



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: C01, C15, C2

DOI: 10.62911/ete.2024.02.01.08

A method for reducing current ripples in traction motors for contact electric locomotives with pulse width modulation


Citation:

Pyrozhenko, A., Modlo Ye., Shupov, V., Zhukov, M. & Shaida, R. (2024). A method for reducing current ripples in traction motors for contact electric locomotives with pulse width modulation. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 2 No. 1 (2024), 93–106. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.01.08>

Andrii Pyrozhenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 *ORCID ID: 0000-0001-8148-4956*

Yevhenii Modlo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: modlo_yo@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0003-2037-1557*

Vitalii Shupov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shupov@gmail.com

 *ORCID ID: 0000-0003-4197-7603*

Mykola Zhukov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: krogzhuns@gmail.com

 *ORCID ID: 0000-0003-4308-0218*

Ruslan Shaida

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: aumpekmi.nmetau@gmail.com

 *ORCID ID: 0000-0002-7942-9592*

Abstract: Disadvantages that occur when powering the traction motors of mine contact electric locomotives from a pulse width converter (PWC) due to significant current pulsations are given: significant current and moment pulsations and skidding of the wheel pairs of the electric locomotive in the mode of displacement.

An analysis of known methods of reducing current pulsations of traction motors, such as the use of reactors in the armature circuit of motors, increasing the frequency of the pulse converter, determined their insufficient efficiency. On the basis of the conducted analysis, a number of shortcomings of known methods of reducing current pulsations and their non-compliance with existing requirements were revealed. Thus, the use of reactor engines connected in series in the armature circuit leads to significant power losses in them. Increasing the frequency of the pulse-width converter requires an individual selection of the optimal frequency value for each type of electric locomotive and in any case leads to an increase in switching losses in the converter, which in turn leads to a decrease in the quality of electrical energy.

The proposed method of separate power supply of the traction motors of the two-engine drive of the mine electric locomotive from two PWC instead of the existing parallel one. Comparative studies of the proposed method of separate power supply of traction motors with a time shift in the operation of pulse width converters for half the period of the operating frequency with the applied parallel connection were conducted. On the basis of the conducted research, the effectiveness of the proposed method has been proven.

It is shown that the maximum value of traction current ripples occurs at a duty cycle of 0.5 and at a frequency of 300 Hz does not exceed 10%, and taking into account the shift in time in the operation of converters for half the period of their operating frequency, traction current ripples at the indicated frequency will not exceed 5% .

Received: 12/03/2024

Accepted: 10/04/2024




Keywords: traction motor, pulse width converter, separate power supply, harmonic current components.

A method for reducing current ripples in traction motors for contact electric locomotives with pulse width modulation

Andrii Pyrozhenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-8148-4956

Yevhenii Modlo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: modlo_yo@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2037-1557

Vitalii Shupov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shupov@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0003-4197-7603

Mykola Zhukov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0003-4308-0218

Ruslan Shaida

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: aumpekmi.nmetau@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-7942-9592

Abstract: Disadvantages that occur when powering the traction motors of mine contact electric locomotives from a pulse width converter (PWC) due to significant current pulsations are given: significant current and moment pulsations and skidding of the wheel pairs of the electric locomotive in the mode of displacement. An analysis of known methods of reducing current pulsations of traction motors, such as the use of reactors in the armature circuit of motors, increasing the frequency of the pulse converter, determined their insufficient efficiency. On the basis of the conducted analysis, a number of shortcomings of known methods of reducing current pulsations and their non-compliance with existing requirements were revealed. Thus, the use of reactor engines connected in series in the armature circuit leads to significant power losses in them. Increasing the frequency of the pulse-width converter requires an individual selection of the optimal frequency value for each type of electric locomotive and in any case leads to an increase in switching losses in the converter, which in turn leads to a decrease in the quality of electrical energy. The proposed method of separate power supply of the traction motors of the two-engine drive of the mine electric locomotive from two PWC instead of the existing parallel one. Comparative studies of the proposed method of separate power supply of traction motors with a time shift in the operation of pulse width converters for half the period of the operating frequency with the applied parallel connection were conducted. On the basis of the conducted research, the effectiveness of the proposed method has been proven. It is shown that the maximum value of traction current ripples occurs at a duty cycle of 0.5 and at a frequency of 300 Hz does not exceed 10%, and taking into account the shift in time in the operation of converters for half the period of their operating frequency, traction current ripples at the indicated frequency will not exceed 5%.


Keywords: traction motor, pulse width converter, separate power supply, harmonic current components.

Метод зниження пульсацій струму тягових двигунів шахтних контактних електровозів з широтно-імпульсним регулюванням

Андрій Пироженко

к.т.н., доцент, Державний Університет економіки і технологій, Україна


e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-8148-4956

Євгеній Модло

к.п.н., доцент, Державний Університет економіки і технологій, Україна


e-mail: modlo_yo@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2037-1557

Віталій Шупов

к.т.н., доцент, Державний Університет економіки і технологій, Україна


e-mail: shupov@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0003-4197-7603

Микола Жуков

к.т.н., доцент, Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0003-4308-0218

Руслан Шайда

асистент, Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: aumpekmi.nmetau@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-7942-9592

