

Енергетика багатомоторного електроприводу

В. А. Войтенко¹, кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; e-mail: voitenko@op.edu.ua;

Scopus Author ID: 57344261700; Researcher ID: LFT-9616-2024

А. О. Кнюх², магістр

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6256-6409>; e-mail: andr0kn0ale@gmail.com

В. А. Водічев¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>; e-mail: vva@eei.opu.ua;

Scopus Author ID: 6602754799

О. Г. Калінін¹, інженер електрик

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; e-mail: agk@opu.ua

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

² Приватний дослідник

Анотація. Мета наукової роботи полягає в зменшенні втрат енергії в тяговому електроприводі транспортних засобів. В доповіді на конференції порівнюється потужність втрат енергії в тягових асинхронних двигунах великої і малої потужності в залежності від значення рушійного моменту, який розвиває тяговий електропривод електротранспортного засобу. Проведено дослідження залежності енергетичної ефективності багатомоторного електропривода відносно одномоторного електропривода при зміні рушійного моменту. Побудовано графіки залежності енергетичної ефективності багатомоторного тягового електропривода відносно одномоторного тягового електропривода при зміні сумарного рушійного моменту для різної кількості двигунів, задіяних в багатомоторному електроприводі. За результатами проведеного енергетичного аналізу розраховано значення ККД асинхронних двигунів при різному значенні потужності, яку вони розвивають, та проведено порівняння розрахованих значень ККД зі значеннями ККД, наведеними в довіднику.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун, потужність, енергія, втрати, момент, ефективність, частота напруги.

Цитування статті: Войтенко В. А., Кнюх А. О., Водічев В. А., Калінін О. Г. (2026). Енергетика багатомоторного електроприводу. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 46(122), с.26-38 doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.3>

Вступ

В електротранспортних засобах (ЕТЗ) важливо мінімізувати втрати енергії, оскільки це збільшує відстань пересування електротранспортних засобів на одному заряді акумуляторної батареї і зменшує вартість транспортування пасажирів і вантажу. Тому проблема зменшення втрат енергії в тягових електроприводах транспортних засобів є актуальною.

Велика кількість наукових статей присвячена проблемі мінімізації втрат енергії в асинхронних електроприводах. Аналіз втрат енергії у маг-

нітній системі асинхронного двигуна здійснено в роботах [1, 2, 3]. У статтях [4, 5, 6] проводиться аналіз втрат енергії в АД, які працюють разом із перетворювачами частоти. Втрати енергії в асинхронному електроприводі з векторним керуванням досліджуються в [7]. У статтях [8] і [9] проводиться аналіз втрат енергії, обумовлених наявністю вищих гармонік, та оцінюється вплив різних схем ШІМ на втрати енергії в асинхронних двигунах. Графічний метод розрахунку втрат енергії в асинхронному двигуні при наявності несиметричної напруги на обмотці статора розглянуто в роботі [10].

Еквівалентну схему асинхронного двигуна, яка враховує додаткові втрати енергії, запропоновано у [11] і [12]. Проблему мінімізації втрат енергії в асинхронному двигуні методами керування розглянуто в [13, 14, 15, 16]. В статтях [17, 18, 19] аналізуються втрати енергії в одномоторному та в багатомоторному тягових асинхронних електроприводах при русі ЕТЗ з постійною швидкістю та з постійним прискоренням. Все це дає можливість обґрунтувати вибір найкращого за енергетичними показниками одномоторного або багатомоторного тягового електроприводу з відповідною системою керування, призначеного для ЕТЗ.

1 Напрямок дослідження

Метою роботи є аналіз та обґрунтування доцільності застосування у міському транспортному засобі багатомоторного електроприводу замість одномоторного електроприводу для зменшення втрат електричної енергії.

Потрібне значення рушійного моменту, який має розвивати тяговий електропривод, може бути забезпечене за допомогою одного тягового двигуна достатньої великої потужності, або за допомогою декількох тягових двигунів меншої потужності. В одномоторному тяговому електроприводі використовується один двигун великої потужності, який працює і при малому навантаженні і при великому навантаженні. В багатомоторному тяговому електроприводі використовується декілька тягових двигунів меншої потужності. В залежності від навантаження тягового електроприводу, можна використовувати різну кількість тягових двигунів. Потужність втрат енергії в електроприводі залежить від кількості задіяних двигунів, від значення моменту наван-

таження на валу кожного двигуна та від значення швидкості обертання його валу. Звідси витікає, що при однакових умовах експлуатації потужність втрат енергії в одномоторному та в багатомоторному тяговому електроприводі може бути різною. Тому при різних значеннях навантаження тягового електроприводу необхідно порівняти потужність втрат енергії в одному двигуні великої потужності, який входить до складу одномоторного тягового електроприводу, з сумарною потужністю втрат енергії в декількох двигунах меншої потужності, які входять до складу багатомоторного тягового електроприводу.

Порівняльний аналіз енергетичних показників одномоторного і багатомоторного асинхронних тягових електроприводів проведено на прикладі тягового електроприводу, який призначено для електричної модифікації міського автобуса «Богдан» А-092. В базовій конструкції автобуса «Богдан» А-092 використовується дизельний двигун внутрішнього згоряння потужністю 89 кВт. Тому для одномоторного асинхронного тягового електроприводу електробуса «Богдан» А-092 було обрано АД потужністю 90 кВт з синхронною частотою обертання валу 1500 об/хв. Оскільки, відповідно до правил дорожнього руху, швидкість громадського транспорту в місті не повинна перевищувати 50 км/год, то передавальне число трансмісії електробусу було обрано таким, щоб при синхронній частоті обертання валу АД 1500 об/хв максимальна швидкість електробусу дорівнювала 56,5 км/год. Входячи з цього проведено розрахунок значення сумарного моменту навантаження на валу тягового двигуна при русі порожнього електробуса і при русі повного електробуса по горизонтальній дорозі з постійною максимальною швидкістю. Результати розрахунків занесені до таблиці 1.

Таблиця 1 - Результат розрахунку сумарного моменту навантаження тягового електроприводу міського автобуса

| Умови руху електробуса | Сумарний момент навантаження на валу тягового двигуна, Н·м | Сумарна потужність, яку має розвивати тяговий двигун, Вт |
|---|--|--|
| Рух порожнього електробуса по горизонтальній дорозі з максимальною швидкістю. | 179,2 | 28152 |
| Рух повного електробуса по горизонтальній дорозі з максимальною швидкістю. | 240,6 | 37798 |

В подальшому розглянуто багатомоторний електропривод, в якому використовується декілька двигунів потужністю 30 кВт і одномоторний електропривод, в якому використовується один двигун потужністю 90 кВт.

Для досліджень обрано асинхронні двигуни зі синхронною частотою обертання валу 1500

об/хв типу 4А180М4, номінальною механічною потужністю 30,0 кВт, та 4А250М4, номінальною механічною потужністю 90,0 кВт.

Основні технічні параметри цих асинхронних двигунів для номінального режиму роботи наведено в таблиці 2 [20].

