

Ковальов Віктор Миколайович, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Мехатроніка та електротехніка», +38(066)222-05-58, kovalov1952@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5817-8790

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
вул. Вадима Манька, 17, Харків, Україна, 61002*

МЕХАНІЧНА ПОТУЖНІСТЬ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Анотація. Тягові електродвигуни магістральних електровозів живляться від багатоплецевого однофазного напівкерovanого тиристорного випрямляча, плечі якого підключені до окремих секцій тягового однофазного трансформатора. Гармоніки струму якоря нагрівають двигун, не створюючи крутного моменту, тому механічна потужність навантаження повинна бути зменшена відносно номінальної для забезпечення номінального температурного режиму двигунів. **Мета.** Отримати аналітичний вираз для визначення коефіцієнта зменшення механічної потужності тягових двигунів за умовою збереження їх номінального теплового режиму. **Задача** полягає у визначенні кількісного впливу гармонік струму якоря на механічну потужність тягових двигунів. **Методика.** Методика визначення ґрунтується на законі збереження енергії, методи гармонійного аналізу пульсуючого струму обмотки якоря, методах з теорії електричних машин та методі комп'ютерного моделювання для отримання експериментальних залежностей коефіцієнта пульсацій струму якоря від кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. **Результати та їх наукова новизна.** Розроблена комп'ютерна модель тиристорного електропривода, на основі якої отримані експериментальні графічні залежності коефіцієнта пульсацій струму якоря від кута керування тиристорів, індуктивності кола якоря і струму навантаження. При апроксимації експериментальних даних отримав подальший розвиток аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта пульсацій струму якоря в залежності від вищеназваних параметрів. Показано, що відносні електричні втрати від гармонійних складових струму дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму. Вперше отриманий аналітичний вираз коефіцієнта зменшення механічної потужності тягового двигуна постійного струму при живленні від однофазних напівкерovanаних тиристорних випрямлячів з урахуванням коефіцієнта пульсацій струму. **Практична значимість.** Аналітичний вираз для визначення коефіцієнта зменшення механічної потужності двигуна постійного струму при його живленні від однофазного напівкерovanого тиристорного випрямляча дозволяє: 1) розрахувати навантажувальну здатність тягового двигуна механічною потужністю на валу з урахуванням допустимого нагрівання діючим значенням струму з гармонійними складовими; 2) розрахувати індуктивність згладжувального реактора для підвищення механічної потужності навантаження двигуна за рахунок зменшення коефіцієнта пульсацій струму.

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

Kovalov Viktor, Ph.D, assistant professor, assistant professor «Department of Mechatronic & Electrotechnic», +38(066)222-05-58, kovalov1952@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5817-8790

*National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
17 str. Vadym Manko, Kharkiv, Ukraine, 61002*

MECHANICAL POWER OF TRACTION ELECTRIC DRIVES OF MAINLINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

Abstract. The mechanical power of traction electric motors of mainline electric locomotives with a supply voltage of 25 kV is determined by the efficiency when powered from a multi-arm single-phase semi-controlled thyristor rectifier, the arms of which are connected to separate sections of a traction single-phase transformer. Purpose: to obtain an analytical expression for calculating the coefficient of reduction of mechanical power of traction electric motors under the condition of maintaining the nominal thermal regime of the motors. The task is to determine the quantitative influence of armature current harmonics on the mechanical power of traction motors. **Methodology.** The determination methodology is based on the law of conservation of energy, the method of harmonic analysis of the pulsating current of the armature winding, methods from the theory of electric machines and the method of computer modeling to obtain experimental dependences of the pulsation coefficient of the armature current on the control angle of thyristors, the inductance of the armature circuit and the load current. **Results and their scientific novelty.** A computer model of a thyristor electric drive has been developed, on the basis of which experimental graphical dependences of the armature current ripple coefficient on the thyristor control angle, armature circuit inductance and load current have been obtained. For the first time, an analytical expression for the coefficient of reduction of the mechanical power of a DC traction motor when powered by single-phase semi-controlled thyristor rectifiers has been obtained, taking into account the current ripple coefficient, 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. An analytical expression for calculating the armature current ripple coefficient, taking into account the thyristor control angle, armature winding inductance and load current, has been further developed. **Practical significance.** The analytical expression for determining the coefficient of reduction of the mechanical power of a DC motor when powered by a single-phase half-controlled thyristor rectifier allows: 1) to calculate the load capacity of the traction 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 mechanical power of the motor by reducing the current ripple coefficient.