Анотація: Наведені недоліки, що мають місце під час живлення тягових двигунів шахтних контактних електровозів від широтно-імпульсного перетворювача (ШП) через значні пульсації струму: значні пульсації струму та моменту та буксування колісних пар електровозу в режимі його зрушення з місця. Проведений аналіз відомих методів зниження пульсацій струму тягових двигунів, як то застосування реакторів в якірному колі двигунів, підвищення частоти імпульсного перетворювача визначила їх недостатню ефективність. На підставі проведеного аналізу виявлений ряд недоліків відомих методів зниження пульсацій струму та їх невідповідності існуючим вимогам. Так, застосування послідовно ввімкнених в якірне коло двигунів реакторів призводить до значних втрат потужності в них. Підвищення частоти широтно-імпульсного перетворювача потребує індивідуального вибору оптимального значення частоти для кожного типу електровозу і в будь-якому разі веде до збільшення комутаційних втрат в перетворювачі, що в свою чергу веде до зниження якості електричної енергії. Запропонований метод роздільного живлення тягових двигунів дводвигунного приводу шахтного електровозу від двох ШП замість існуючого паралельного. Проведені порівняльні дослідження запропонованого методу роздільного живлення тягових двигунів зі зсувом за часом у роботі широтно-імпульсних перетворювачів на половину періоду робочої частоти з застосуванням паралельним з'єднанням. На підставі проведених

досліджень доведена ефективність запропонованого методу. Показано що максимальне значення пульсацій тягового струму має місце при скважності 0,5 і при частоті ШПП 300 Гц не перевищує 10%, а з урахуванням здвигу у часі в роботі перетворювачів на половину періоду їх робочої частоти пульсації тягового струму на вказаній частоті не перевищать 5%.

Ключові слова: тяговий двигун, широтно – імпульсний перетворювач, роздільне живлення, гармонійні складові струму.

Вступ (Introduction)

Живлення тягових двигунів шахтних контактних електровозів від широтно-імпульсного перетворювача викликають значні пульсації струму та моменту, що, в свою чергу, призводить до буксування колісних пар електровозу в режимі його зрушення з місця та недовикористання його щепної маси (*Sinchuk O.M., Chumak V.V., Yerzhov O.V., 1988, Debilyi V.L. Suchasni, 2002*). Крім того, пульсації струму створюють у двигуні додаткові втрати від змінної складової струму та погіршують умови комутації на колекторі (*Sinchuk O.M., et al, 2006, Zakharchenko D. D., Rotanov N. A. Tiahovi, 1991*). Окрім цього, якість електричної енергії була і залишається важливою та часто досліджуваною проблемою в системах електричної тяги. Наприклад обмеження щодо гармонійного забруднення передбачена у стандарті IEEE-519-1992 (*IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2014*).

Для обмеження пульсацій струму у якірному колі тягових двигунів встановлюють реактори. При цьому знижуються пульсації моменту двигунів і втрати від змінної складової струму, однак втрати в реакторах знижують ККД електропривода в цілому (*Pasko O.V., 2004*). Наявність реакторів веде до значного збільшення маси та об'єму електрообладнання, що створює додаткові труднощі застосування імпульсних перетворювачів (*Pasko O.V. Kombinatoryka skhem tiahovoho elektropryvodu zminnoho strumu, 2004*). Інший спосіб зниження рівня пульсацій полягає у підвищенні частоти широтно-імпульсного перетворювача (*Sinchuk O.M., et al, 2006*). Однак, підвищення частоти ШПП веде до збільшення комутаційних втрат в перетворювачі та погіршують умови комутації на колекторі (*A. V. Agunov et al, 2021*). У цьому випадку необхідний індивідуальний вибір оптимальної частоти ШПП для кожного типу електровозу. Тому очевидна необхідність зменшити пульсації струму іншим шляхом – без встановлення реакторів, а саме шляхом роздільного живлення тягових двигунів дводвигунного приводу шахтного електровозу від двох ШПП замість існуючого паралельного.

Таким чином, недостатня ефективність відомих методів зниження пульсацій струму тягових двигунів шахтних контактних електровозів з широтно-імпульсним регулюванням підтверджує необхідність знаходження більш оптимальних рішень.

Результати (Results)

При широтно-імпульсному методі регулювання дводвигунного приводу шахтного електровозу можливе застосування як паралельного так і роздільного з'єднання тягових двигунів. Визначальним фактором під час вибору схеми з'єднання тягових двигунів є зниження рівня пульсацій струму і, відповідно, втрат потужності в контактній мережі та забезпечення надійної роботи електроприводу шахтного електровозу.

Під час вибору раціональної схеми з'єднання тягових двигунів шахтних електровозів необхідно враховувати, що роздільне живлення тягових двигунів від двох ШПП дає можливість зсунути силові імпульси струму одного з двох ШПП відносно іншого на певну

частину періоду робочої частоти. На рис.1 наведені діаграми зміни струму в контактній мережі під час широтно-імпульсного регулювання дводвигунного приводу шахтного електровозу К-14У (двигуни постійного струму послідовного збудження ДНТ-46/33М) для ряду значень скважності при паралельному з'єднанні та роздільному живленні тягових двигунів. При цьому для роздільного живлення двигунів силові імпульси струму зсунуті на половину періоду робочої частоти.

