

## УДК 621.333:629.423

В. М. КОВАЛЬОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Мехатроніка та електротехніка», Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», вул. Вадима Манька, 17, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (066) 222 05 58, ел.пошта kovalov1952@gmail.com, ORCID 0000-0001-5817-8790

## Аналіз енергоефективності тягових електродвигунів магістральних електровозів

**Мета.** Енергоефективність тягових електродвигунів магістральних електровозів з напругою живлення 25 кВ характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД). Тягові двигуни живляться від багатоплецевого однофазного напівкерovanого тиристорного випрямляча, плечі якого підключені до окремих секцій тягового трансформатора. Мета полягає у визначенні впливу коефіцієнта пульсацій струму на ККД двигуна. **Методика.** Методика визначення ККД ґрунтується на законі збереження енергії, методах гармонійного аналізу та комп'ютерного моделювання для отримання залежностей коефіцієнта пульсацій струму якоря від кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. **Результати.** Отриманий аналітичний вираз ККД двигуна при пульсуючому струмі якоря на основі розрахунку відносних електричних втрат від гармонійних складових струму, які дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму. Розроблена комп'ютерна модель, на основі якої отримані графічні залежності коефіцієнта пульсацій струму якоря окремо від кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. Результати експериментів оброблені методом планування експерименту та отриманий аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму. Методика розрахунку ККД тягового двигуна полягає у наступному: для заданих омичного опору та індуктивності кола якоря, струму навантаження і середньостатистичного кута керування тиристорів розраховується коефіцієнт пульсацій струму, значення якого вставляється у вираз для розрахунку ККД двигуна. **Наукова новизна.** Автор удосконалив аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерovanого тиристорного випрямляча, який, на відміну від відомих враховує коефіцієнт пульсацій струму обмотки якоря. Вперше отримана аналітична залежність коефіцієнта пульсацій струму для однофазного тиристорного електроприводу постійного струму, як функція кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. **Практична значимість.** Аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерovanого тиристорного випрямляча дозволяє: 1) розрахувати навантажувальну здатність двигуна механічною потужністю на валу з урахуванням допустимого нагрівання діючим значенням струму з гармонійними складовими; 2) розрахувати індуктивність згладжувального реактора для підвищення ККД двигуна за рахунок зменшення коефіцієнта пульсацій струму.

**Ключові слова:** електровоз; тяговий двигун; тиристорний випрямляч; коефіцієнт пульсацій; коефіцієнт корисної дії

### Вступ

Магістральні електровози експлуатуються на електрифікованих залізницях з однофазною змінною напругою 25 кВ. Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна характеризує ефективність перетворення електроенергії в механічну роботу. Відповідно до [7] ККД тягових двигунів у номінальному режимі при живленні постійним струмом без пульсацій дорівнює 94,5 %.

При живленні двигуна випрямленим струмом з пульсаціями його гармонійні складові не створюють крутного моменту, а лише нагрівають обмотку якоря. Це означає зменшення ККД

на певну величину. В [7] вказано, що ККД зменшується до 84 %, але при цьому не приведена методика його розрахунку. Очевидно, що величина ККД залежить від кута керування тиристорами, і може бути більшою або меншою від зазначеної величини. Тому розробка методики визначення ККД в залежності від кута керування тиристорами є актуальною і практично доцільним.

Для розробки методики визначення ККД тягових двигунів в якості прикладу розглянемо силову схему тягового електроприводу магістрального електровоза серії ВЛ80Р показана на рис. 1 [7].

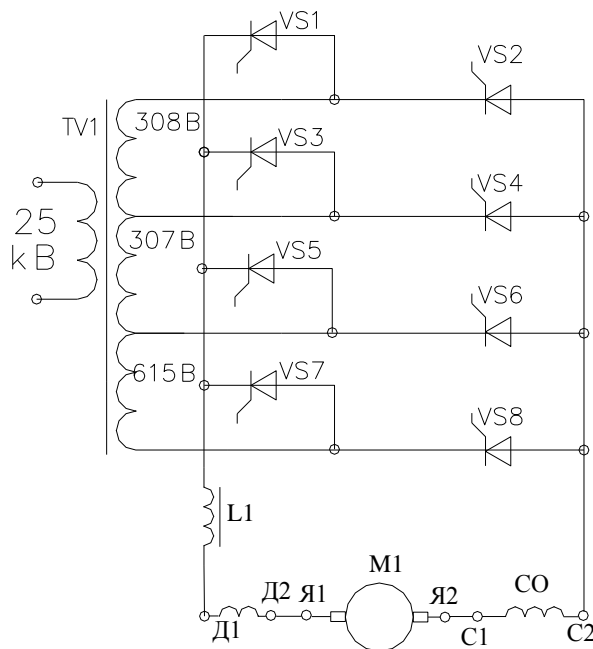


Рис. 1. Силова схема тиристорного електро-привода електро-поза ВЛ80Р

Fig. 1. Power scheme of the thyristor electric drive of the electric locomotive VL80P