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

Вступ. Силова схема тягового електропривода магістрального електровоза серії ВЛ80Р показана на рис. 1 [1].

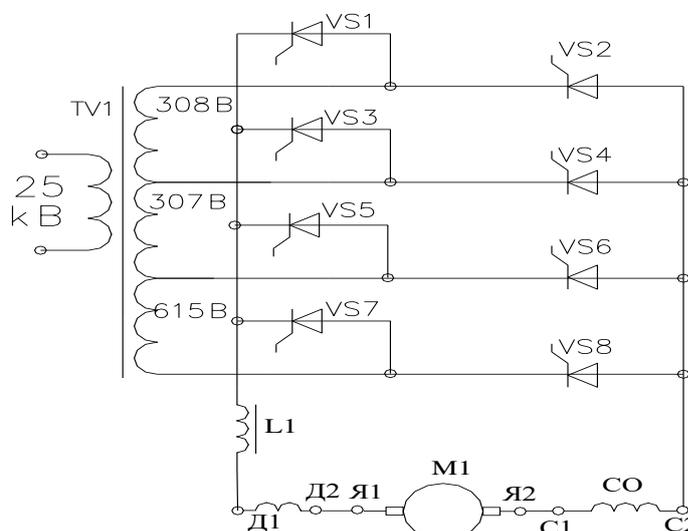


Рисунок 1 – Силова схема тиристорного електропривода електровоза ВЛ80Р

Схема містить однофазний трансформатор з первинною напругою 25 кВ і секціоновану вторинну обмотку. Параметри тягових двигунів серії НБ-418К6: номінальна потужність 740 кВт, номінальна напруга якоря 950 В, номінальний струм якоря 880 А, номінальна частота обертання 915 об/хв, ККД=94,5 %, опори при 20⁰ С: 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 – 4 777 кВА, напруга первинної обмотки – 25 кВ, напруги вторинних обмоток 307+308+615=1 230 В. Блоки тиристорів 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 напруги по послідовно з'єднаних тиристорах використовують RC-ланцюжки. Для рівномірного розподілу струмів паралельним гілкам використовують індуктивні дільники.

Система керування формує напівкеровані 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 тиристори, 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 тиристори VS3 і VS4 регулюють напругу, тиристори VS5, VS6 працюють в діодному режимі, інші тиристори вимкнені.

У другому режимі використовується дві вторинних обмотки з

результуючою 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 результуючою 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 результуючою 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 застосовують для зменшення пульсацій струму, оскільки кут керування тиристорів у номінальному режимі роботи електровоза зсувається в сторону менших значень.

Механічна потужність тягових двигунів визначає залежить від їх коефіцієнтів корисної дії (ККД), який зазвичай визначають експериментально в процесі запуску серії у виробництво. 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 гармонійні складові, не створюючи крутного моменту, збільшують електричні втрати і нагрівають двигун. Це означає зменшення ККД до 84 % згідно [1], але при цьому не приведена методика для його розрахунку. Відомо, що величина ККД і механічна потужність залежить від кута керування тиристорами, і може бути більшою або меншою від зазначеної величини. Тому визначення механічної потужності тягових двигунів в залежності від кута керування тиристорами є актуальною задачею.

Аналіз публікацій. При живленні двигуна постійного струму від тиристорного випрямляча його ККД визначається за формулою [2–4]:

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

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 [5]

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

де $p_{ст.v}$ – 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.

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 і механічної потужності, 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 не ідеальні їх характеристик.