Значення струмів при прийнятому для обох випадків прямокутної форми імпульсів струму визначаються (виключаючи випадок для $\gamma = 0,5$ та $\gamma = 0,75$ рис.1б) наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} i_1(t) = 2I_{II} n \pi \gamma & 0 < t < \gamma T \\ i_2(t) = 0 & n \pi \gamma T < t < T \end{cases} \quad (1)$$

Гармонійні складові струму знаходяться розкладенням заданих рівнянь (1) кривих струму у тригонометричний ряд Фур'є (Korn H., Korn T., 1974.). Розкладання у ряд Фур'є може бути виконано з використанням функції Уолша (Liang T., O'Connell R.M., Holt R.G. 1997). Отримані коефіцієнти ряду Фур'є визначаються виразами:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\gamma T} i_1(t) dt + \int_{\gamma T}^T i_2(t) dt \right] = \frac{2}{T} \int_0^{\gamma T} I_{II} dt = 2I_{II} \gamma; \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \left[\int_0^{\gamma T} i_1(t) \cos(n\omega_1 t) dt + \int_{\gamma T}^T i_2(t) \cos(n\omega_1 t) dt \right] = \frac{2I_{II}}{\pi n} \sin n \omega_1 \gamma T = \frac{2I_{II}}{\pi n} \sin n 2\pi \gamma; \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \left[\int_0^{\gamma T} i_1(t) \sin(n\omega_1 t) dt + \int_{\gamma T}^T i_2(t) \sin(n\omega_1 t) dt \right] = \frac{2I_{II}}{\pi n} [1 - \cos n \omega_1 \gamma T] = \frac{2I_{II}}{\pi n} [1 - \cos 2\pi \gamma] \quad (4)$$

Амплітуда n-ї гармонійної складової струму

$$I_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}. \quad (5)$$

Після підстановки коефіцієнтів a_n та b_n у (5) і відповідних перетворень остаточно отримаємо

$$I_{nm} = \frac{2I_{II}}{\pi n} \sin(n\pi\gamma). \quad (6)$$

Функціональний вираз для струму під час роздільного живлення двигунів (рис.1б) та $\gamma < 0,5$ аналогічний наведеному вище, однак слід враховувати, що амплітуда струму і період

його повторення зменшуються вдвічі і складуть відповідно I_{II} та $T/2$. Амплітуда n -ї гармонійної складової струму у цьому випадку визначається виразом

$$I_{nm} = \frac{I_{II}}{\pi n} \sin(2n\pi\gamma) \quad (7)$$

Під час роздільного живлення двигунів та $\gamma = 0,5$ (рис.1б) в контактній мережі відсутня змінна складова струму, а у випадку $\gamma > 0,5$ можна скористатися попередніми виразами. Дійсно, якщо вісь абсцис кривої струму підняти на величину, рівну I_{II} (рис.1б, $\gamma = 0,75$), то при цьому криві струму, що отримуємо, за характером зміни відповідають ряду попередніх. Очевидно, що в цьому випадку період повторення складає $T/2$ при скважності $\gamma = 2t_i/T$, а амплітуда гармонійних складових визначається виразом (7).

