

КОВАЛЬОВ В. М., к.т.н., доцент,

(Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут")



Дослідження впливу пульсацій струму на коефіцієнт корисної дії тягових двигунів постійного струму

У статті проведений аналіз впливу пульсацій струму на коефіцієнт корисної дії (ККД) тягових двигунів постійного струму. Отриманий аналітичний вираз для розрахунку ККД тягових двигунів постійного струму магістральних електровозів при їх живленні від однофазних напівкерованих тиристорних випрямлячів. Визначений кількісний вплив гармонік струму якоря на ККД двигуна. Методика визначення ККД ґрунтується на законі збереження енергії, методі гармонійного аналізу, методах з теорії електричних машин та комп'ютерного моделювання. В результаті проведених досліджень удосконалений аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерованого тиристорного випрямляча з урахуванням коефіцієнта пульсацій струму. На комп'ютерній моделі отримані експериментальні графічні залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів, індуктивності обмотки якоря і струму навантаження. Методом планування експерименту отриманий аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму. Результати досліджень мають практичну значимість: аналітичний вираз для визначення ККД двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерованого тиристорного випрямляча дозволяє розрахувати коефіцієнт використання двигуна за механічною потужністю з урахуванням допустимого нагрівання пульсуючим струмом.

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

Постанова проблеми

Аналіз впливу пульсацій струму на коефіцієнт корисної дії (ККД) тягових двигунів постійного струму розглянемо на прикладі тиристорного електроприводу магістрального

електровоза серії ВЛ80^Р, який використовується на електрофікованих залізницях з однофазною змінною напругою 25 кВ. Силова схема тягового електропривода магістрального електровоза показана на рис. 1 [1,2].

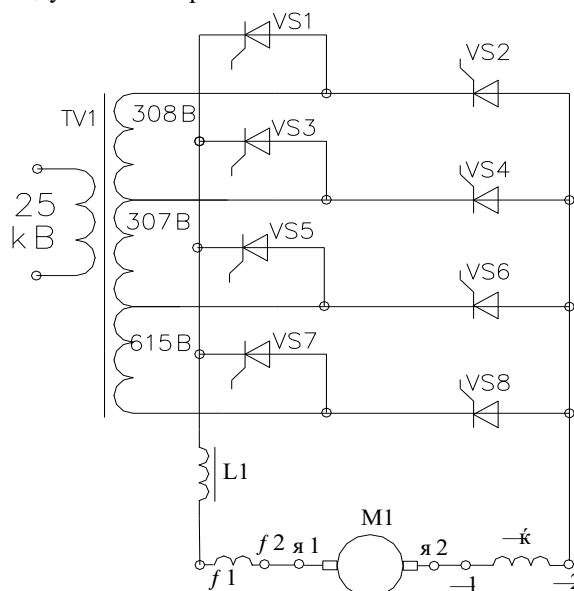


Рис.1. Силова схема тиристорного електропривода електровоза ВЛ80^Р

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

опори при 20°C: 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 вторинних обмоток 307+308+615=1230В.

Блоки тиристорів комплектуються з послідовно та паралельно включених тиристорів. Кожен блок містить сім паралельних тиристорів. Блоки тиристорів VS5 і VS6 містять два послідовно включені тиристиори, а блоки VS1-VS3, VS4, VS7, VS8 – три. Для рівномірного розподілу напруги по послідовно з'єднаних тиристорах використовують RC-ланцюжки. Для рівномірного розподілу струмів паралельним гілкам використовують індуктивні дільники.

Система керування формує 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.

Наявність діодного режиму тиристорів забезпечує замикання реактивного струму без повернення в електромережу і підвищення постійної складової струму. Струм якоря не повертається в електромережу, а протікає через тиристиори, що працюють в діодному режимі.

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

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

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

У четвертому режимі використовується три вторинних обмотки з результируючою напругою 1230 В. При цьому тиристиори VS1 і VS2 регулюють напругу, тиристиори VS7, VS8 працюють в діодному режимі, інші тиристиори вимкнені.