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

Мета і задача роботи – теоретично обґрунтувати зменшення механічної потужності навантаження двигунів постійного струму при живленні від однофазних напівкерованих тиристорних випрямлячів. Отримати аналітичний вираз для розрахунку коефіцієнта зменшення механічної потужності за умовою збереження номінального теплового режиму тягових двигунів. Задача полягає у визначенні кількісного впливу гармонік струму якоря на механічну потужність тягових двигунів.

Результати досліджень. 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 стандарту Міжнародної електротехнічної комісії ІЕК-60050-161. 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

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

Електричні втрати в обмотках якоря від діючого значення пульсуючого $I_{\text{я}} = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2}$ струму розділяємо на статичні $\Delta P_0 = I_0^2 R_{\text{я}}$ від постійної складової струму та пульсуючі $\Delta P_{nc} = \sum (I_k^2 R_{\text{я}})$ 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 $\Delta P_{я}^*$ при живленні пульсуючим струмом відносно електричних втрат ΔP_0 при живленні струмом без пульсацій (без гармонік)

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

Згідно (5) загальні електричні втрати відносно статичних збільшуються на величину відносних пульсуючих 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 збільшується ККД, оскільки зменшуються електричні втрати від гармонік струму. В процесі регулювання швидкості K_{nc} змінюється в певному діапазоні кутів керування тиристорів, то в (6) слід підставляти його середнє значення.

Оскільки ККД двигуна при пульсуючому струмі зменшується, то пропорційно необхідно зменшувати механічну потужність, щоб електрична потужність не перевищила номінального значення. Для кількісної оцінки зменшення механічної потужності при пульсуючому струмі вводимо поняття коефіцієнта $K_{мз}$ коефіцієнта зменшення механічної потужності тягових двигунів, як відношення механічної потужності $P_{мп}$ при пульсуючому струмі до механічної потужності $P_{м0}$ при струмі без пульсацій. Для визначення коефіцієнта $K_{мз}$ складаємо тотожність споживаних електричних потужностей

$$P_{м0} + I_0^2 R_{я} = P_{мп} + I_0^2 R_{я} (1 + K_{nc}^2). \quad (7)$$

Виконавши необхідні алгебраїчні перетворення з (7), отримаємо вираз для розрахунку коефіцієнта зменшення механічної потужності

$$K_{мз} = \frac{P_{mn}}{P_{m0}} = 1 - \frac{I_0^2 R_{я}}{P_{m0}} K_{nc}^2 \quad (8)$$

Таким чином, для визначення коефіцієнта зменшення механічної потужності тягових двигунів, необхідно визначати коефіцієнт пульсацій струму якоря, який залежить від кута керування тиристорів, від моменту 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 визначаються причинно-наслідковими зв'язками і точно описуються диференційними рівняннями, то доцільно проводити комп'ютерний експеримент. Перевага комп'ютерного експерименту полягає в можливості абсолютно точно задавати параметри електропривода і стабілізувати їх в процесі експерименту.

Для експериментального визначення залежності коефіцієнта пульсацій струму від параметрів електропривода складена комп'ютерна модель тиристорного електропривода в програмному пакеті «Simulink» [16], показана на рис. 2.