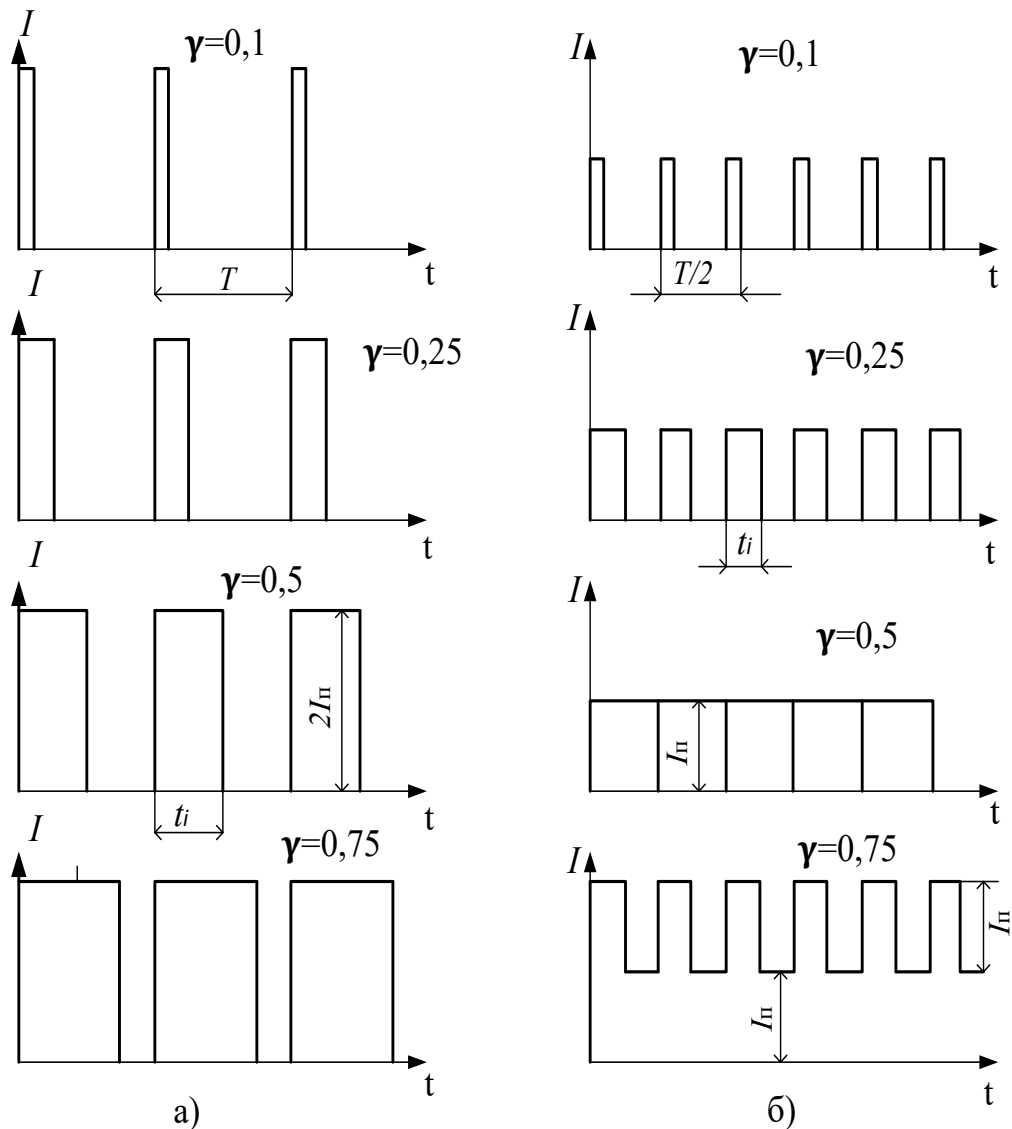


Рисунок 1. Діаграми зміни струму в контактній мережі: а) під час паралельного з'єднання двигунів електровозу; б) під час їх роздільного живлення.

На рис. 2 наведені значення амплітуд першої, другої та третьої гармонійних складових струму в залежності від скважності для паралельного з'єднання двигунів та у разі їх роздільного живлення. При цьому гармонійними складовими струму вище третього порядку можна нехтувати через їх незначні величини.

Максимальне значення амплітуд гармонійних складових струму в контактній мережі у разі роздільного живлення двигунів у два рази менше у порівнянні з максимальними значеннями їх амплітуд при паралельному з'єднанні двигунів за умови зсуву силових імпульсів струму одного з двох ШПІ відносно іншого на половину періоду робочої частоти.

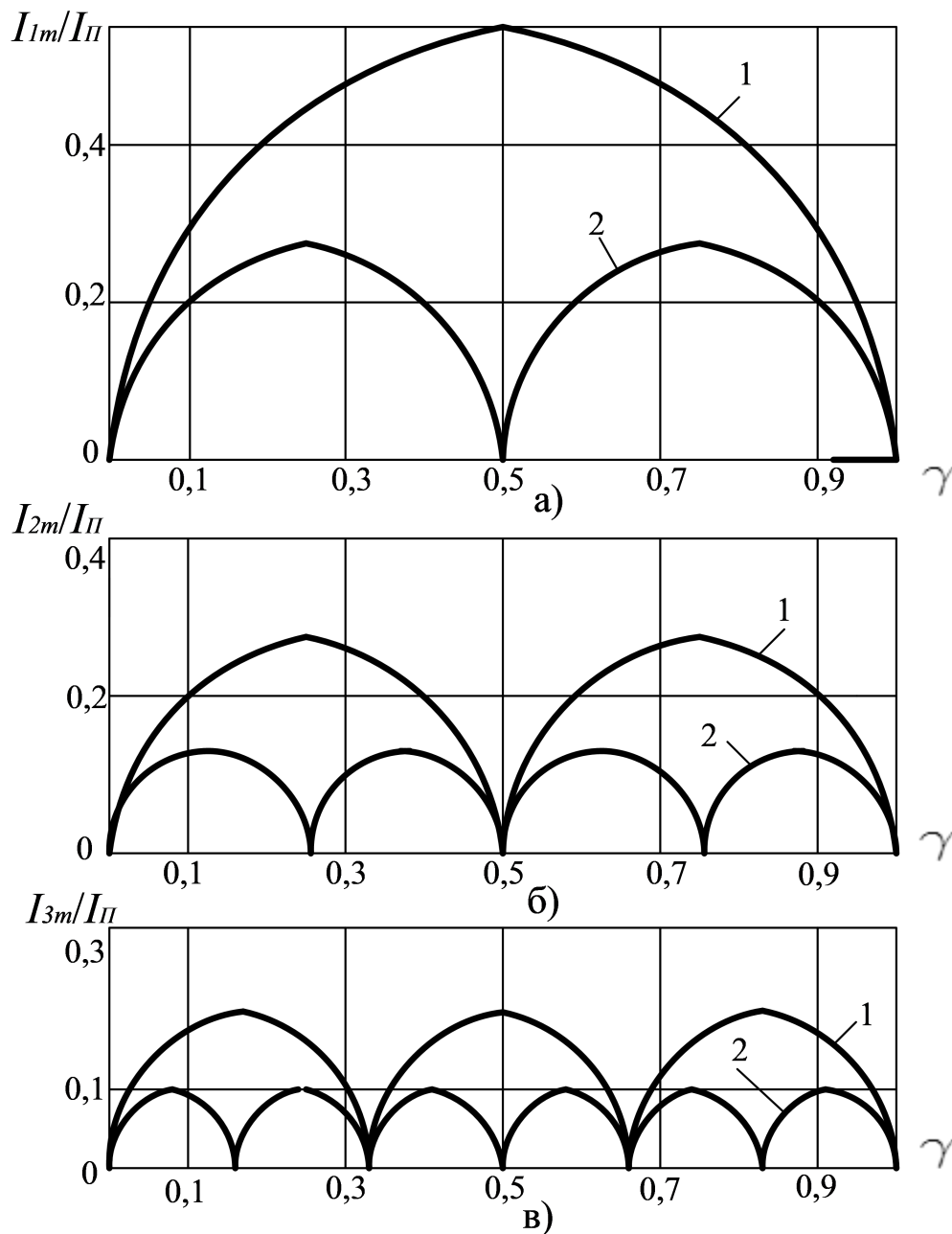


Рисунок 2. Амплітуди гармонійних складових струму в контактній мережі (під час роботи одного електровозу):

а,б,в – перша, друга та третя гармонійні складові відповідно; 1 – паралельне з'єднання двигунів; 2 – роздільне їх живлення.