Таблиця 2 - Основні технічні параметри асинхронних двигунів 4A180M4 і 4A250M4 для номінального режиму роботи

| Параметри АД | Позначення | 4A180M4 | 4A250M4 |
|--|---------------------------|---------|---------|
| Номінальна механічна потужність АД, кВт | $P_{2\text{НОМ}}$ | 30,0 | 90,0 |
| Номінальне значення ККД, % | η_{H} | 91 | 93 |
| Номінальне значення $\cos \varphi$, в. о. | $\cos \varphi_{\text{H}}$ | 0,89 | 0,91 |
| Відносне значення опору фази обмотки статора, в. о. | R_1 | 0,034 | 0,024 |
| Відносне значення опору фази обмотки ротора, в. о. | R_2' | 0,018 | 0,014 |
| Номінальне ковзання ротора АД, % | s_{H} | 1,9 | 1,3 |
| Номінальне значення кутової швидкості обертання валу АД, рад/с | ω_{H} | 154,096 | 155,0 |
| Номінальне значення рушійного механічного моменту АД, Н·м | $M_{\text{АД.Н}}$ | 194,68 | 580,5 |
| Критичне значення рушійного механічного моменту АД на природній механічній характеристиці, Н·м | $M_{\text{К}}$ | 447,76 | 1335,8 |

На підставі даних таблиці 1 і технічних параметрів АД, наведених в таблиці 2, можна зробити висновок, що для тривалого руху порожнього електробусу по горизонтальній дорозі з максимальною швидкістю достатньо мати один двигун потужністю 30 кВт з синхронною частотою обертання валу 1500 об/хв.

2. Аналіз енергетичних показників асинхронного двигуна в номінальному режимі роботи.

На першому етапі порівняння енергетичних показників одномоторного і багатомоторного електроприводів було проведено на підставі аналізу втрат енергії в тягових АД при номінальному значенні напруги на обмотці статора і при номінальному значенні моменту навантаження на валу кожного тягового двигуна.

Розрахунок сумарної потужності втрат енергії в АД та розрахунок її окремих складових

втрат енергії в асинхронних двигунах типів 4A180M4 і 4A250M4 було проведено для номінального режиму роботи АД на підставі паспортних даних цих двигунів та параметрів Г-подібної схеми заміщення АД [17-20]. Результати розрахунків наведено у таблиці 3.

3. Аналіз втрат енергії в асинхронних двигунах одномоторного і багатомоторного тягових електроприводів

Вважаємо, що система керування електроприводом забезпечує номінальне значення струму намагнічування і номінальне значення магнітної індукції в АД при будь-якому значенні моменту, який буде розвивати АД, і при будь-якому значенні кутової швидкості обертання валу АД. Тоді при номінальному значенні частоти і при номінальному значенні магнітної індукції потужність втрат енергії в сталі буде постійною і буде дорівнювати

Таблиця 3 - Потужності втрат енергії в асинхронних двигунах типу 4A180M4 і 4A250M4 при їх роботі в номінальному режимі

| Параметри АД | Позначення | 4A180M4 | 4A250M4 |
|--|----------------------------|---------|---------|
| Сумарна номінальна потужність втрат енергії, Вт | ΔP_{H} | 2967,0 | 6774,2 |
| Складові втрат енергії в АД | | | |
| Потужність додаткових втрат енергії, Вт | $\Delta P_{\text{ДОД.Н}}$ | 164,8 | 483,9 |
| Потужність втрат енергії в сталі, Вт | $\Delta P_{\text{С1.Н}}$ | 861,854 | 2631,1 |
| Номінальна потужність втрат енергії на активному опорі обмотки ротора, Вт | $\Delta P_{\text{М2.Н}}$ | 581,026 | 1185,4 |
| Складові втрат енергії в обмотці статора | | | |
| Номінальна потужність втрат енергії в обмотці статора від струму ротора, Вт | $\Delta P_{\text{М1.Н}}$ | 1097,49 | 2034,6 |
| Номінальна потужність втрат енергії в обмотці статора від струму намагнічування, $\Delta P_{\text{М1.0.Н}}$, Вт | $\Delta P_{\text{М1.0.Н}}$ | 261,83 | 439,2 |

потужності втрат енергії в сталі АД для номінального режиму роботи АД. Таким чином, при постійному значенні частоти напруги на обмотці статора АД і при постійному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД втрати енергії в АД можна розділити на постійні втрати, потужність яких не залежить від моменту АД, і на змінні втрати енергії, потужність яких залежить від моменту, який розвиває АД.

До постійних втрат віднесені втрати енергії в магнітній системі АД і втрати енергії на активному опорі обмотки статора від струму намагнічування. Для номінального значення частоти напруги на обмотці статора АД і для номінального значення струму намагнічування номінальне значення потужності постійних втрат енергії в АД дорівнюватиме:

Таблиця 4 - Номінальні значення потужностей постійних і змінних втрат енергії в асинхронних двигунах 4A180M4 та 4A250M4

| Параметри АД | Позначення | 4A180M4 | 4A250M4 |
|---|----------------------|----------|---------|
| Номінальна потужність постійних втрат енергії, Вт | $\Delta P_{H.CONST}$ | 1123,684 | 3070,3 |
| Номінальна потужність змінних втрат енергії, Вт | $\Delta P_{H.VARIA}$ | 1843,316 | 3703,9 |

ченні частоти напруги на обмотці статора, при номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД і при довільному значенні моменту, який розвиває АД, визначається за формулою:

$$\Delta P_{VARIA} = \Delta P_{H.VARIA} \cdot \left(\frac{M_{\Sigma IM}}{N_i \cdot M_{IM.H}} \right)^2 \quad (3)$$

де $M_{\Sigma IM}$ – сумарний момент, який розвиває тяговий електропривод, Н·м;

N_i – кількість двигунів, які працюють у складі тягового електроприводу.

При постійному номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора і при номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД потужність постійних втрат енергії не змінюється (4) при зміні моменту навантаження на валу АД:

$$\Delta P_{CONST} = \Delta P_{H.CONST} \quad (4)$$

Сумарна потужність втрат енергії в двигунах потужністю 30 кВт, кількість яких дорівнює N_{30} , визначається формулою (5):

$$\Delta P_{\Sigma 30} = (\Delta P_{VARIA.30} + \Delta P_{CONST.30}) \cdot N_{30}, \quad (5)$$

де $\Delta P_{VARIA.30}$; $\Delta P_{CONST.30}$ – відповідно, змінні і постійні втрати енергії в одному АД, який має потужність 30 кВт;

N_{30} – кількість асинхронних двигунів потужністю 30 кВт.

$$\Delta P_{H.CONST} = \Delta P_{C1.H} + \Delta P_{M1.0.H} \quad (1)$$

До змінних втрат віднесені втрати енергії на активному опорі обмотки статора і на активному опорі обмотки ротора від струму, який діє в обмотці ротора, а також додаткові втрати енергії в АД. Для номінального режиму роботи АД номінальне значення потужності змінних втрат енергії в АД дорівнюватиме:

$$\Delta P_{H.VARIA} = \Delta P_{M1.H} + \Delta P_{M2.H} + \Delta P_{ДОД.H} \quad (2)$$

В таблиці 4 приведені значення потужностей постійних і змінних втрат енергії, визначених для номінального режиму роботи АД за формулами (1) і (2) на підставі даних таблиці 3.