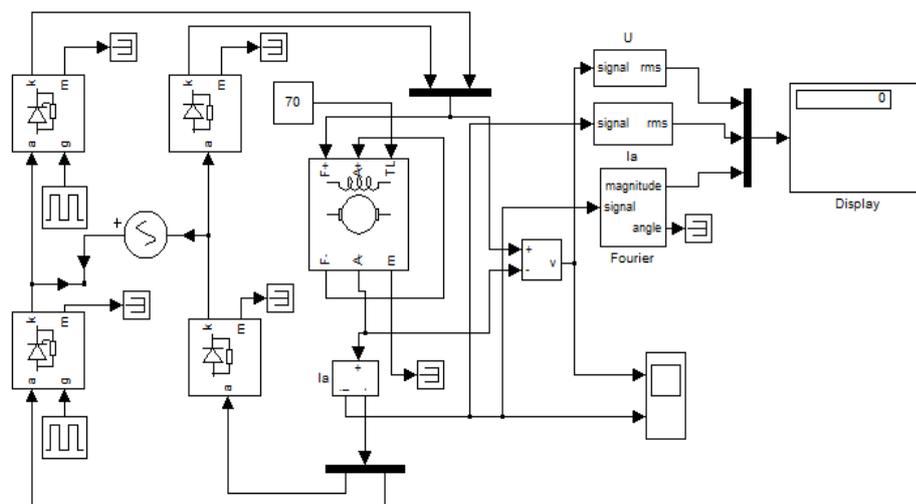


Рисунок 2 – Комп'ютерна модель тягового тиристорного електропривода електровоза

На рис. 3 показані розрахункові осцилограми напруги і струму якоря, як результати математичного моделювання.

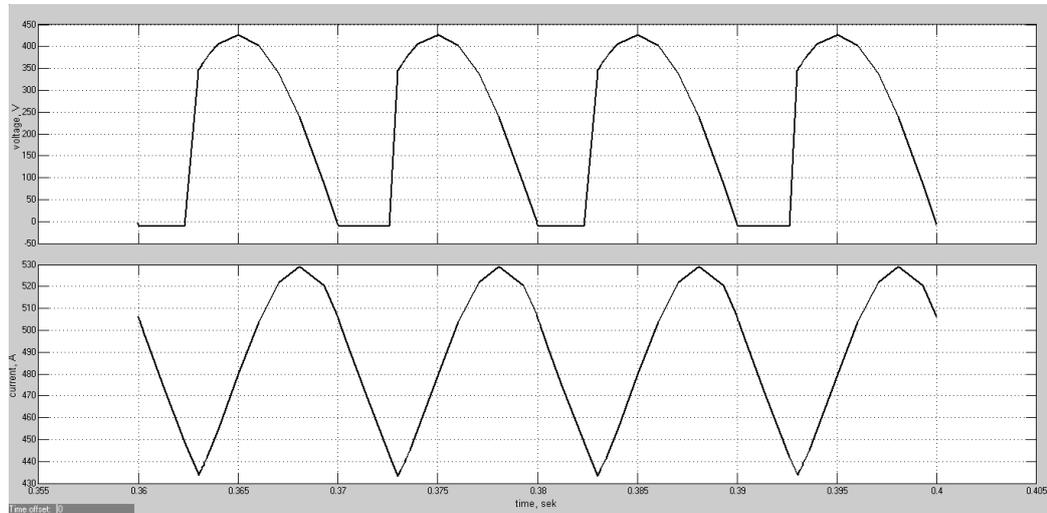


Рисунок 3 – Розрахункові осцилограми напруги якоря і струму якоря

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

$$K_{nc} = \sqrt{I_a^2 - I_0^2} / I_a \quad (9)$$

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. 4, 5, 6.

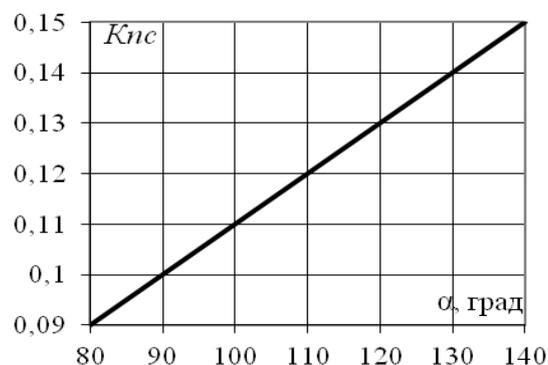


Рисунок 4 – Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів

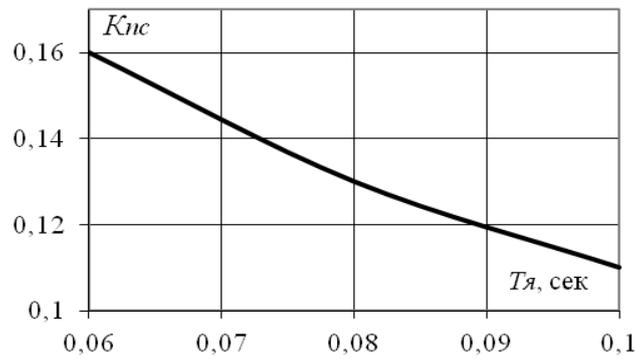


Рисунок 5 – Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від сталої часу кола якоря