Чотири режими випрямляча застосовують для зменшення пульсацій струму, оскільки кут керування

тиристорів у номінальному режимі роботи електровоза зсувається в сторону менших значень.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна характеризує ефективність перетворення електроенергії в механічну роботу. Відповідно до [1] ККД тягових двигунів у номінальному режимі при живленні постійним струмом без пульсацій дорівнює 94,5%.

При живленні двигуна випрямленим пульсуючим струмом його гармонічні складові, не створюючи крутного моменту, збільшують електричні втрати. Це означає зменшення ККД до 84% згідно [1], але при цьому не приведена методика його розрахунку. Відомо, що величина ККД залежить від кута керування тиристорами, і може бути більшою або меншою від зазначеної величини. Тому визначення ККД в залежності від кута керування тиристорами є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

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 [3]

$$\eta_{nc} = 1 - (P_{mx} + P_{me} + P_{el0} + \sum P_{elv}) / P_{cn}, \quad (1)$$

де P_{mx} , P_{me} , P_{el0} , $\sum P_{elv}$, P_{cn} – 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 [4,5]

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

де $P_{cm.v}$ – 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.

Результируючі 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.

Електричні втрати в обмотках якоря доцільно розділити на статичні від постійної складової струму та пульсуючі 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 [6] запропонована модель для розрахунку електричних втрат в двигунах з пульсуючим струмом з урахуванням нелінійного характеру кривої намагнічування. Аналогічна модель розглянута в [7] для транзисторного електроприводу тролейбуса з двигунами змішаного збудження. В [8,9] проведено моделювання магнітних втрат від вищих гармонік. В [10] запропонована теплова карта нагрівання тягових електродвигунів з пульсуючим струмом. В [11] проведена оцінка електричних втрат при пульсуючому струмі в залежності від частоти комутації та ширини імпульсів транзисторного перетворювача. В [12] розглянуто удосконалена модель електричних втрат тягового двигуна електровоза. В [13,14] розглянуті залежність коефіцієнта пульсацій напруги від ширини імпульсів напруги живлення двигуна. В [15] розглянуті питання провалів крутного моменту двигуна з постійними магнітами через неідеальність їх характеристик.

Виділення невіршених раніше частин проблеми

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

Мета і задача роботи.

Отримати аналітичний вираз для розрахунку ККД тягових двигунів постійного струму при їх живленні від напівкерованих перетворювачів. Задача полягає у визначенні кількісного впливу гармонік струму якоря на ККД двигуна.

Викладення основного матеріалу. Для аналізу електричних втрат в тягових двигунах при пульсуючому струмі необхідно вибрати узагальнений параметр, який впливає на електричні втрати і не залежать 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 втрати доцільно використати таке визначення: коефіцієнт пульсацій струму це відношення діючого значення суми гармонік струму $\sqrt{\sum I_k^2}$ до постійної складової I_0

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

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

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

Електричні втрати в обмотках якоря при живленні пульсуючим струмом збільшується відносно живлення струмом без пульсацій за рахунок гармонік струму. Виразимо збільшення електричних втрат $\Delta P_{\text{я}}^*$ при живленні пульсуючим струмом відносно електричних втрат ΔP_0 при живленні струмом без пульсацій (без гармонік)

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

Згідно (5) загальні електричні втрати відносно статичних збільшуються на величину відносних пульсаційних втрат чисельно рівних квадрату коефіцієнта пульсацій струму $\Delta P_{nc}^* = K_{nc}^2$, а в іменованих одиницях пульсаційні електричні втрати дорівнюють $\Delta P_{nc} = K_{nc}^2 \Delta P_0$ (Вт).

Збільшення відносних електричних втрат на величину K_{nc}^2 означає зменшення ККД η_{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 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

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

навантаження на валу (постійна складова струму) та від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала).

Складний характер залежності K_{nc} від вказаних параметрів виключає можливість отримання його виразу в аналітичному вигляді. Таку залежність можливо визначати лише експериментально з подальшою апроксимацією аналітичним поліномом, наприклад, методом планування експерименту.

Оскільки двигуни постійного 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.