Параметри тягового двигуна серії НБ–418К6: номінальна потужність 740 кВт, номінальна напруга обмотки якоря 950 В, номінальний струм якоря 880 А (без пульсацій), номінальна частота обертання 915 об/хв, ККД = 94,5 % при живленні струмом без пульсацій, омичні опори обмоток двигуна при 20 °С: послідовної обмотки збудження – 0,0079 Ом, обмотки додаткових полюсів та компенсаційної обмотки – 0,0119 Ом, обмотки якоря – 0,011 Ом, індуктивність згладжувального реактора – 5,85 мГн.

Параметри тягового трансформатора: потужність – 4777 кВА, напруга первинної обмотки – 25 кВ, напруги секцій вторинних обмоток 307+308+615 = 1230 В.

Блоки тиристорів VS1–VS8 комплектуються з послідовно та паралельно включених тиристорів. Кожен блок містить сім паралельних тиристорів. Блоки тиристорів VS5 і VS6 містять два послідовно включені тиристори, а блоки VS1-VS3, VS4, VS7, VS8 – три. Для рівномірного розподілу падів напруги на послідовно з'єднаних тиристорах використовують RC-ланцюжки, які не показані на рис. 1. Для рівно-

мірного розподілу струмів тиристорів паралельним гілками використовують індуктивні дільники.

Система керування багатоплечевим тиристорним випрямлячем формує чотири напівкерувані однофазні тиристорні випрямлячі. Для цього на одне тиристорне плече імпульси подаються з нульовим кутом керування, тобто, вони працюють в режимі діодів, а на інше тиристорне плече – з кутом керування, що регулюється.

Використання діодного режиму тиристорів забезпечує протікання реактивного струму обмотки якоря без повернення в електромережу. Тобто, струм якоря не повертається в тягову електромережу, а протікає через тиристори, що працюють в діодному режимі. При цьому підвищується постійна складова струму і підвищується ККД двигуна.

Схема багатоплечового тиристорного випрямляча передбачає чотири режими регулювання випрямленої напруги. В першому режимі використовується вторинна обмотка тягового трансформатора з напругою 307 В. При цьому тиристори VS3 і VS4 регулюють напругу, тиристори VS5, VS6 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

У другому режимі використовується дві вторинних обмотки з результируючою напругою 615 В. При цьому тиристори VS1 і VS2 регулюють напругу, тиристори VS5, VS6 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

У третьому режимі використовується дві вторинних обмотки з результируючою напругою 922 В. При цьому тиристори VS3 і VS4 регулюють напругу, тиристори VS7, VS8 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

У четвертому режимі використовується три вторинних обмотки з результируючою напругою 1 230 В. При цьому тиристори VS1 і VS2 регулюють напругу, тиристори VS7, VS8 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

Чотири режими випрямляча забезпечують зменшення коефіцієнта пульсацій струму, оскільки кут керування тиристорів у номінальному режимі роботи електропоза зсувається в сторону менших значень.

### Мета

Основна мета статті розробка методики для розрахунку ККД тягових двигунів пульсуючого струму при їх живленні від однофазних перетворювачів. Задача полягає у визначенні кількісного впливу гармонік струму якоря на ККД двигуна.

Предмет дослідження – процеси електромеханічного перетворення енергії в двигунах постійного струму при живленні від однофазних тиристорних перетворювачів.

### Методика

Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна зазвичай визначають експериментально в процесі запуску серії двигунів у виробництво через підрахунок втрат потужності. При живленні двигуна пульсуючою напругою ККД визначається за формулою [1, 6]:

$$\eta_{nc} = 1 - (P_{мх} + P_{мг} + P_{ел0} + \sum P_{елV}) / P_{ел}, \quad (1)$$

де  $P_{мх}$ ,  $P_{мг}$ ,  $P_{ел0}$ ,  $\sum P_{елV}$ ,  $P_{сн}$  – відповідно втрати механічні, магнітні, електричні від постійної і гармонійних складових струму та споживана електрична потужність.