Відповідно [17], [18] і [19] потужність змінних втрат енергії в АД при номінальному зна-

Сумарна потужність втрат енергії в одному двигуні потужністю 90 кВт визначається формулою (6):

$$\Delta P_{\Sigma 90} = (\Delta P_{VARIA.90} + \Delta P_{CONST.90}), \quad (6)$$

де $\Delta P_{VARIA.90}$, $\Delta P_{CONST.90}$ – відповідно, потужності змінних і постійних втрат енергії в одному АД, який має потужність 90 кВт.

Для досягнення енергетичної ефективності при заміні одного двигуна великої потужності (90 кВт) декількома двигунами малої потужності (30 кВт), сумарна потужність втрат енергії в декількох двигунах малої потужності має бути меншою за сумарну потужність втрат енергії в одному двигуні великої потужності, тобто має виконуватися умова (7):

$$\Delta P_{\Sigma 30} \cdot N_{30} < \Delta P_{\Sigma 90}. \quad (7)$$

Різниця між сумарною потужністю втрат енергії в декількох асинхронних двигунах потужністю 30 кВт і сумарною потужністю втрат енергії в одному асинхронному двигуні потужністю 90 кВт при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора АД (50 Гц) і при номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД дорівнює:

$$\Sigma \Delta P_{50} = \Delta P_{\Sigma 30} \cdot N_{30} - \Delta P_{\Sigma 90}. \quad (8)$$

Формула (8) визначає енергетичний ефект від використання багатомоторного електроприводу в порівнянні з одномоторним електроприводом при номінальному значенні частоти на-

пруги на обмотках статорів АД, при номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі кожного АД і при зміні сумарного моменту, який має розвивати тяговий електропривод електробуса. Формула (8) також відображає залежність енергетичного ефекту багатомоторного електроприводу від кількості двигунів, які пра-

цюють в складі такого багатомоторного електропривода.

Графіки, наведені на рис.1, відображають залежність енергетичного ефекту від сумарного моменту, який розвиває тяговий електропривод, $\Sigma \Delta P_{50} = f(M_{\text{АД},\Sigma})$ при різній кількості електричних двигунів, задіяних у багатомоторному електроприводі.

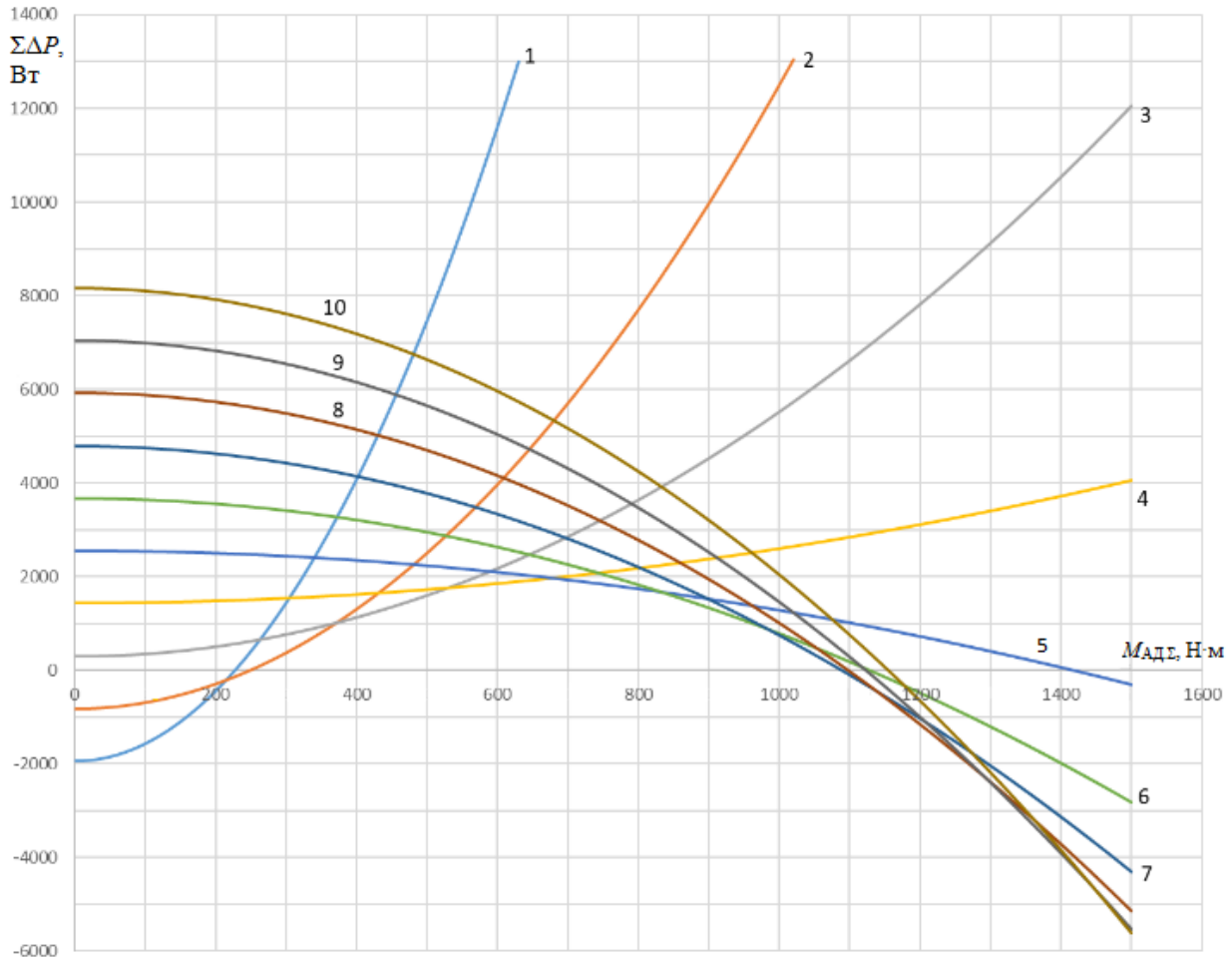


Рис. 1 - Графіки залежності енергетичного ефекту багатомоторного електроприводу від сумарного моменту, який розвиває тяговий електропривод

Ці графіки отримані при номінальному значенню частоти напруги на обмотках статорів АД (50 Гц) і номінальному значенню магнітної індукції в АД. Номер графіка відповідає кількості двигунів потужністю 30 кВт, які працюють у складі багатомоторного електроприводу.