Принципових відмінностей між натурним експериментом і комп'ютерним експериментом на моделі немає, але 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 (постійна складова струму) та від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала) складемо комп'ютерну модель тиристорного електропривода в програмному пакеті "Simulink" [16], показану на рис. 2.

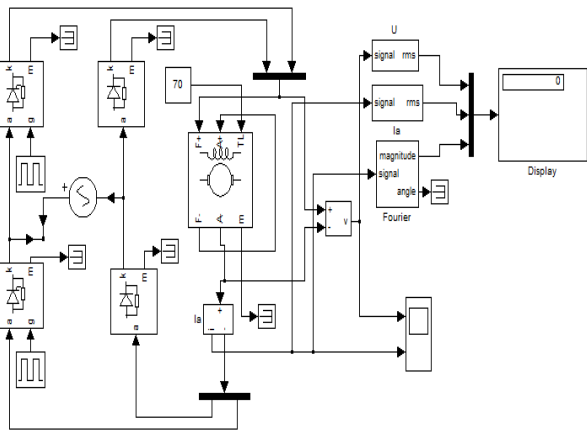


Рис.2. Комп'ютерна модель тягового тиристорного електропривода

Кут керування тиристорів задається блоками Pulse Generator. Постійна складова пульсуючого струму визначається блоком Magnitude signal, діюче значення визначається блоком signal rms.

Комп'ютерний експеримент проводиться наступним чином. Для діапазона кутів керування тиристорів вимірюються діючі значення струму якоря

I_a та їх постійні складові I_0 . Коефіцієнт пульсацій струму визначається за формулою

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

На моделі проведений розрахунок коефіцієнта пульсацій струму в залежності від кута керування, сталої часу та струму навантаження. В результаті отримані відповідні графіки, показані на рис. 3,4,5.

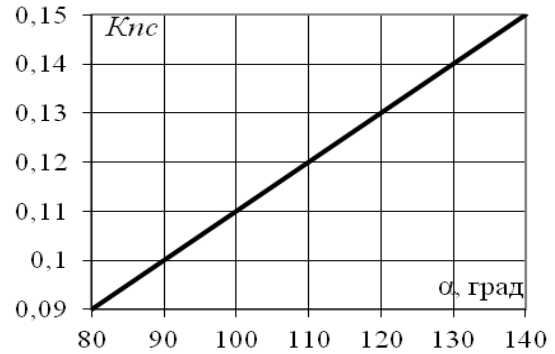


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів

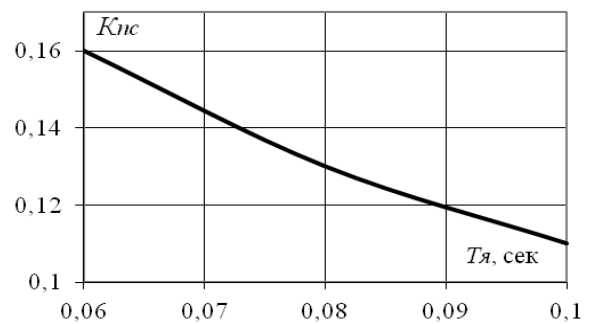


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від сталої часу кола якоря

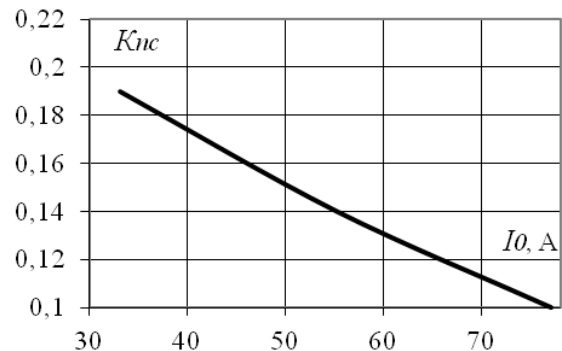


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від постійної складової струму якоря (момент навантаження)

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

З графіків випливає, що експериментальні залежності коефіцієнта пульсацій струму мають монотонний характер і тому можуть бути апроксимовані методом планування експерименту [17]. 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 вираз

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

Таким чином, за виразом (8) для заданих параметрів тягового електропривода розраховується величина коефіцієнта пульсацій струму і за виразом (6) - величина коефіцієнта корисної дії.