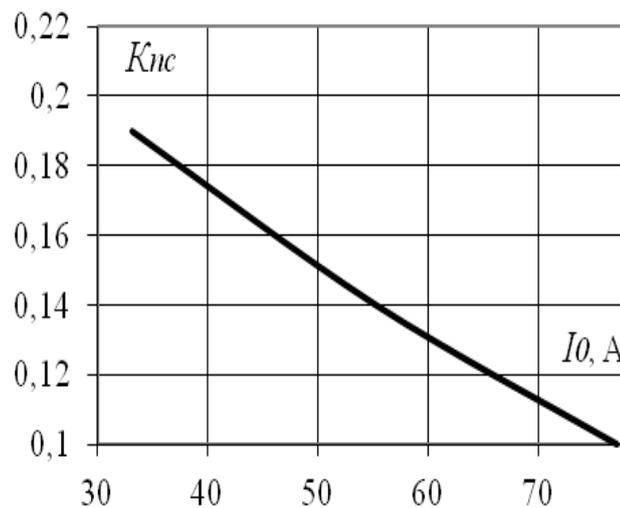


Рисунок 6 – Графік залежності коефіцієнта пульсацій струму від постійної складової струму якоря (момент навантаження)

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

$$K_{nc} = 0,141 + 0,025\alpha - 0,034T_{я} - 0,051I_0^* - 0,009\alpha T_{я} - 0,011\alpha I_0^* + 0,014T_{я} I_0^* + 0,004\alpha T_{я} I_0^*. \quad (10)$$

Таким чином, за виразом (10) для заданих параметрів електропривода розраховується величина коефіцієнта пульсацій струму і за виразом (8) – коефіцієнт зменшення механічної потужності.

За виразом (10) розрахована залежність коефіцієнта пульсацій струму від кута керування тиристорів для електромагнітної сталої часу 0,06 сек і відносного струму навантаження 0,74 від номінального. Далі за виразом (8) розрахована залежність коефіцієнта зменшення механічної потужності двигуна від кута керування тиристорів, яка показана на рис. 7.

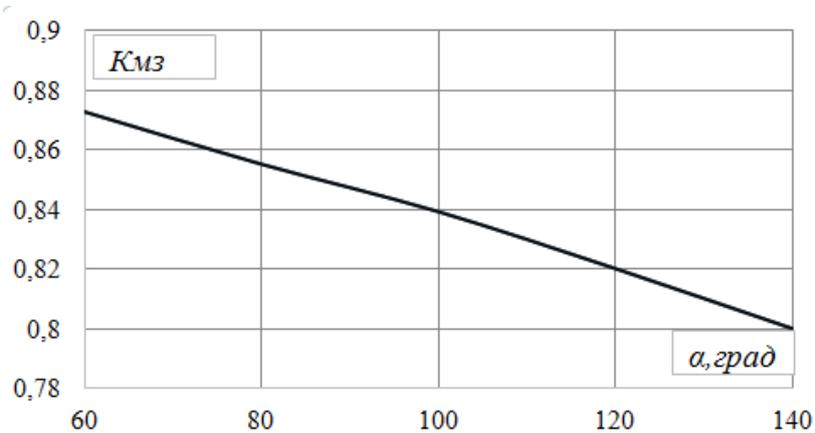


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта зменшення механічної потужності двигуна від кута керування тиристорів

На графіку кут керування тиристорів вказаний в градусах для наочності, але у вираз (10) підставляється в радіанах. На практиці коефіцієнт пульсацій струму можна визначити методом двох амперметрів (стрілкових): амперметр магнітоелектричної системи вимірює постійну складову струму I_0 , амперметр електромагнітної – діюче значення $I_{дй}$ з урахуванням постійної складової. Тоді коефіцієнт пульсацій струму розраховується за формулою $K_{nc} = \sqrt{I_{дй}^2 - I_0^2} / I_0$.