4 Розрахунок ККД асинхронних двигунів при різних значеннях потужності навантаження

Для верифікації результатів розрахунку потужності втрат енергії в АД, наведених в табл. 3 і в табл. 4, розраховані ККД АД при різних значеннях потужності навантаження на валу АД,

а саме при $0,25 P_{2H}$, $0,50 P_{2H}$, $0,75 P_{2H}$, $1,0 P_{2H}$ та $1,25 P_{2H}$, і порівняно із значеннями ККД, які наведено у довіднику [20]. При визначенні відносного значення моменту навантаження $M_{\text{АД}}^*$ на валу двигуна врахована залежність кутової швидкості обертання валу АД при зміні значення моменту навантаження на валу АД. Для цього, відповідно до [17], [18] і [19], розв'язано рівняння:

$$s_H \cdot (M_{\text{АД}}^*)^2 - M_{\text{АД}}^* + (1 - s_H) \cdot P_2^* = 0 \quad (9)$$

До рівняннi (9) входять відносне значення моменту навантаження на валу АД і відносне значення потужності навантаження АД, які визначаються, відповідно, за (10) і (11):

$$M_{AD}^* = M_{AD} / M_{ADH} \quad (10)$$

$$P_2^* = P_2 / P_{2H} \quad (11)$$

За формулою (9) проведено розрахунок відносних значень моменту навантаження на валу АД M_{AD}^* , відповідним відносним значенням потужності навантаження АД P_2^* . Результати розрахунку відносних значень моменту навантаження на валу АД M_{AD}^* при номінальному значенні напруги на обмотці статора наведено в другій колонці таблиці 5.

Значення ККД АД при потужності навантаження $P_{2,i}^*$ і відповідному їй значенні моменту навантаження $M_{AD,i}^*$ розраховано за формулою:

$$\eta_i = \frac{P_{2,i}}{P_{2,i} + \Delta P_{\Sigma,i}}, \quad (12)$$

де $P_{2,i}$ – абсолютне значення потужності навантаження АД при i -му відносному значенні моменту навантаження $M_{AD,i}^*$;

$\Delta P_{\Sigma,i}$ – абсолютне значення потужності втрат електричної енергії в АД при i -му відносному значенні моменту навантаження $M_{AD,i}^*$.

Відносне значення потужності навантаження АД $P_{2,i}^*$ при i -му відносному значенні моменту навантаження $M_{AD,i}^*$ при номінальному значенні напруги на обмотці статора наведено в першій колонці таблиці 5. Абсолютне значення потужності навантаження АД, яке відповідає відносному значенню моменту навантаження $M_{AD,i}^*$ при номінальному значенні напруги на обмотці статора визначено за (13):

$$P_{2,i} = P_{2,i}^* \cdot P_{2H} \quad (13)$$

Абсолютне значення потужності втрат енергії в АД при i -му відносному значенні моменту навантаження $M_{AD,i}^*$ при номінальному значенні напруги на обмотці статора АД за (14):

$$\Delta P_{\Sigma,i} = \Delta P_{VARIA,i} + \Delta P_{H.CONST} \quad (14)$$

Значення потужності постійних втрат енергії в АД $\Delta P_{H.CONST}$ при зміні моменту навантаження на валу АД не змінюється і дорівнює номінальному значенню потужності постійних втрат енергії в АД (табл. 4).

Потужність змінних втрат енергії в АД при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора і при номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД при i -их значеннях моменту навантаження $M_{AD,i}^*$, визначені за (3).

Результати розрахунку ККД за формулою (12) занесені до таблиці 5. Для порівняння в чет-

вертій колонці табл. 5 наведені відповідні значення ККД з довідника [20].

З таблиці 5 видно, що для двигуна типу 4A180M4 найбільша похибка розрахунку ККД не перевищує 1,29%, а для двигуна типу 4A250M4 найбільша похибка розрахунку ККД не перевищує 1,78%.

Таким чином, можна стверджувати, що при зміні відносного значення моменту навантаження на валу асинхронного двигуна типу 4A180M4 від 0,246 до 1,256 похибка проведених розрахунків потужності втрат енергії в АД не перевищує

Таблиця 5 - Результати розрахунку значень ККД при зміні потужності навантаження асинхронних двигунів 4A180M4 і 4A250M4

| $P_{2,i}^*$, в. о. | $M_{AD,i}^*$, в. о. | Розрахо- ване значення ККД, % | Значення ККД з довід- ника [20], % | Похибка визна- чення ККД, % |
|------------------------|-------------------------|---|--|---|
| Двигун 4A180M4 | | | | |
| 0,25 | 0,246 | 85,86 | 87 | 1,14 |
| 0,50 | 0,495 | 90,49 | 90,5 | 0,01 |
| 0,75 | 0,746 | 91,28 | 91 | -0,28 |
| 1,00 | 1,00 | 91,00 | 91 | 0 |
| 1,25 | 1,256 | 90,29 | 89 | -1,29 |
| Двигун 4A250M4 | | | | |
| 0,25 | 0,248 | 87,22 | 89 | 1,78 |
| 0,50 | 0,497 | 91,87 | 92,5 | 0,63 |
| 0,75 | 0,748 | 92,92 | 93 | 0,08 |
| 1,00 | 1,00 | 93,00 | 93 | 0 |
| 1,25 | 1,254 | 92,67 | 92 | -0,67 |

1,3%. При зміні відносного значення моменту навантаження на валу асинхронного двигуна типу 4A250M4 від 0,248 до 1,254 похибка проведених розрахунків потужності втрат енергії в АД не перевищує 1,8%.

5 Аналіз енергетичних показників асинхронних двигунів при номінальному значенні магнітної індукції, при зміні значення частоти напруги на обмотках статорів тягових асинхронних двигунів

Оскільки в сталому режимі роботи АД частота перемагнічування сталі ротора не перевищує (3-5) Гц, то потужність втрат енергії в сталі ротора буде малою. Тому втратами енергії в магнітній системі ротора АД допустимо нехтувати. Враховуватиме лише втрати енергії в магнітній системі статора АД. Відповідно до [21] при роботі АД з постійним номінальним значенням магнітної індукції в магнітній системі, але при

значенні частоти напруги на обмотці статора, яка відрізняється від номінального (50 Гц) потужність втрат енергії в магнітній системі АД можна визначити за формулою:

$$\Delta P_{Cl} = \Delta P_{Cl.H} \cdot \sqrt{\left(\frac{f_l}{f_{l.H}}\right)^3} \quad (15)$$

На підставі формул (1), (15) і результатів розрахунку складових потужності втрат енергії (табл. 3), можна розрахувати потужності постій-

Таблиця 6 - Потужності постійних і змінних втрат енергії в асинхронних двигунах при частоті напруги статора 5 Гц і при номінальному значенні моменту навантаження на валу

| Параметри АД | Позначення | 4A180M4 | 4A250M4 |
|--|----------------------|----------|---------|
| Потужність постійних втрат енергії, Вт | $\Delta P_{5.CONST}$ | 289,084 | 521,934 |
| Потужність змінних втрат енергії, Вт | $\Delta P_{H.VARIA}$ | 1843,316 | 3702,2 |

З даних таблиці 6 видно, що при зменшенні частоти напруги на обмотці статора в 10 разів відносно номінального значення (50 Гц) потужність постійних втрат енергії в АД типу 4A180M4 зменшилися у 3,9 рази, а для АД типу 4A250M4 - у 5,9 рази.