Висновки

Методом планування експерименту отримані формули для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму з урахуванням кута керування тиристорів, електромагнітної сталої часу кола якоря і струму навантаження з подальшим розрахунком ККД.

В результаті досліджень отримав подальший розвиток аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта корисної дії двигуна постійного струму при живленні від напівкерованого випрямляча магістрального електровоза.

Список використаних джерел

1. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации./ Под ред. Б.А. Тушканова. – К.: Техніка, 1985. – 541 с.
2. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Івахно В. В., Гордієнко Д. А., Шелест Д. А. Аналіз методів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2024, №2, С. 33-45.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – К: Техника, 1991. – 272 с.
4. Петренко А.Н., Тянянский В.И., Петренко Н.Я. Дополнительные потери мощности от высших гармоник частотно-управляемого асинхронного двигателя. Электротехника і електромеханіка 2012. №5. С. 34-35.
5. Костин Н.А., Петров А.В. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги. Технічна електродинаміка. 2011. №3. С. 53-59.

6. Goolak S., Riabov Ie., Tkachenko V., Saprionova S., Rubanik I. Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. Electrical Engineering & Electromechanics, 2021, no. 6, pp. 11-17. doi: 10.20998/2074-272X. 2021.6.02

7. Kharchenko V., Kostenko I., Liubarskyi B., Shaida V., Kuravskyi 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), pp. 46-54. doi: 10.15587/1729-4061.2020.205288.

8. 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, no 1, p. 24. doi: 10.3390/wevj11010024.

9. Yamazaki K., Noiaki F. Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines Considering Laminated Core. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 994 – 997. doi: 10.1109 / TMAG.2010.2089501

10. Edison Gundabattini, Arkadiusz Mystkowski, Adam Idzkowski, Raja Singh R. and Darius Gnanaraj Solomon Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods - A Review. Energies 2021, no14, 1472. doi: 10.3390/en14051472.

11. Yeongsu Bak, Kyo-Beum Lee. Reducing Switching Losses in Matrix Converter Drives: Discontinuous PWM Method. Journal Power Electron (THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRONICS), 2018, vol. 18, no. 5, pp. 1325-1335.

12. Goolak S., Saprionova 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, no. 5 (108), pp. 38-46. doi: 10.15587/1729-4061.2020.218542.

13. Lingxiao Xue, Guj-Jia Su, Burak Ozpineci. DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization Modulation Scheme for a High Power Density Converter. IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC). District of Columbia (USA), 2021, pp. 186-191.

14. Tcarafidy Raminosa, Randy Willis, Kevin Bannion. A High-Speed High-Power-Density Non-Heavy Rare-Earth Permanent Magnet Traction Motor. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, Michigan (USA), 2020, pp. 61-67.

15. Gervasio, F., Mastromauro, R., & Liserre, M. (2015). Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. IEEE International Conference on Industrial Technology

(ICIT), 1123-1128. <https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248>.

16. Островерхов М.Я., Пижов В.М. Моделирование электромеханических систем в "SIMULINK"– К.: ВД "Стилос", 2008. – 528 с.

17. Методы исследований и организация экспериментов / под ред. проф. К.П. Власова – Харьков: «Гуманитарный центр», 2002. 256