При пульсуючих струмах розрахунок магнітних втрат виконують за спрощеною формулою, яка не передбачає поділу магнітних втрат від вихрових струмів та від явища гістерезису [2, 5]:

$$P_{сн.v} = B_v^2 f_v^\beta, \quad (2)$$

де  $P_{сн.v}$  – магнітні втрати в сталі від дії  $v$ -ї гармоніки струму;  $B_v$  – величина  $v$ -ї гармоніки магнітної індукції, яка зменшується з ростом частоти,  $f_v$  – частота  $v$ -ї гармоніки;  $\beta = 1,3–1,5$  – емпіричний показник ступеня для конкретної марки сталі, який враховує співвідношення втрат на вихрові струми та гістерезис на частоті 50 Гц.

Результуючі магнітні втрати визначаються шляхом підсумовування втрат від дії кожної гармоніки. У першому наближенні приймаємо, що нагрівання сталі осердя від магнітних втрат, спричинених гармоніками магнітного потоку, не впливає на нагрівання обмотки якоря. Аналогічно приймаємо, що пульсуючий струм якоря не впливає на механічні і додаткові втрати.

Для складання методики визначення ККД доцільно електричні втрати в обмотках двигуна розділити на статичні від постійної складової струму та пульсівні від гармонійних складових струму. Останні не створюють крутного моменту двигуна, а перетворюються в теплову роботу, що еквівалентно зменшенню ККД двигуна.

Проведемо аналіз публікацій щодо електричних втрат в двигунах постійного струму при пульсуючому струмі. В [10] запропонована модель для розрахунку електричних втрат в двигунах з пульсуючим струмом з урахуванням нелінійного характеру кривої намагнічування. Аналогічна модель розглянута в [13] для транзисторного електроприводу тролейбуса з двигунами змішаного збудження. В [15, 17] проведено моделювання магнітних втрат від вищих гармонік. В [12] запропонована теплова карта нагрівання тягових електродвигунів з пульсуючим струмом. В [8] проведена оцінка електричних втрат при пульсуючому струмі в залежності від частоти комутації та ширини імпульсів транзисторного перетворювача. В [11] розглянуто удосконалена модель електричних втрат тягового двигуна електровоза. В [14, 16] розглянуті залежність коефіцієнта пульсацій напруги від ширини імпульсів напруги живлення двигуна. В [9] розглянуті питання провалів крутного моменту двигуна з постійними магнітами через нерівність їх характеристик.

Проведений аналіз показав, що у наведених публікаціях не розглядався кількісний вплив гармонік на ККД двигуна.

З аналізу вищенаведеної літератури можна зробити такі висновки: 1) в основному розглядають лише моделювання втрат; 2) практичної методики визначення ККД двигуна не запропоновано. Таким чином, тема статті є актуальною.

### Результати

Для аналізу електричних втрат в тягових двигунах при пульсуючому струмі необхідно вибрати узагальнений параметр, який впливає на електричні втрати і не залежить від потужності двигунів. Таким параметром доцільно прийняти коефіцієнт пульсацій струму, відносно якого існує три визначення згідно ГОСТ 23875–88 і стандарту ІЕК–60050–161 Міжнародної електротехнічної комісії. Для аналізу впливу пульсацій струму на електричні

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

втрати доцільно використати таке визначення: коефіцієнт пульсацій струму це відношення діючого значення суми гармонік струму до постійної складової:

$$K_{nc} = \sqrt{\sum I_k^2} / I_0, \quad (3)$$

де  $\sqrt{\sum I_k^2}$  – діюче значення суми гармонік струму;  $I_0$  – постійна складова струму.

Електричні втрати в обмотках якоря від діючого значення пульсуючого струму  $I_{я} = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2}$  розділяємо на статичні  $\Delta P_0 = I_0^2 R_{я}$  від постійної складової струму та пульсуючі  $\Delta P_{nc} = \sum (I_k^2 R_{я})$  від гармонійних складових.