Розрахунки енергетичного ефекту при

них втрат енергії в АД при постійному номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД і при будь-якому значенні частоти напруги на обмотці статора.

В таблиці 6 наведено результати розрахунку потужностей постійних і змінних втрат енергії в АД при номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД, при номінальному значенні моменту навантаження на валу АД і при частоті напруги на обмотці статора 5 Гц.

частоті напруги на обмотці статора 5 Гц проведено за формулою, аналогічною до формули (8).

На рисунку 2 наведено графіки залежності енергетичного ефекту від сумарного моменту тягового електроприводу при використанні декількох двигунів потужністю 30 кВт замість одного двигуна потужністю 90 кВт при частоті 5 Гц.

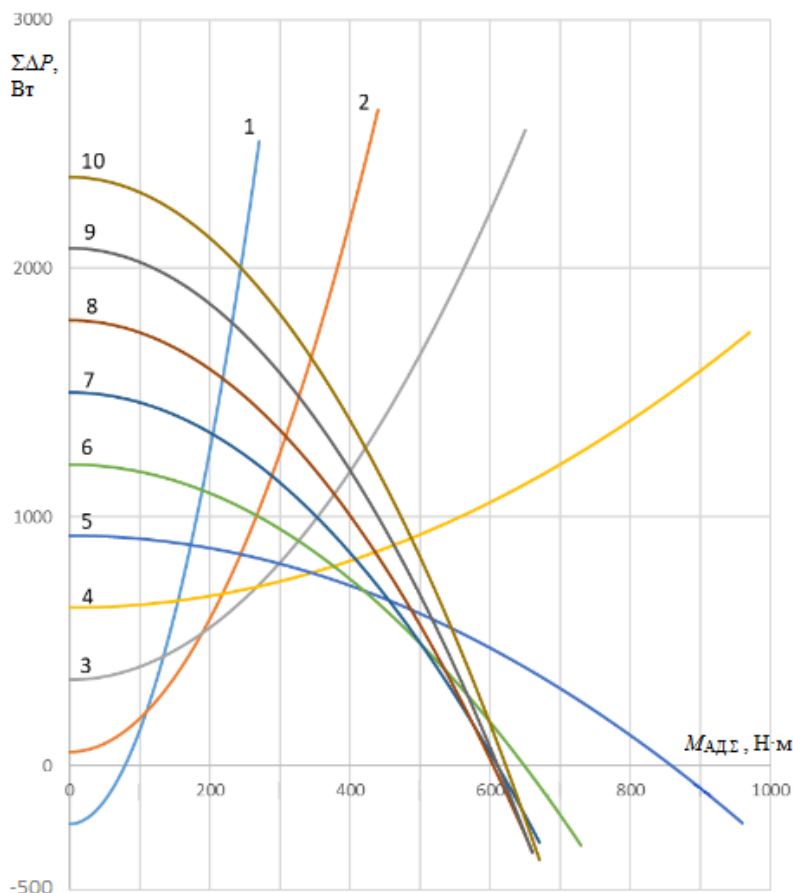


Рис. 2 - Графіки залежності енергетичного ефекту від сумарного моменту тягового електроприводу при використанні декількох двигунів потужністю 30 кВт замість одного двигуна потужністю 90 кВт при частоті 5 Гц.

В таблиці 7 наведено результати розрахунку потужності постійних і змінних втрат енергії в АД при номінальному значенні магнітної індукції в магнітній системі АД, при номінальному значенні моменту навантаження на валу АД і при частоті напруги на обмотці статора, яка дорівнює 80 Гц.

З даних таблиці 7 видно, що при збільшенні частоти напруги на обмотці статора в 1,6 рази відносно номінального значення (50 Гц) в АД типу 4A180M4 потужність постійних втрат

енергії збільшилася у 1,8 рази, а в АД типу 4A250M4 - у 1,9 рази.

Розрахунок енергетичного ефекту при частоті напруги на обмотці статора 80 Гц проведено за формулою, аналогічною до формули (8).

На рисунку 3 наведені графіки залежності енергетичного ефекту від сумарного моменту тягового електроприводу, при використанні декількох двигунів потужністю 30 кВт замість одного двигуна потужністю 90 кВт при частоті 80 Гц.

Таблиця 7 - Потужності постійних і змінних втрат енергії в асинхронних двигунах при частоті напруги статора 80 Гц і при номінальному значенні моменту навантаження на валу

| Параметри АД | Позначення | 4A180M4 | 4A250M4 |
|--|-----------------------|---------|----------|
| Потужність постійних втрат енергії, Вт | $\Delta P_{80.CONST}$ | 4A180M4 | 4A250M4 |
| Потужність змінних втрат енергії, Вт | $\Delta P_{H.VARIA}$ | 2006,1 | 5768,165 |