Під час роздільного живлення двигунів відбувається суттєве зниження додаткових втрат потужності, характерних, в основному, для пускових струмів при широтно – імпульсному регулюванні. У разі паралельного з'єднання двигунів втрати в контактній мережі під час пуску електровозу в початковий період його рушання ($\gamma = 0,1 \dots 0,2$) приблизно у 2 рази перевищують втрати потужності у порівнянні з випрямленим постійним струмом і при протяжних контактних мережах можуть привести до необхідності застосування контактного проводу більшого перетину.

Крім того, при обґрунтуванні раціональної схеми з'єднання тягових двигунів необхідно враховувати можливість зниження рівня пульсацій результуючого тягового зусилля, які викликані пульсаціями струму під час широтно-імпульсного регулювання. При паралельній роботі двигунів під час провідного інтервалу ШПП відбувається підсумовування пульсацій обох двигунів електровозу і пульсація результуючого тягового зусилля зростає фактично в двічі.

Під час роздільного живлення двигунів зі зсувом силових імпульсів струму одного з двох ШПП відносно іншого на половину періоду робочої частоти пульсація результуючого тягового зусилля визначається як різниця пульсацій струмів окремих двигунів. Зокрема, в області максимальної пульсації кожного з двигунів ($\gamma = 0,5$) пульсація результуючого тягового зусилля при однакових параметрах двигунів з урахуванням інерції електровозу теоретично може бути відсутня взагалі.

Стосовно специфіки шахтних умов, що характеризується відносно низьким рівнем ізоляції електричних машин та електрообладнання в цілому, схема роздільного живлення двигунів при повної автономності системи широтно – імпульсний перетворювач – тяговий двигун та відсутності електричного зв'язку між двигуном і перетворювачем забезпечує значно більшу надійність роботи електровозу.

Як впливає з викладеного, роздільне живлення двигунів шахтних контактних електровозів дозволяє значно зменшити втрати потужності в контактній мережі, знизити пульсації струму при зниженні пульсацій результуючого тягового зусилля електровозу та підвищити надійність його роботи.

Однак, залишається наступне питання: якою повинна бути оптимальна робоча частота ШПП з точки зору мінімізації як пульсацій струму тягових двигунів електровозу так і комутаційних втрат в перетворювачі.

Відомі аналітичні дослідження оптимальної частоти ШПП (*Sinchuk O.M., et al, 2006*) проводились для приводу акумуляторного електровоза АМ8Д, який є основним для вугільних шахт (більше 80% від загального парку локомотивів) і має два двигуни потужністю 14 кВт кожний.

В залізничних шахтах на теперішній час основним є контактний електровоз типу К-14У, який має два двигуни постійного струму послідовного збудження потужністю 46 кВт кожний. Аналітичні дослідження оптимальної частоти ШПП для приводу електровозу К-14У здійснювались за методикою (*Sinchuk O.M., et al, 2006*).

Спрощена схема силового кола електропривода з імпульсним перетворювачем наведена на рисунку 3.

Живлення контактної мережі зображене ЕРС E_G . Двигун зображений ЕРС E_M , опором $R = R_M + R_U$ і індуктивністю $L = L_M + L_U$ якоря та обмотки збудження відповідно. Імпульсний перетворювач представлений ідеальним ключем VT (IGBT – модуль) і ідеальним нульовим діодом V_0 , час вмикання та вимикання яких, а також їх внутрішній опір дорівнює нулю.

Після вмикання VT на інтервалі його провідності під дією різниці ЕРС ($E_G - E_M$) у силовому колі тече струм i_a , який визначається сумарним опором R та сумарною індуктивністю L . Після вимкнення VT струм двигуна i_0 тече через нульовий діод V_0 .

Розрахункові схеми на інтервалах провідності VT і V₀ наведені на рисунку 4.

Вихідні рівняння перехідних процесів миттєвих значень струмів контактної мережі i_{α} (ключа) VT та нульового діода i_0 V₀:

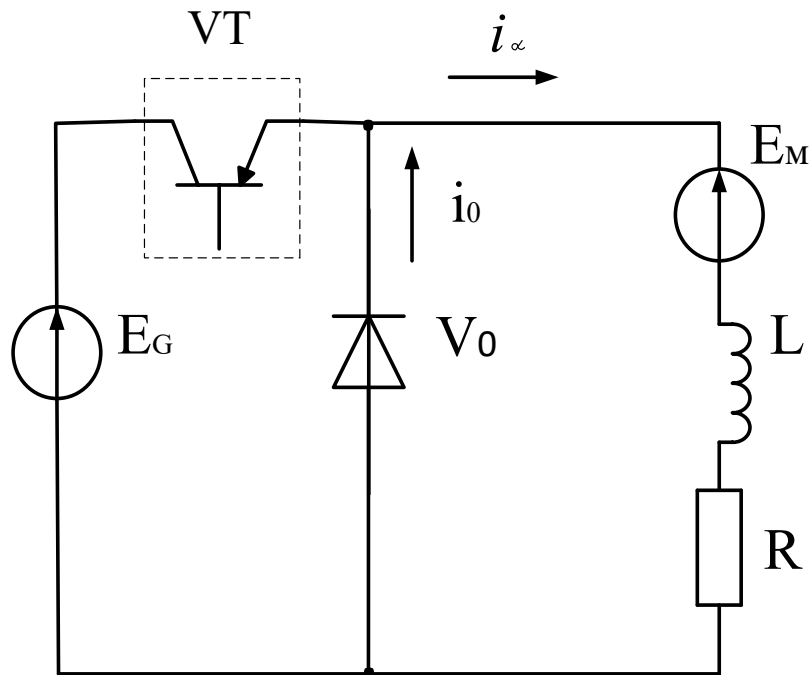


Рисунок 3. Спрощена схема силового кола електропривода електровозу К-14У з ШП

$$\begin{cases} i_{\alpha} = \frac{E_G - E_M}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + i \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)_{min} \\ i_0 = -\frac{E_M}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + i \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)_{max} \end{cases} \quad (8)$$

де: τ – постійна часу навантаження ($\tau = L/R$), с;

i_{min} , i_{max} – відповідно максимальне і мінімальне миттєві значення струму навантаження.

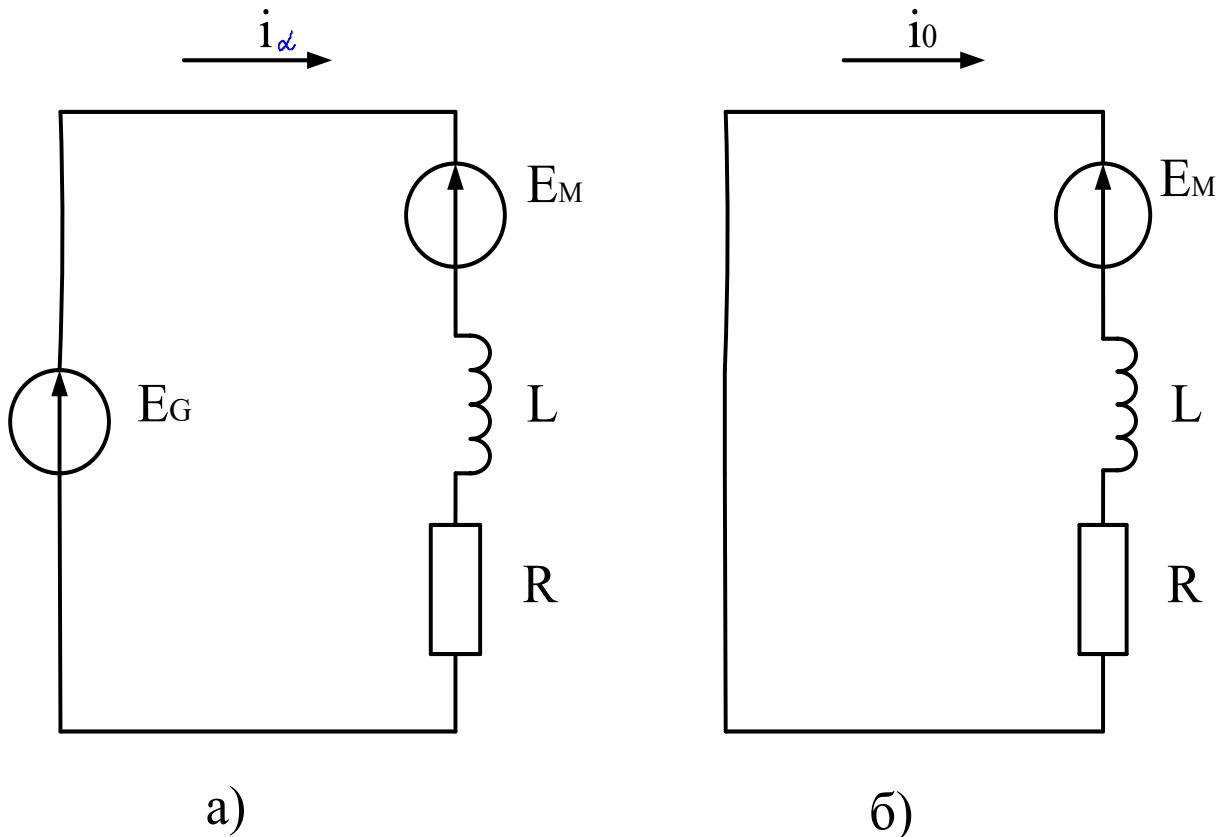


Рисунок 4. Розрахункові схеми на інтервалах t_α (а) і t_0 (б)

Граничні умови:

$$i_\alpha(t = t_\alpha)_{max} \quad i_0(t = t_0)_{min} \quad (9)$$

де: t_α – інтервал провідності ключа VT ($t_\alpha = qT$), с;
 t_0 – інтервал провідності нульового діода V_0 , $t_0 = (1 - q)T$, с.
 У свою чергу:
 q – скважність імпульсів провідності ключа VT;
 T – період ШПП, с.