Виразимо діюче значення струму якоря через коефіцієнт пульсацій формулою:

$$I_{я} = I_0 \sqrt{1 + K_{nc}^2}. \quad (4)$$

Електричні втрати в обмотках якоря при живленні пульсуючим струмом збільшується відносно живлення струмом без пульсацій за рахунок втрат від гармонік струму. Виразимо збільшення електричних втрат при живленні пульсуючим струмом відносно електричних втрат при живленні струмом без пульсацій (без гармонік):

$$\Delta P_{я}^* = \frac{\Delta P_{я}}{\Delta P_0} = \frac{I_0^2 (1 + K_{nc}^2) R_{я}}{I_0^2 R_{я}} = 1 + K_{nc}^2, \quad (5)$$

де  $\Delta P_{я}^*$  – електричні втрати в обмотках двигуна при живленні пульсуючим струмом відносно електричних втрат при живленні струмом без пульсацій;  $\Delta P_0$  – електричні втрати в обмотках якоря при живленні струмом без пульсацій.

Згідно (5) загальні електричні втрати відносно статичних збільшуються на величину відносних пульсуючих втрат чисельно рівних квадрату коефіцієнта пульсацій струму

$$\Delta P_{nc}^* = \Delta P_{nc} / \Delta P_0 = K_{nc}^2,$$

а в іменованих одиницях пульсаційні електричні втрати дорівнюють:

$$\Delta P_{nc} = K_{nc}^2 \Delta P_0.$$

Збільшення відносних пульсуючих електричних втрат означає зменшення ККД  $\eta_{nc}$  двигуна при пульсуючому струмі відносно номінального  $\eta_{ном}$  значення на таку ж величину, тобто:

$$\eta_{nc} / \eta_{ном} = 1 - K_{nc}^2.$$

Тоді аналітичний вираз для розрахунку ККД двигуна при пульсуючому струмі має вигляд:

$$\eta_{nc} = (1 - K_{nc}^2) \eta_{ном}. \quad (6)$$

Згідно виразу (6) при зменшенні коефіцієнта пульсацій струму ККД збільшується, оскільки зменшуються електричні втрати від гармонік струму. Якщо в процесі регулювання швидкості  $K_{nc}$  змінюється в певному діапазоні кутів керування тиристорів, то в (6) слід підставляти його середнє значення.

Таким чином, для визначення ККД двигуна при живленні пульсуючим струмом необхідний розрахунок коефіцієнта пульсацій струму. Останній залежить від кута керування тиристорів, від моменту навантаження на валу (постійна складова струму) та від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала).

Оскільки двигуни пульсуючого струму відносяться до класу детермінованих систем, в яких функціональні залежності параметрів однозначно визначаються причинно-наслідковими зв'язками і точно описуються диференційними рівняннями, то доцільно проводити комп'ютерний експеримент.

При комп'ютерних експериментах на моделі є можливість абсолютно точно задавати параметри електропривода і стабілізувати їх в процесі експерименту.

Для експериментального визначення залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів, від моменту навантаження на валу та від індуктивності кола якоря складена комп'ютерна модель тиристорного електропривода в програмному пакеті «Simulink» [4], яка показана на рис. 2. На рис. 3 показані експериментальні осцилограми напруги якоря і струму якоря.

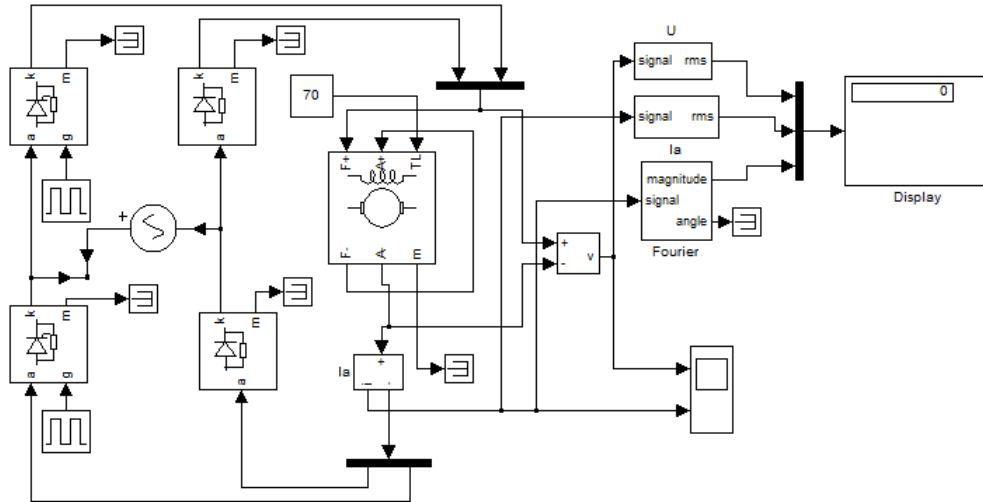


Рис. 2. Модель тягового електропривода трамвая для визначення коефіцієнта пульсації струму