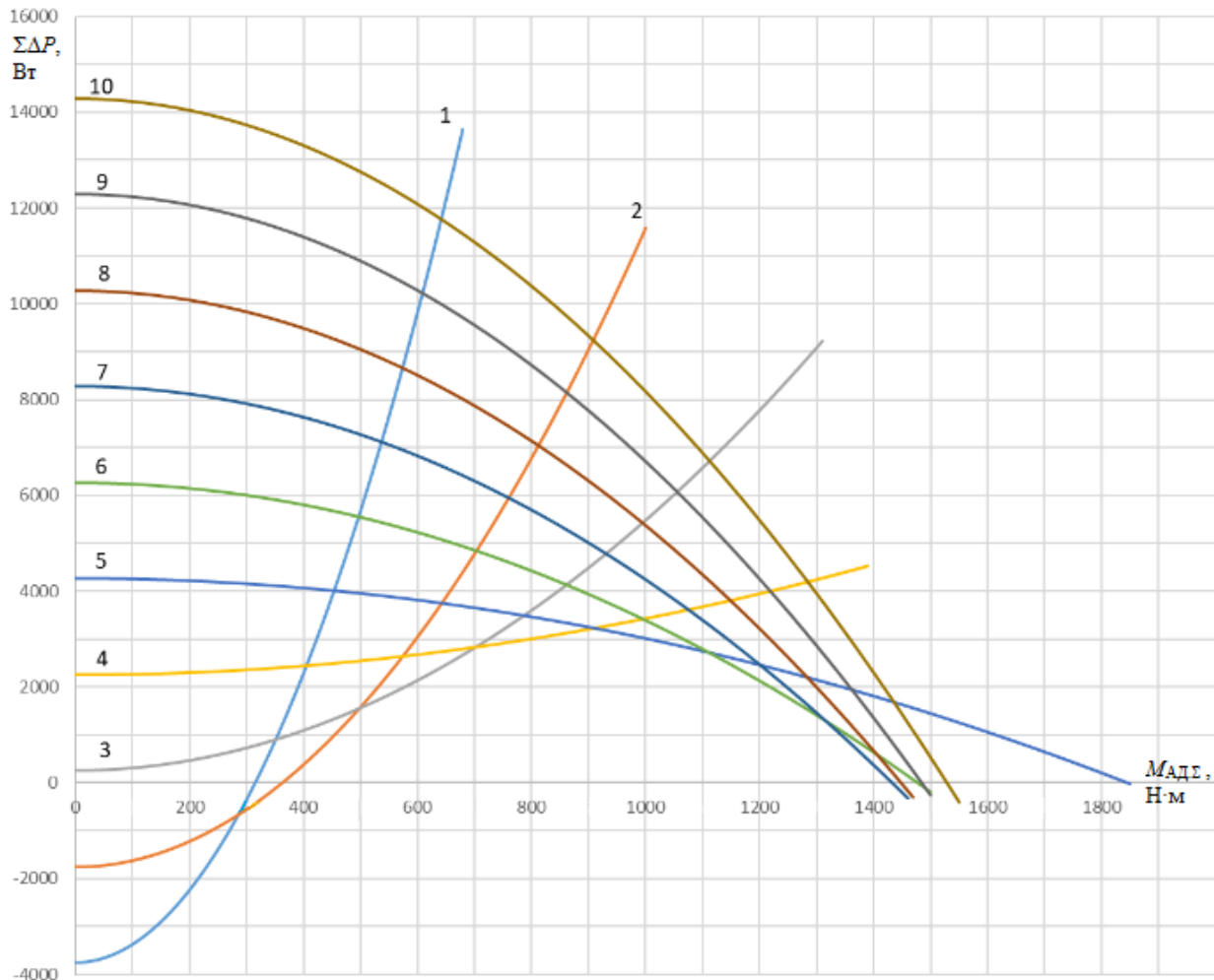


Рис. 3 - Графіки залежності енергетичного ефекту від сумарного моменту тягового електроприводу при використанні декількох двигунів потужністю 30 кВт замість одного двигуна потужністю 90 кВт при частоті 80 Гц.

Висновки

1. З рисунку 1 видно, що при зміні сумарного моменту, який має розвивати тяговий елект-

ропривод, від 248,5 Н·м до 1089 Н·м один двигун потужністю 90 кВт має менші сумарні втрати енергії в порівнянні з будь якою кількістю двигунів потужністю 30 кВт.

2. Під час руху порожнього автобуса по горизонтальній дорозі зі швидкістю 56,5 км/год, яка відповідає частоті напруги на обмотці статора 50 Гц, момент навантаження на валу двигуна дорівнює 179,2 Н·м (табл. 1). Оскільки номінальний момент одного двигуна потужністю 30 кВт дорівнює 194,7 Н·м, то під час руху порожнього автобуса по горизонтальній дорозі зі швидкістю 56,5 км/год можна використовувати лише один двигун потужністю 30 кВт. При цьому потужність сумарних втрат енергії в одному двигуні потужністю 30 кВт буде на 737,8 Вт менше потужності сумарних втрат енергії в двигуні потужністю 90 кВт (рис.1).

3. Оскільки номінальний момент одного двигуна потужністю 30 кВт дорівнює 194,7 Н·м, то при зміні кількості пасажирів і при відповідній зміні сумарного моменту навантаження електропривода від 179,2 Н·м до 194,7 Н·м можна використовувати 1 двигун потужністю 30 кВт. При цьому енергетичний ефект при використанні одного двигуна потужністю 30 кВт буде змінюватись від 737,8 Вт до 519,6 Вт, в порівнянні з використанням одного двигуна потужністю 90 кВт (рис.1).

4. Під час руху повного автобуса по горизонтальній дорозі зі швидкістю 56,5 км/год сумарний момент навантаження на валу тягового електропривода дорівнює 240,6 Н·м (табл. 1). Оскільки сумарний номінальний момент двох двигунів потужністю 30 кВт дорівнює 389,4 Н·м, то при зміні кількості пасажирів і при відповідній зміні сумарного моменту навантаження електропривода від 194,7 Н·м до 240,6 Н·м треба використовувати 2 двигуни потужністю 30 кВт. При цьому енергетичний ефект при використанні двох двигунів потужністю 30 кВт буде змінюватись від 317,7 Вт до 51,3 Вт, в порівнянні з використанням одного двигуна потужністю 90 кВт (рис.1).

5. При короткочасному русі автобуса вгору по дорозі з великим ухилом сумарний момент, який має розвивати тяговий електропривод, може перевищувати 1089,0 Н·м. Оскільки критичний момент АД потужністю 90 кВт дорівнює 1335,8 Н·м, то будемо порівнювати втрати енергії в багатомоторному і в одномоторному тягових електроприводах при значенні рушійного моменту до 1335,8 Н·м. З рисунку 1 видно, що при зміні рушійного моменту тягового електропривода від 1089,0 Н·м до 1335,8 Н·м енергетичний ефект можна отримати, якщо використовувати більше 6 двигунів потужністю 30 кВт. У разі використання 7 двигунів потужністю 30 кВт при зміні рушійного моменту тягового електропривода ЕТЗ від 1089,0 Н·м до 1335,8 Н·м енерге-

тичний ефект буде змінюватись від 0,0 Вт до 2419,5 Вт в порівнянні з використанням одного двигуна потужністю 90 кВт (рис.1).

6. Достовірність проведених розрахунків потужності втрат енергії підтверджується збігом значень розрахованих ККД при різних значеннях потужності навантаження двигунів із відповідними значеннями ККД, взятими з довідника [20].

7. З даних таблиці 4 і таблиці 6 видно, що при зменшенні частоти напруги на обмотці статора зменшується потужність постійних втрат енергії в АД. Відповідно, при зменшенні частоти напруги на обмотці статора зменшуються значення сумарного моменту, при яких двигуни потужністю 30 кВт мають енергетичний ефект у порівнянні з двигуном потужністю 90 кВт (рис.2).

8. З даних таблиці 4 і таблиці 7 видно, що при збільшенні частоти напруги на обмотці статора збільшується потужність постійних втрат енергії в АД. Відповідно, при збільшенні частоти напруги на обмотці статора збільшуються значення сумарного моменту, при яких двигуни потужністю 30 кВт мають енергетичний ефект в порівнянні з двигуном потужністю 90 кВт (рис.3).

9. Подальше збільшення частоти напруги на обмотці статора приводить до того, що потужність постійних втрат енергії в АД буде перевищувати сумарну номінальну потужність втрат енергії. Відповідно, при збільшенні частоти напруги на обмотці статора двигун буде перегріватись навіть при відсутності моменту навантаження на його валу. Тобто двигун стає непрацездатним. Тому при роботі АД при великій частоті напруги на обмотці статора необхідно зменшувати значення магнітної індукції в магнітній системі АД.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту під час створення цієї роботи.

Внесок авторів

Войтенко В. А.: загальне керівництво, розробка методології досліджень, чисельні розра-

хунки, аналітичні висновки, написання тексту;
Кнюх А. О.: чисельні розрахунки, аналіз даних, підготовка рисунків, написання тексту, формулювання висновків;
Водічев В. А.: постановка задачі, розробка методології досліджень, аналіз та інтерпретація результатів, формулювання висновків;
Калінін О. Г.: чисельні розрахунки, аналіз даних, редагування рисунків, таблиць, тексту статті.