Використовуюючи граничні умови (9), знаходимо:

$$i \frac{E_G}{R} \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_\alpha}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)} \frac{E_M}{R} \quad (10)$$

max

$$i \frac{E_G}{R} \frac{\exp\left(-\frac{t_0}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)} \frac{E_M}{R} \quad (11)$$

min

$$\Delta i = i \frac{E_G}{R} \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_\alpha}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t_0}{\tau}\right) + \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)} \min_{max} \quad (12)$$

Для електровозу К-14У при частоті ШПІ 300 Гц показники ступеню всіх експонент у виразі (12) менше за 0,08:

$$\frac{t_\alpha}{\tau} < 0,08; \quad \frac{t_0}{\tau} < 0,08; \quad \frac{T}{\tau} < 0,08,$$

тому цей вираз можна спростити за допомогою наближення $\exp(-x) \approx 1 - 0,9443x + 0,2734x^2$, яке дає найбільшу абсолютну похибку:

$$\Delta = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ при } 0 \leq x \leq \ln 2, 2.$$

Користуючись вище наведеним наближенням, вираз (11) прийме наступний вигляд

$$\Delta i = \frac{E_G}{R} \cdot \frac{T}{\tau} \cdot \frac{2q(1-q)}{2,435 - \frac{T}{\tau}} \quad (13)$$

Прийmemo коефіцієнт пульсацій струму тягового двигуна $K_i = 0,1$, тобто 10 %, тоді як прийнятий на сьогодні коефіцієнт пульсацій для шахтних електровозів складає 20%.

Коефіцієнт пульсацій струму двигуна:

$$k_i = \frac{\Delta i}{2I_M} = \frac{1}{q_0} \cdot \frac{T}{\tau} \cdot \frac{q(1-q)}{2,435 - \frac{T}{\tau}} \quad (14)$$

где $q_0 = \frac{RI_{Mmax}}{E_G}$ - скважність імпульсів провідності під час пуску електровозу.

З виразу (14) знаходимо

$$T = \frac{2,435q_0k_i\tau}{q_0k_i + q(1-q)} \quad (15)$$

Звідси визначаємо аналітичну залежність частоти ШПІ від параметрів тягового кола і від допустимої пульсації струму двигуна:

$$f = \frac{1}{T} = 0,411 \frac{q_0k_i + q(1-q)}{q_0k_i\tau} \quad (16)$$

Аналізуючи вираз (16), отримаємо частоту ШПІ електроприводу електровоза К-14У 278 Гц. Подальшому приймаємо $f_M = 300$ Гц в тяговому режимі.

Результати досліджень наведені у таблиці 1 та графічно представлені на рисунку 5.

Таблиця 1. Залежність коефіцієнта пульсацій струму k_i тягового двигуна від скважності ШПІ при $f = 100, 200$ і 300 Гц в тяговому режимі

Режим	Значення	Частота ШПІ, f [Гц]
-------	----------	-----------------------

	скважності q	100	200	300
Послідовне з'єднання двигунів	0,3	0,0407	0,0312	0,0275
	0,4	0,0683	0,0524	0,0411
	0,5	0,0721	0,0543	0,0439
	0,7	0,0621	0,0437	0,0363
	0,9	0,0324	0,0237	0,0174