Fig. 2. Model of a tram traction electric drive for determining the current ripple coefficient

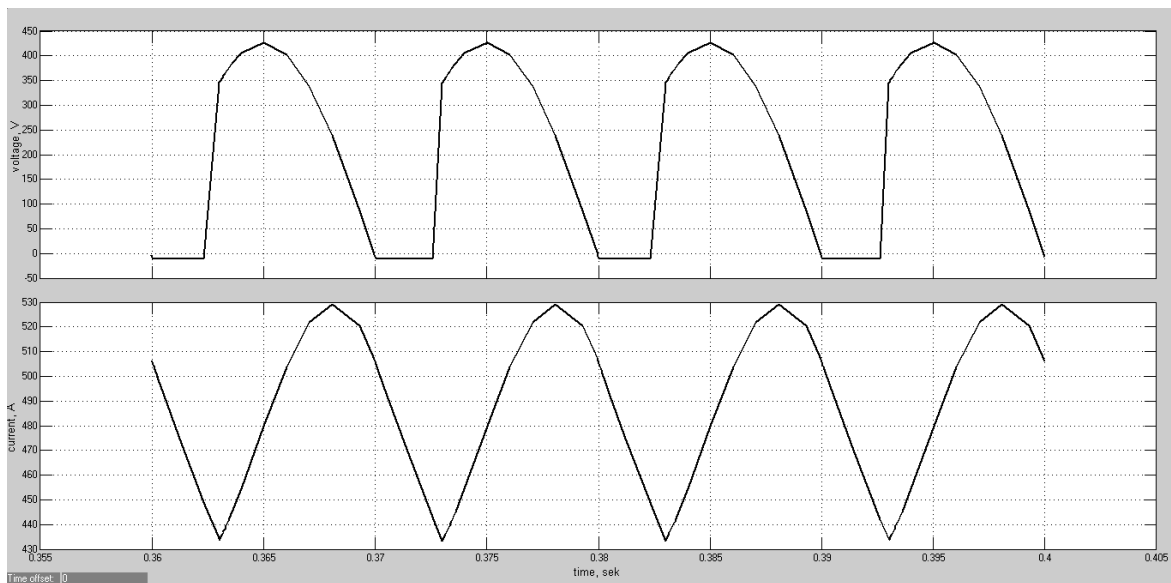


Рис. 3. Експериментальні осцилограми напруги якоря і струму якоря

Fig. 3. Experimental oscillograms of armature voltage and armature current

Комп'ютерний експеримент проводиться наступним чином. Для діапазону кутів керування тиристорів вимірюються діючі значення струму якоря  $I_a$  та їх постійні складові  $I_0$ . Коефіцієнт пульсації струму визначається за формулою:

$$K_{pc} = \sqrt{I_a^2 - I_0^2} / I_a. \quad (7)$$

На моделі був проведений розрахунок коефіцієнта пульсації струму в залежності від кута керування, сталої часу та струму навантаження. В результаті отримані відповідні графіки, показані на рис. 4, 5 та 6.

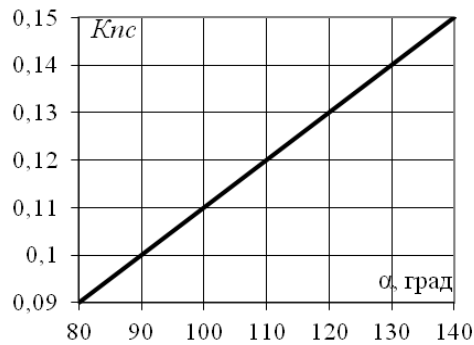


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів

Fig. 4. Graph of the dependence of the current ripple coefficient on the control angle of the thyristors