Список використаної літератури

1. Zhao Haisen, Zhang Dongdong, Wang Yilong, Yang, Z. and Xu Guorui (2018). Piecewise Variable Parameter Loss Model of Laminated Steel and Its Application in Fine Analysis of Iron Loss of Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE transactions on industry applications*, 54(1), pp.832–840. doi:https://doi.org/10.1109/tia.2017.2740278.
2. Liang, Y., Bian, X., Yu, H. and Li, C. (2015). Finite-Element Evaluation and Eddy-Current Loss Decrease in Stator End Metallic Parts of a Large Double-Canned Induction Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), pp.6779–6785. doi:https://doi.org/10.1109/tie.2015.2438051.
3. Krzysztof Komeza and M. Dems (2012). Finite-Element and Analytical Calculations of No-Load Core Losses in Energy-Saving Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(7), pp.2934–2946. doi:https://doi.org/10.1109/tie.2011.2168795.
4. Zhao Haisen, Wang Yilong, Zhang Dongdong, Yang, Z., Xu Guorui and Luo Yingli (2017). Piecewise variable parameter model for precise analysis of iron losses in induction motors. *Iet Electric Power Applications*, 11(3), pp.361–368. doi:https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0009.
5. Aarniovuori, L., Laurila, L.I.E., Niemela, M. and Pyrhonen, J.J. (2012). Measurements and Simulations of DTC Voltage Source Converter and Induction Motor Losses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(5), pp.2277–2287. doi:https://doi.org/10.1109/tie.2011.2161061.
6. Lassi Aarniovuori, Paavo Rasilo, Markku Niemelä and Juha Pyrhönen (2016). Analysis of 37-kW Converter-Fed Induction Motor Losses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(9), pp.5357–5365. doi:https://doi.org/10.1109/tie.2016.2555278.
7. Bazzi, A.M., Buyukdegirmenci, V.T. and Krein, P.T. (2013). System-Level Power Loss Sensitivity to Various Control Variables in Vector-Controlled Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), pp.1367–1373. doi:https://doi.org/10.1109/tia.2013.2252320.
8. Yamazaki, K., Suzuki, A., Motomichi Ohto and Teruyuki Takakura (2012). Harmonic Loss and Torque Analysis of High-Speed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(3), pp.933–941. doi:https://doi.org/10.1109/tia.2012.2191252.
9. Wu, Y., Shafi, M.A., Knight, A.M. and McMahon, R.A. (2011). Comparison of the Effects of Continuous and Discontinuous PWM Schemes on Power Losses of Voltage-Sourced Inverters for Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(1), pp.182–191. doi:https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2054837.
10. Huchche, V., Patne, N. and Junghare, A. (2018). Computation of Energy Loss in an Induction Motor During Unsymmetrical Voltage Sags—A Graphical Method. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(5), pp.2023–2030. doi:https://doi.org/10.1109/tii.2017.2763606.
11. Boglietti, A., Cavagnino, A., Ferraris, L. and Lazzari, M. (2008). Induction Motor Equivalent Circuit Including the Stray Load Losses in the Machine Power Balance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3), pp.796–803. doi:https://doi.org/10.1109/tec.2008.921467.
12. Alexandridis, A.T., Konstantopoulos, G.C. and Zhong, Q.-C. (2015). Advanced Integrated Modeling and Analysis for Adjustable Speed Drives of Induction Motors Operating With Minimum Losses. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(3), pp.1237–1246. doi:https://doi.org/10.1109/tec.2015.2392256.
13. Ebrahim, O.S., Badr, M.A., Elgendy, A.S. and Jain, P. (2010). ANN-Based Optimal Energy Control of Induction Motor Drive in Pumping Applications. 25(3), pp.652–660. doi:https://doi.org/10.1109/tec.2010.2041352.
14. Hu, D., Xu, W., Dian, R. and Zhu, J. (2018). Loss Minimization Control of Linear Induction Motor Drive for Linear Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(9), pp.6870–6880. doi:https://doi.org/10.1109/tie.2017.2784343.

15. M.P., S. and Agarwal, V. (2018). Trajectory Optimization for Loss Minimization in Induction Motor Fed Elevator Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, [online] 33(6), pp.5160–5170. doi:<https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2735905>.
16. Boyko, A. and Volyanskaya, Y. (2017). Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (88)), pp.50–58. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108545>.
17. Voytenko, V.A., Vodichev, V.A. and Kalinin, A.G. (2019) “Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport”, *Problemele Energeticii Regionale*, 1-2 (41), pp. 95–106. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.3239179>.
18. Войтенко, В. А., Водічев, В. А., Калінін, А. Г. (2019). ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОДНОМОТОРНОГО ТА БАГАТОМОТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. *ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ*, 31(107), с. 35–50. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.31.107.2019.4>.
19. Войтенко, В., Водічев, В. та Калінін, А. (2021). Порівняльний аналіз енергетичних характеристик асинхронного одно- та багатомоторного тягового електроприводу. *2-й тиждень передових технологій IEEE KhPI (KhPIWeek)*, 2021, с. 73–78. doi:<https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570063>.
20. Кравчик, А. Е., Афонін, В. І. та Соколенська, Є. А. (1982). *Асинхронні двигуни серії 4А: Довідник*. М.: Вища школа, р.504.
21. Радин, В. І., Брускін, Д. Е., Зорохович, А. Е.; під ред. Копилова І. П. (1988). *Електричні машини: Асинхронні машини: Учеб.* М.: Висш.шк., С.328.

References

1. Zhao Haisen, Zhang Dongdong, Wang Yilong, Yang, Z. and Xu Guorui (2018). Piecewise Variable Parameter Loss Model of Laminated Steel and Its Application in Fine Analysis of Iron Loss of Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE transactions on industry applications*, 54(1), pp.832–840. doi:<https://doi.org/10.1109/tia.2017.2740278>.
2. Liang, Y., Bian, X., Yu, H. and Li, C. (2015). Finite-Element Evaluation and Eddy-Current Loss Decrease in Stator End Metallic Parts of a Large Double-Canned Induction Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), pp.6779–6785. doi:<https://doi.org/10.1109/tie.2015.2438051>.
3. Krzysztof Komeza and M. Dems (2012). Finite-Element and Analytical Calculations of No-Load Core Losses in Energy-Saving Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(7), pp.2934–2946. doi:<https://doi.org/10.1109/tie.2011.2168795>.
4. Zhao Haisen, Wang Yilong, Zhang Dongdong, Yang, Z., Xu Guorui and Luo Yingli (2017). Piecewise variable parameter model for precise analysis of iron losses in induction motors. *Iet Electric Power Applications*, 11(3), pp.361–368. doi:<https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0009>.
5. Aarniovuori, L., Laurila, L.I.E., Niemela, M. and Pyrhonen, J.J. (2012). Measurements and Simulations of DTC Voltage Source Converter and Induction Motor Losses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(5), pp.2277–2287. doi:<https://doi.org/10.1109/tie.2011.2161061>.
6. Lassi Aarniovuori, Paavo Rasilo, Markku Niemelä and Juha Pyrhönen (2016). Analysis of 37-kW Converter-Fed Induction Motor Losses. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(9), pp.5357–5365. doi:<https://doi.org/10.1109/tie.2016.2555278>.
7. Bazzi, A.M., Buyukdegirmenci, V.T. and Krein, P.T. (2013). System-Level Power Loss Sensitivity to Various Control Variables in Vector-Controlled Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), pp.1367–1373. doi:<https://doi.org/10.1109/tia.2013.2252320>.
8. Yamazaki, K., Suzuki, A., Motomichi Ohto and Teruyuki Takakura (2012). Harmonic Loss and Torque Analysis of High-Speed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(3), pp.933–941. doi:<https://doi.org/10.1109/tia.2012.2191252>.
9. Wu, Y., Shafi, M.A., Knight, A.M. and McMahan, R.A. (2011). Comparison of the Effects of Continuous and Discontinuous PWM Schemes on Power Losses of Voltage-Sourced Inverters for Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(1), pp.182–191. doi:<https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2054837>.
10. Huchche, V., Patne, N. and Junghare, A. (2018). Computation of Energy Loss in an Induction Motor During Unsymmetrical Voltage Sags—A Graphical Method. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(5), pp.2023–2030. doi:<https://doi.org/10.1109/tii.2017.2763606>.