References

1. **Tushkanov, B. A. (Ed.). (1985).** *Elektrovoz VL80R. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL80R. Operation manual]. Tekhnika [in Russian].
2. **Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Ivakhno, V. V., Hordiienko, D. A., & Shelest, D. A. (2024).** Analiz metodiv keruvannia vypriamno-invertornoho peretvoriuvacha elektrovoza [Analysis of control methods for the rectifier-inverter converter of an electric locomotive]. *Informatsiino-keruivchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (2), 33-45 [in Ukrainian].
3. **Voldek, A. I. (1991).** *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Tekhnika [in Russian].
4. **Petrenko, A. N., Tanyansky, V. I., & Petrenko, N. Ya. (2012).** Dopolnitelnye poteri moshchnosti ot vysshikh garmonik chastotno-upravlyaemogo asinkhronnogo dvigatelya [Additional power losses from higher harmonics of a frequency-controlled induction motor]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*, (5), 34-35 [in Russian].
5. **Kostin, N. A., & Petrov, A. V. (2011).** Metody opredeleniya sostavlyayushchikh polnoy moshchnosti v sistemakh elektricheskoy tyagi [Methods for determining the components of total power in electric traction systems]. *Tekhnichna elektrodynamika*, (3), 53-59 [in Russian].
6. **Goolak, S., Riabov, Ie., Tkachenko, V., Sapronova, S., & Rubanik, I. (2021).** Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), 11-17. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.02>
7. **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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288>
8. **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*, 11(1), Article 24. <https://doi.org/10.3390/wevj11010024>
9. **Yamazaki, K., & Noiaki, F. (2011).** Torque and loss calculation of rotating machines considering laminated core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(5), 994–997. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2089501>
10. **Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A., Singh, R. R., & 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), Article 1472. <https://doi.org/10.3390/en14051472>
11. **Bak, Y., & Lee, K.-B. (2018).** Reducing switching losses in matrix converter drives: Discontinuous PWM method. *Journal of Power Electronics*, 18(5), 1325-1335.
12. **Goolak, S., Sapronova, 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
13. **Xue, L., Su, G.-J., & Ozpineci, B. (2021).** DC-ripple-energy adaptive-minimization modulation scheme for a high power density converter. In *Proceedings of the 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 186-191). IEEE.
14. **Raminoso, T., Willis, R., & Bannion, K. (2020).** A high-speed high-power-density non-heavy rare-earth permanent magnet traction motor. In *Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 61-67). IEEE.
15. **Gervasio, F., Mastromauro, R., & Liserre, M. (2015).** Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1123-1128). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125248>
16. **Ostroverkhov, M. Ya., & Pyzhov, V. M. (2008).** *Modeliuvannia elektromekhanichnykh system v "SIMULINK"* [Modeling of electromechanical systems in "SIMULINK"]. Stylos [in Ukrainian].
17. **Vlasov, K. P. (Ed.). (2002).** *Metody issledovaniy i organizatsiya eksperimentov* [Research methods and organization of experiments]. Gumanitarnyy tsentr [in Russian].

Kovalov V. Investigation of the influence of current ripples on the efficiency of DC traction motors

Purpose. Perform an analysis of the energy of traction thyristor electric drives of direct current. Obtain an analytical expression for calculating the efficiency factor DC motors when connected to semiconductor converters. The task is to determine the influence of the harmonic components of the armature current on the efficiency factor.

Methodology. The method for determining the efficiency factor is based on the law of conservation of energy, Ampere, Kirchhoff and Faraday, the method of harmonic analysis, on the principle of superposition for instantaneous powers and on the methods of the theory of electrical machines.

Results. The obtained analytical expression for determining the efficiency factor DC motor when connected to semiconductor converters.

Scientific novelty. The equation for the power balance of the DC motor for the harmonic components of the armature current was further developed, which, unlike the known ones, takes into account the mechanical component of the power. An improved analytical expression for determining the efficiency factor DC motor with a pulsating power supply, taking into account the current ripple factor. For the first time, the dependence of the current ripple coefficient for a single-phase thyristor DC electric drive was approximated as a function of the control angle, the inductance of the armature winding and the load current.

Practical significance. An analytical expression for determining the efficiency of a general-purpose DC motor when connected to semiconductor converters makes it possible to calculate the motor utilization factor in terms of mechanical power, taking into account the permissible heating by a pulsating current. This is an example of the practical use of the results obtained when a DC motor is powered from a single-phase thyristor rectifier.

Keywords: electric locomotive, traction motor, thyristor rectifier, factor pulsating, efficiency factor

Ковальов Віктор Миколайович, к.т.н., доцент, кафедра мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут".

E-mail: kovalov1952@gmail.com.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-8790>

· Viktor Kovalov, PhD, Associate professor

Department of «Mechatronics and Electrical Engineering», National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" e-mail: kovalov1952@gmail.com;

ORCID:(0000-0001-5817-8790

Стаття надійшла 08.01.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.