті живлення, якій відповідає витрата охолодного повітря 1/3 від номінальної витрати, найбільші значення ККД досягаються при роботі з лінійною напругою 44–61 В при зміні потужності у діапазоні 0,85–1,2 кВт. Для точного визначення оптимального значення лінійної напруги для поточного режиму роботи доцільно використання *research controller*, який оцінює потужність, яка споживається електроприводом мотор-вентилятора. Подальші дослідження будуть спрямовані розробку та дослідження роботи *research controller* для електроприводу мотор-вентиляторів охолодження рухомого складу.

Література

1. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу : підручник : у 2 ч. / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. Харків : УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
2. Гулак С. О. Підвищення енергетичних показників електровозів змінного струму за рахунок адаптованої до системи електропостачання компенсації реактивної потужності [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 / С. О. Гулак ; наук. керівник В. П. Ткаченко ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2020. 23 с. Режим доступу : <https://nbuv.gov.ua/>
3. Варченко Е. В., Чумак В. В., Оливсон В. М. Модернізація системи вентиляції електровозов перемінного тока ВЛ80. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені

- академіка В. Лазаряна. 2008. Вип. 22. С. 10–12. Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2008_22_4
4. Steimel A. *Electric traction — Motion Power and Energy Supply*. 2nd ed. München : Deutscher Industrieverlag, 2014.
 5. Iľončiak J., Struharnanský L., Kuchta J. Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 359–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
 6. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. 2-ге вид., переробл. і доповн. Харків : Точка, 2017. 206 с.
 7. Waheedabeevi M., Sukeshkumar A., Nair N. S. New online loss-minimization-based control of scalar and vector-controlled induction motor drives. 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Bengaluru, India, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/PEDES.2012.6484347
 8. Khoury G., Ghosn R., Khatounian F., Fadel M., Tientcheu M. An energy-efficient scalar control taking core losses into account. *COMPEL*. 2018. Vol. 37, No. 2. P. 849–867. DOI: 10.1108/COMPEL-08-2017-0324
 9. Attaianese C., Monaco M. D., Tomasso G. Maximum Torque Per Watt (MTPW) field-oriented control of induction motor. *Electrical Engineering*. 2021. Vol. 103. P. 2611–2623. DOI: 10.1007/s00202-021-01238-0
 10. Graciola C. L., Goedel A., Castoldi M. F., Souza W. A., Nunes E. A., Santos T. H., da Silva L. C. P. Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors. *Systems Science & Control Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 1. Article 2481942. DOI: 10.1080/21642583.2025.2481942
 11. Kirschen D., Novotny D., Lipo T. On-line efficiency optimization of a variable frequency induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1985. Vol. 21. P. 610–615. DOI: 10.1109/TIA.1985.349717
 12. Kioskeridis I., Margaris N. Loss minimization in scalar-controlled induction motor drives with search controllers. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1996. Vol. 11, No. 2. P. 213–220. DOI: 10.1109/63.486168
 13. Мілих В. І. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора : навч. посібник. Харків : ФОП Панов А. М., 2023. 112 с.
 14. Осташевський М. О., Петренко О. М., Юр'єва О. Ю. Теплові розрахунки електричних машин : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 450 с.
- ### References
1. Konstruktsiia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu : pidruchnyk : u 2 ch. / S. V. Panchenko, M. M. Babaiev, V. S. Blyndiuk ta in. Kharkiv : UkrDUZT, 2018. Ch. 1. 280 p.
 2. Hulak S. O. Pidvyshchennia enerhetychnykh pokaznykiv elektrovoziv zminnoho strumu za rakhunok adaptovanoi do systemy elektropostachannia kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti [Elektronnyi resurs] : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.09 / S. O. Hulak ; nauk. kerivnyk V. P. Tkachenko ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". Kharkiv, 2020. 23 p. URL : <https://nbuv.gov.ua/>
 3. Varchenko E. V., Chumak V. V., Olyvson V. M. Modernyzatsiia systemy ventyliatsyy elektrovozov peremennoho toka VL80. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana. 2008. Vyp. 22. S. 10–12. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2008_22_4
 4. Steimel A. *Electric traction — Motion Power and Energy Supply*. 2nd ed. München : Deutscher Industrieverlag, 2014.
 5. Iľončiak J., Struharnanský L., Kuchta J. Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 359–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
 6. Suchasni peretvoriuvachi chastoty v systemakh elektropryvoda : navch. posibnyk / M. V. Zahirniak, T. V. Korenkova, A. P. Kalinov, A. I. Hladyr, V. H. Kovalchuk. 2-he vyd., pererobl. i dopovn. Kharkiv : Tochka, 2017. 206 p.
 7. Waheedabeevi M., Sukeshkumar A., Nair N. S. New online loss-minimization-based control of scalar and vector-controlled induction motor drives. 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Bengaluru, India, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/PEDES.2012.6484347
 8. Khoury G., Ghosn R., Khatounian F., Fadel M., Tientcheu M. An energy-efficient scalar control taking core losses into account. *COMPEL*. 2018. Vol. 37, No. 2. P. 849–867. DOI: 10.1108/COMPEL-08-2017-0324
 9. Attaianese C., Monaco M. D., Tomasso G. Maximum Torque Per Watt (MTPW) field-oriented control of induction motor. *Electrical Engineering*. 2021. Vol. 103. P. 2611–2623. DOI: 10.1007/s00202-021-01238-0
 10. Graciola C. L., Goedel A., Castoldi M. F., Souza W. A., Nunes E. A., Santos T. H., da Silva L. C. P. Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors. *Systems Science & Control Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 1. Article 2481942. DOI: 10.1080/21642583.2025.2481942
 11. Kirschen D., Novotny D., Lipo T. On-line efficiency optimization of a variable frequency