11. Boglietti, A., Cavagnino, A., Ferraris, L. and Lazzari, M. (2008). Induction Motor Equivalent Circuit Including the Stray Load Losses in the Machine Power Balance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3), pp.796–803. doi:<https://doi.org/10.1109/tec.2008.921467>.
12. Alexandridis, A.T., Konstantopoulos, G.C. and Zhong, Q.-C. (2015). Advanced Integrated Modeling and Analysis for Adjustable Speed Drives of Induction Motors Operating With Minimum Losses. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(3), pp.1237–1246. doi:<https://doi.org/10.1109/tec.2015.2392256>.
13. Ebrahim, O.S., Badr, M.A., Elgendy, A.S. and Jain, P. (2010). ANN-Based Optimal Energy Control of Induction Motor Drive in Pumping Applications. 25(3), pp.652–660. doi:<https://doi.org/10.1109/tec.2010.2041352>.
14. Hu, D., Xu, W., Dian, R. and Zhu, J. (2018). Loss Minimization Control of Linear Induction Motor Drive for Linear Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(9), pp.6870–6880. doi:<https://doi.org/10.1109/tie.2017.2784343>.
15. M.P., S. and Agarwal, V. (2018). Trajectory Optimization for Loss Minimization in Induction Motor Fed Elevator Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, [online] 33(6), pp.5160–5170. doi:<https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2735905>.
16. Boyko, A. and Volyanskaya, Y. (2017). Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (88)), pp.50–58. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108545>.
17. Voytenko, V.A., Vodichev, V.A. and Kalinin, A.G. (2019) “Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport”, *Problemele Energeticii Regionale*, 1-2 (41), pp. 95–106. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.3239179>.
18. Voytenko, V. A., Vodichev, V. A. , and Kalinin, A. G. (2019). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY INDICATORS OF SINGLE-MOTOR AND MULTIPLE-MOTOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE. *ELECTROTECHNIC AND COMPUTER SYSTEMS*, 31(107), pp.35–50. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.31.107.2019.4>.
19. Voytenko, V., Vodichev, V. and Kalinin, A. (2021). Comparative Analysis of Energy Performance of Induction Single-Motor and Multi-Motor Traction Electric Drive. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp.73–78. doi:<https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570063>.
20. Kravchik, A. E., Afonin, V. I. and Sobolenskaya, E. A. (1982). *Asynchronous motors of the 4A series: Handbook [Asynkhronni dyuhuny seriyi 4A: Dovidnyk]*. M.: Vyscha Shkola, p.504.
21. Radin, V. I., Bruskin, D. E., Zorokhovych, A. E.; ed. Kopylov I. P. (1988). *Electric machines: Asynchronous machines: Textbook [Elektrychni mashyny: Asynkhronni mashyny: Ucheb]*. M.: Higher School [Vyssh.shk.], p.328.

Отримано (Received) 23.04.2026

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 05.05.2026

Прийнято (Accepted) 06.05.2026

Опубліковано (Published) 31.05.2026

Power Engineering of a Multi-motor Electric Drive

Volodymyr Voytenko¹, *Ph.D, Associate Profes*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; e-mail: voitenko@op.edu.ua;

Scopus Author ID: 57344261700; Researcher ID: LFT-9616-2024

Andriy Kniukh², *master*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6256-6409>; e-mail: andr0kn0ale@gmail.com

Volodymyr Vodichev¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>; e-mail: vva@eei.opu.ua;

Scopus Author ID: 6602754799

Alexander Kalinin¹, *electrical engineer*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; e-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua

¹ *Odesa Polytechnic National University*

² *Private researcher*

Abstract. *The purpose of the scientific work is to reduce energy losses in the traction electric drive of vehicles. The work compares the power of energy losses in traction asynchronous motors of high and low power depending on the value of the driving torque developed by the traction electric drive of the electric vehicle. The dependence of the energy efficiency of a multi-motor electric drive relative to a single-motor electric drive when changing the driving torque was studied. Graphs of the dependence of the energy efficiency of a multi-motor traction electric drive relative to a single-motor traction electric drive when changing the total driving torque were constructed for a different number of motors involved in the multi-motor electric drive. According to the results of the energy analysis, the efficiency values of asynchronous motors were calculated at different values of the power they develop, and the calculated efficiency values were compared with the efficiency values given in the reference book.*

Keywords: *electric drive, induction motor, power, energy, losses, torque, efficiency, voltage frequency*

Article citation: Voytenko, V. A., Kniukh, A. O., Vodichev, V. A., Kalinin, O. G. (2026). Power Engineering of a Multi-motor Electric Drive. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2026, 46(122), pp. 26-38. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.3>

Про авторів (About the authors)



Войтенко Володимир Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: voitenko@op.edu.ua; тел.: +380 48 705 8467

Volodymyr Voytenko, Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: voitenko@op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8467

Scopus Author ID: 57344261700; Researcher ID: LFT-9616-2024

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>

Кнюх Андрій Олександрович, випускник магістратури кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: andr0kn0ale@gmail.com; тел.: +380 68 517 4986

Andriy Kniukh, Graduate of the master's degree of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: andr0kn0ale@gmail.com; ph.: +380 68 517 4986

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6256-6409>

Водічев Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса 65044, Україна.

E-mail: vva@eei.opu.ua; тел.: +38(050) 234 7722

Volodymyr Vodichev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: vva@eei.opu.ua, ph.: +38(050) 234 7722

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>

Scopus Author ID: 6602754799



Калінін Олександр Георгійович, старший викладач кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua, тел.: +380 50 392 1298

Olexander Kalinin, Senior Lecturer of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua, ph.: +380 50 392 1298

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>