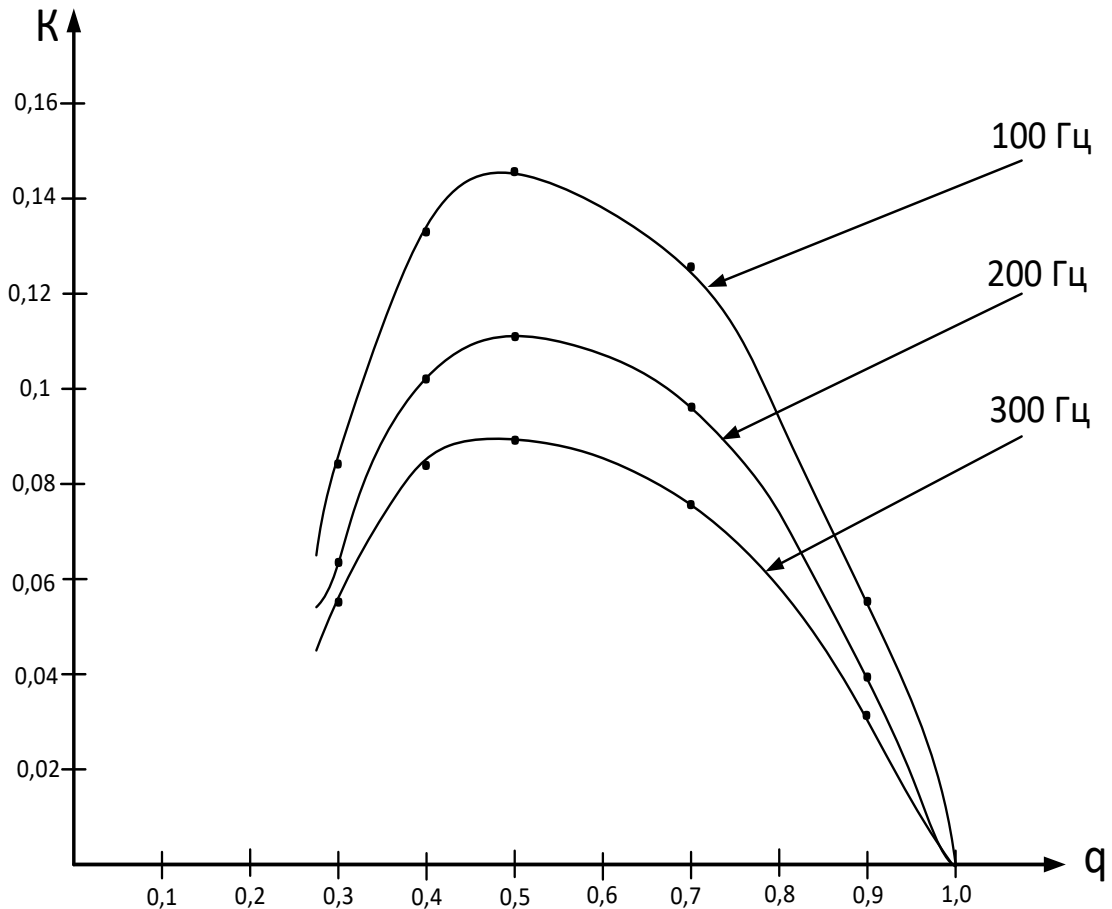


Рисунок 5. Залежність коефіцієнта пульсацій струму тягового двигуна від скважності при частотах ШП $f = 100, 200$ і 300 Гц в тяговому режимі

Як слідує з таблиці 1 та рисунку 5, максимальне значення пульсацій тягового струму має місце при скважності 0,5 і при частоті ШП 300 Гц не перевищує заданих 10%, а з урахуванням роздільного з'єднання тягових двигунів зі здвигом у часі в роботі перетворювачів на половину періоду їх робочої частоти пульсації тягового струму на вказаній частоті не перевищать 5%, що, в свою чергу, гарантує надійну роботу колектора тягових двигунів.

Висновки (Conclusions)

Доведено, що раціональною схемою з'єднання тягових двигунів дводвигунного приводу шахтного контактної електровозу є схема з їх роздільним живленням за системою широтно-імпульсний перетворювач – тяговий двигун зі зсувом за часом у роботі широтно-імпульсних перетворювачів на половину періоду робочої частоти. Таке рішення дозволяє уникнути застосування реакторів у якірному колі тягових двигунів з метою зниження пульсацій струму. Визначена оптимальна робоча частота ШПІ для електровозу К-14У з точки зору мінімізації як пульсацій струму його тягових двигунів так і комутаційних втрат в перетворювачі. Подальші дослідження доцільно направити на підвищення надійності запропонованого методу зниження пульсацій струму тягових двигунів шляхом досягнення повної автономності системи широтно-імпульсний перетворювач – тяговий двигун та відсутності електричного зв'язку між двигуном і перетворювачем, що підвищить надійність роботи системи в цілому. та і підвищення частоти широтно-імпульсного перетворювача.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування

Внесок авторів (Authors contribution)

А. П., Є. М. - аналітичні дані та аналіз. В. Ш., М. Ж. , Р. Ш. – дослідження. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- A V Agunov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2131 042094
- Debilyi V.L. Suchasni pidkholdy do modernizatsii shakhtnoho transportu // Vuhillia Ukrainy. - 2002. - №12. - S.17-18.
- IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems; IEEE Std. 519-2014 (Revision of IEEE Std. 519-1992); IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2014; pp. 1–29.
- Liang T., O'Connel R.M., Holt R.G. Inverter harmonic reduction using Walsh function harmonik eliminatson method //IEEE Transaction on power electronics, November. – 1997. – Vol.12, № 5. – P.862-866.
- Korn H., Korn T. Dovidnyk z matematyky dlia naukovtsiv ta inzheneriv (vyznachennia, teoremy, formuly). Prov. z 2-ho amerykanskooho vyd. Za red. Avramanovycha I.H. - M.6 Nauka, hol. red. FML, 1974. - 832 s.
- Pasko O.V. Kombinatoryka skhem tiahovoho elektropryvodu zminnoho strumu // Vestn.Nats. tekhn. un-tu «KhPI». Ser. Elektrotekhnika, elektronika ta elektropryvod, - 2004. - Vyp.43. - S. 121-125.
- Pasko O.V. Do pytannia maksymilizatsii diapazonu rehuliuвання ShIM napruhy ta invertora tiahovoho elektropryvodu // Tekhn. elektrodynamika. Temat. vip. "Sylova elektronika i elektrodynamika". - 2004. - Ch.1. - S.87-90.

- Zakharchenko D. D., Rotanov N. A. Tiahovi elektrychni mashyny. Pidruchnyk dlia vuziv zh.-d. transp. - M.: Transport, 1991. - 343 s.
- Sinchuk O.M., Yurchenko N.M., Chernyshov A.A., Sinchuk I.O., Udovenko O.O., Pasko O.V., Huzov E.S. Kombinatoryka peretvoriuvachiv napruhy suchasnykh tiahovykh elektroprivodiv shakhtnykh elektrovoziv; pid. red.. O.M. Synchuk. - K.: IEDNANU, 2006. - 250 s.
- Sinchuk O.M., Chumak V.V., Yerzhov O.V. Impulsni systemy upravlinnia ta zakhystu na rudnychnomu elektrovoznomu transporti. - K.: ADEF-Ukraina, 1988. - 280s.