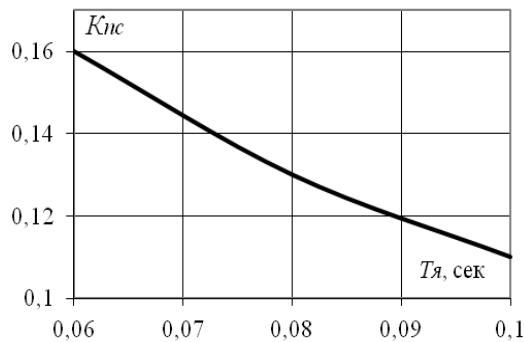


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від сталої часу кола якоря

Fig. 5. The graph of the dependence of the coefficient of current ripples on the constant time

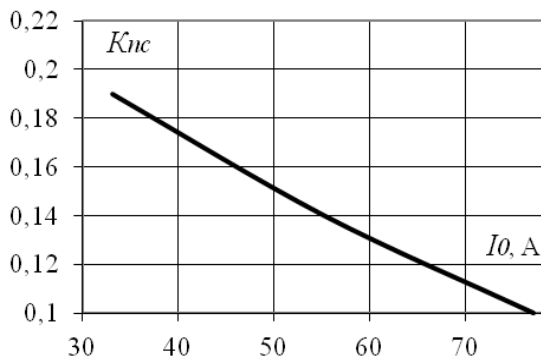


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від постійної складової струму

Fig. 6. The graph of the dependence of the current ripple coefficient on the constant component

З графіків випливає, що експериментальні залежності коефіцієнта пульсацій струму мають монотонний характер і тому можуть бути апроксимовані методом планування експери-

менту [3]. Параметри, які змінювались в процесі експерименту (кут керування тиристорів, електромагнітна стала якоря, відносний струм навантаження двигуна) в методі планування експерименту називають факторами. Згідно процедури метода отриманий аналітичний вираз:

$$K_{nc} = 0,141 + 0,025\alpha - 0,034T_a - 0,051I_0^* - 0,009\alpha T_a - 0,011\alpha I_0^* + 0,014T_a I_0^* + 0,004\alpha T_a I_0^* \quad (8)$$

Таким чином, методика розрахунку ККД двигуна при живленні від тиристорного випрямляча полягає у наступному: за виразом (8) для заданих параметрів електропривода розраховується величина коефіцієнта пульсацій струму і за виразом (6) – величина коефіцієнта корисної дії.

З вищевикладеного випливає, що механічна потужність на валу двигуна залежить від коефіцієнта пульсацій струму обмотки якоря, тобто, чим більший коефіцієнт пульсацій струму, тим менша величина механічної потужності на валу двигуна. Це означає, що в разі номінальної електричної потужності двигуна необхідно зменшувати механічну потужність на валу, інакше не буде забезпечено номінальний температурний режим обмотки якоря.

### Наукова новизна та практична значимість

Автор удосконалив аналітичний вираз для визначення ККД двигуна пульсуючого струму при його живленні від однофазного тиристорного випрямляча, який, на відміну від відомих, враховує коефіцієнт пульсацій струму обмотки якоря. Вперше отримана аналітична залежність коефіцієнта пульсацій струму для однофазного тиристорного електроприводу пульсуючого струму, як функція кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження.

### Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано методику для визначення ККД тягових двигунів при живленні пульсуючим стру-

мом, яка полягає в наступному: методом планування експерименту отримуються формули для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму з урахуванням кута керування тиристорів, електромагнітної сталої часу кола якоря і струму навантаження з подальшою підстановкою у вираз для розрахунку ККД.

Аналітичний вираз для визначення ККД двигуна пульсуючого струму при його живленні від однофазного тиристорного випрямляча дозволяє розрахувати коефіцієнт використання двигуна за механічною потужністю з урахуван-

ням допустимого нагрівання пульсуючим струмом.

Використання результатів роботи дозволить підвищити енергоефективність магістральних електровозів, які широко експлуатуються в Україні. При низькому розрахунковому значенні ККД необхідно збільшити індуктивність згладжувального реактора.