- induction motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications. 1985. Vol. 21. P. 610–615. DOI: 10.1109/TIA.1985.349717
12. Kioskeridis I., Margaritis N. Loss minimization in scalar-controlled induction motor drives with search controllers. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1996. Vol. 11, No. 2. P. 213–220. DOI: 10.1109/63.486168
 13. Milykh V. I. Proiektuvannya tryfaznykh asynkhronnykh dvyhuniv z korotkozamknenoiu obmotkoiu rotora : navch. posibnyk. Kharkiv : FOP Panov A. M., 2023. 112 p.
 14. Ostashevskiy M. O., Petrenko O. M., Yurieva O. Yu. Teplovi rozrakhunky elektrychnykh mashyn : navch. posibnyk. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2020. 450 p.

Riabov Ye. S., Yurieva O. Yu., Ivanov S. V., Zhukov A. Yu. Determination of the Rational Voltage for the Induction Motor of a Blower Used for Cooling of Locomotive Traction Motors

Improving the auxiliary systems of rolling stock responsible for cooling traction electrical equipment is an important direction for enhancing the traction-energy performance of mainline and industrial railway vehicles. This substantiates the relevance of the present study. Modern rolling stock employs motor-fan units equipped with induction motors to provide cooling for traction electrical equipment. Regulation of the airflow rate in such systems is achieved by varying the rotational speed of the electric motor. At the same time, the line voltage can be modified according to various control laws, which creates the need to determine the rational value of the motor supply voltage at a fixed supply frequency to ensure the highest energy efficiency of the electric drive.

The study considers a three-phase, six-pole, squirrel-cage induction motor rated at 35 kW, with a nominal line voltage of 400 V and a nominal supply frequency of 100 Hz, used to drive the cooling fan of traction motors. It is shown that due to variations in ambient conditions—namely temperature and atmospheric pressure—the motor power may vary in the range from 23 kW to 33 kW. Calculations of motor characteristics under changing power levels indicate that, when the power decreases, reducing the line voltage is advisable because it increases the motor efficiency,

with the maximum improvement reaching 0.31%. Under nominal supply frequency, the motor's line voltage may vary within the range of 360–400 V.

The operation of the motor at a rotor speed equal to two-thirds of the nominal value was investigated, corresponding to the required cooling airflow rate. Motor parameter calculations show that the highest efficiency values correspond to operation with a line voltage of 199–234 V for a power range of 6.8–9.8 kW. Within this voltage range, the efficiency improvement lies between 1.17 % and 2.76 %. When the motor operates at one-third of the nominal rotational speed, the maximum efficiency increase reaches 14.1% and 19.82%, achieved at line voltages of 61 V and 44 V for power levels of 1.2 kW and 0.85 kW, respectively.

For more accurate determination of the optimal line voltage—considering converter losses, additional losses in the motor caused by higher current and voltage harmonics, as well as deviations in motor and ventilation-duct parameters—the use of a research controller is recommended. Such a controller evaluates the power consumed by the motor-fan electric drive.

Keywords: energy efficiency, energy saving, electric drive, induction motor, blower, rolling stock, locomotive

Рябов Євген Сергійович – канд. техн. наук, ст. наук. співроб., доцент, доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», YEVHEN.RIABOV@khp.edu.ua

Юр'єва Олена Юрїївна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електричні машини», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Olena.Yurieva@khp.edu.ua

Іванов Станіслав Вікторович – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Stanislav.V.Ivanov@ieee.khp.edu.ua

Жуков Антон Юрїйович – ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод», zukan83@gmail.com

Стаття подана 10.01.2026.