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 зменшення механічної потужності тягового двигуна постійного струму при живленні від напівкерованого випрямляча магістрального електровоза.

Таким чином, при виборі потужності тягових двигунів, який підключається до напівпровідникового перетворювача, необхідно розрахувати середнє значення коефіцієнта пульсацій струму якоря і коефіцієнт зменшення механічної потужності, щоби остання не була нижче потужності електровоза.

Для підвищення механічної потужності двигуна у зовнішнє коло якоря слід встановлювати згладжувальний реактор, індуктивність якого розраховується, виходячи з необхідного коефіцієнта пульсацій струму якоря.

Список використаної літератури:

1. Электровоз ВЛ80. Руководство по эксплуатации. / Под ред. Б. А. Тушканова. Київ : Транспорт, 1985. 541 с.
2. Вольдек А. И. Электричные машины. Київ : Техніка. 1991. 272 с.
3. Костин Н. А., Петров А. В. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги. *Технічна електродинаміка*, 2011. № 3. С. 53–59.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
5. Петренко А. Н., Таянский В. И., Петренко Н. Я. Дополнительные потери мощности от высших гармоник частотно-управляемого асинхронного двигателя. *Електротехніка і електромеханіка*, 2012. № 5. С. 34–35.
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., Shaيدا 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. № 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. № 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. № 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. № 14. 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 KOREEN INSTITUTE POWE ELECTONICS)*, 2018. Vol. 18. № 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. № 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 Appled Power Electronics Conference (APEC). District of Columbia (USA)*, 2021. PP. 186–191.

14. Tscarafidy Raminosoa, 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. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015. P. 1123–1128. doi.org/10.1109/icit.2015.7125248..
16. Островерхов М. Я., Пижов В. М. Моделювання електромеханічних систем в "SIMULINK". Київ : ВД «Стилос», 2008. 528 с.
17. Методы исследований и организация экспериментов / под ред. проф. К. П. Власова – Харьков : «Гуманитарный центр», 2002. 256 с.

REFERENCES:

1. Electric locomotive VL80R. Operating manual./Ed. B. A. Tushkanova. Kyiv : Transport, 1985. 541 p.
2. Voldek A. I. Electrical mashines. Kyiv : Tehnika, 1991. 272 с.
3. Kostin n.A., Petrov a.V. Methods of determination of constituents of complete power in the systems of electric traction. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2011. No 3. Pp. 53–59.
4. Popovich M. G., Lozinskiy O. Y., Klepikov V. B. Electromechanics systems for automatic control and electrical drives. Kyiv : “Libid”, 2005. 680 p. (Ukr)
5. Petrenko A. N., Tanyansky V. I., Petrenko N. Ya. Additional power losses from higher harmonics of a frequency-controlled induction motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2012. № 5, PP. 34–35.
6. 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. 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. № 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. № 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. № 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. № 14. 1472. doi: 10.3390/en14051472.
11. Yeongsu Bak, Kyo-Beum Lee. Reducing Switching Losses in Matrix Convertor Drives: Discontinuous PWM Method. *Journal Power Electron (THE KOREEN INSTITUTE POWE ELECTONICS)*, 2018. Vol. 18. № 5. PP. 1325–1335.
12. 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). 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 Convertor. *IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC). District of Columbia (USA)*, 2021. PP. 186–191.

14. Tscarafidy 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. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015. 1123–1128. doi.org/10.1109/icit.2015.7125248..
16. Ostroverkhov M. Ya., Pizhov V. M. Modeling of electromechanical systems in "SIMULINK" – Kyiv : VD "Stylos", 2008. 528 p.
17. Vlasov K. P. The method of investigation and organization experimtns. Kharkov : Gumanitarnyi center, 2002. 256 p.

Стаття надійшла до редакції: 02.12.2025; рецензування: 22.12.2025; прийнята до публікації 05.01.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису. The article was submitted on 02.12.2025; revised on 22.12.2025; and accepted for publication on 05.01.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.