Зменшення споживання електроенергії дозволить заощаджувати енергоресурси та позитивно позначиться на екологічній ситуації в країні.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вольдек А. И. *Электрические машины* : учебник. Ленинград : Энергия, 1978. 832 с.
2. Костин Н. А., Петров А. В. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 53–59. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/0961b5e6-4c58-4ac0-9015-0825f428ad6c>
3. *Методы исследований и организация экспериментов* / под ред. проф. К. П. Власова. Харьков : «Гуманитарный центр», 2002. 256 с.
4. Островерхов М. Я., Пищов В. М. *Моделирование электромеханических систем в «SIMULINK»*. Київ : ВД «Стилос», 2008. 528 с.
5. Петренко А. Н., Танянский В. И., Петренко Н. Я. Дополнительные потери мощности частотно-управляемого асинхронного двигателя от высших гармоник напряжения. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 5. С. 34–35. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9e6fa386-8caf-4079-88fd-bfbad3e734d4>
6. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б., Мацко Б. М., Пересада С. М., Теряев В. І., Буртний В. В., Місюренко В. О., Панченко Б. Я. *Електромеханічні системи автоматичного керування та електротроприводи* : навч. посіб. / за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
7. *Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации* / под ред. Б. А. Тушканова. Москва : Транспорт, 1985. 541 с.
8. Bak Y., Lee K.-B. Reducing Switching Losses in Matrix Converter Drives: Discontinuous PWM Method. *Journal Power Electron*. 2018. Vol. 18, No. 5. P. 1325–1335.
9. Gervasio F., Mastromauro R., Liserre M. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (Seville, 17-19 March 2015). Seville, 2015. P. 1123–1128. DOI: <https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248>
10. Goolak S., Riabov Ie., Tkachenko V., Sapronova S., Rubanik I. Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. № 6. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.02>
11. Goolak S., Sapronova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, № 5(108). P. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
12. Gundabattini E., Mystkowski A., Idzkowski A., R. R. S., Solomon D. G. Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods-A Review. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 5. P. 1472. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051472>
13. Kharchenko V., Kostenko I., Liubarskyi B., Shaïda V., Kuravskiy M., Petrenko O. Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, No. 9(105). P. 46–54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288>
14. Raminosa T., Wiles R., Cousineau J. E., Bennion K., Wilkins J. A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (Detroit, 11-15 Oct. 2020). Detroit, 2020. P. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecce44975.2020.9235704>

15. Rens J., Vandenbossche L., Dorez O. Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*. 2020. Vol. 11, Iss. 1. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj11010024>
16. Xue L. L., Su G.-J., Ozpineci B. DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization (DREAM) Modulation Scheme for a High Power Density Inverter. *IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC)* (Phoenix, 14-17 June 2021). Phoenix, 2021. P. 186–191 DOI: <https://doi.org/10.1109/apec42165.2021.9487324>
17. Yamazaki K., Noiaki F. Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines Considering Laminated Core. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. Vol. 47, Iss. 5. P. 994–997. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2089501>

V. M. KOVALOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Mechatronics and Electrical Engineering», National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Vadym Manko St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (066) 222 05 58, e-mail [kovalov1952@gmail.com](mailto:kovalov1952@gmail.com), ORCID 0000-0001-5817-8790

## Energy Efficiency Analysis of Traction Motors of Mainline Electric Locomotives

**Purpose.** The energy efficiency of traction electric motors of mainline electric locomotives with a supply voltage of 25 kV is characterized by the efficiency factor (EFC). Traction motors are powered by a multi-arm single-phase half-controlled thyristor rectifier, the arms of which are connected to separate sections of the traction transformer. The purpose is to determine the influence of the current ripple coefficient on the efficiency of the motor. **Methodology.** The efficiency determination methodology is based on the law of energy conservation, methods of harmonic analysis and computer modeling to obtain the dependences of the armature current ripple coefficient on the thyristor control angle, armature circuit inductance and load current. **Finding.** An analytical expression for the efficiency of the motor with a pulsating armature current was obtained based on the calculation of relative electrical losses from the harmonic components of the current, which are equal to the square of the current ripple coefficient. A computer model was developed, based on which graphical dependences of the armature current ripple coefficient were obtained separately from the thyristor control angle, armature circuit inductance and load current. The results of the experiments were processed by the experiment planning method and an analytical expression was obtained for calculating the current ripple coefficient. The method for calculating the efficiency of a traction motor is as follows: for the given ohmic resistance and armature circuit inductance, load current and average thyristor control angle, the current ripple coefficient is calculated, the value of which is inserted into the expression for calculating the engine efficiency. **Originality.** The author improved the analytical expression for determining the efficiency of a DC motor when powered by a single-phase half-controlled thyristor rectifier, which, unlike the known ones, takes into account the armature winding current ripple coefficient. For the first time, an analytical dependence of the current ripple coefficient for a single-phase thyristor DC electric drive was obtained as a function of the thyristor control angle, armature circuit inductance and load current. **Practical value.** The analytical expression for determining the efficiency of a DC motor when powered by a single-phase half-controlled thyristor rectifier allows: 1) to calculate the load capacity of the motor by mechanical power on the shaft, taking into account the permissible heating by the effective value of the current with harmonic components; 2) to calculate the inductance of the smoothing reactor to increase the efficiency of the motor by reducing the current ripple coefficient.

*Key words:* electric locomotive; traction motor; thyristor rectifier; ripple coefficient; efficiency coefficient

### REFERENCES

1. Voldek, A. I. (1978). *Elektricheskie mashiny*. Leningrad, Russia : Energiya (in Russian)
2. Kostin, N. A., & Petrov, A. V. (2011). Methods of definition of components of total power in systems of electric propulsion. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 3, 53-59. Retrieved from <https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/0961b5e6-4c58-4ac0-9015-0825f428ad6c> (in Russian)
3. Vlasova, K. P. (Ed.). (2002). *Metody issledovaniy i organizatsiya eksperimentov*. Kharkov, Ukraine: Gumanitarnyj centr (in Russian)
4. Ostroverkhov, M. Ya., & Pyzhov, V. M. (2008). *Modeliuvannia elektromekhanichnykh system v «SIMULINK»*. Kyiv, Ukraine: VD «Stylos». (Ukrainian)

5. Petrenko, A. N., Tanyanskyi, V. I., & Petrenko, N. Y. (2012). Additional power loss in a frequency-controlled induction motor due to voltage higher harmonics. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 5, 34-35. Retrieved from <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9e6fa386-8caf-4079-88fd-bfbad3e734d4> (in Russian).
6. Popovych, M. H., Lozynskyi, O. Yu., Klepikov, V. B., Matsko, B. M., Peresada, S. M., Teriaiev, V. I., Burtnyi, V. V., Misiurenko, V. O., & Panchenko, B. Ya. (2005). *Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropryvody*. Kyiv, Ukraine: Lybid. (Ukrainian)
7. Tushkanov, B. A. (Ed.). (1985). *Elektrovoz VL80R. Rukovodstvo po ekspluatacii*. Moskva, Russia: Transport (in Russian).
8. Bak, Y., & Lee, K.-B. (2018). Reducing Switching Losses in Matrix Converter Drives: Discontinuous PWM Method. *Journal Power Electron*, 18(5), 1325-1335. (in English)
9. Gervasio, F., Mastromauro, R. A., & Liserre, M. (2015). Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. (pp. 1123-1128). Seville, Spain. DOI: <https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248> (in English)
10. Goolak, S., Riabov, I., Tkachenko, V., Saprionova, S., & Rubanik, I. (2021). Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 6, 11-17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.02> (in English)
11. Goolak, S., Saprionova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., & Batrak, Y. (2020). Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5(108)), 38-46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542> (in English)
12. Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A., R., R. S., & Solomon, D. G. (2021). Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods-A Review. *Energies*, 14(5), 1472. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051472> (in English)
13. Kharchenko, V., Kostenko, I., Liubarskyi, B., Shaida, V., Kuravskyi, M., & Petrenko, O. (2020). Simulating the traction electric drive operation of a trolleybus equipped with mixed excitation motors and a DC-DC converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9(105)), 46-54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288> (in English)
14. Raminosoa, T., Wiles, R., Cousineau, J. E., Bennion, K., & Wilkins, J. (2020). A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. In *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 61-67). Detroit, Michigan (USA). DOI: <https://doi.org/10.1109/ecce44975.2020.9235704> (in English)
15. Rens, J., Vandenbossche, L., & Dorez, O. (2020). Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*, 2020, 11(1), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj11010024> (in English)
16. Xue, L. L., Su, G.-J., & Ozpineci, B. (2021, June). DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization (DREAM) Modulation Scheme for a High Power Density Inverter. In *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 186-191). Phoenix, AZ, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec42165.2021.9487324> (in English)
17. Yamazaki, K., & Noiaki, F. (2011). Torque and Loss Calculation of Rotating Machines Considering Laminated Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(5), 994-997. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2089501> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.12.2025

Дата рецензування: 24.12.2025

Дата публікації: 27.03.2026