

УДК 621.333:621.311

В. М. КОВАЛЬОВ^{1*}, Ю. В. КОВАЛЬОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматизовані електромеханічні системи», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (066) 222 05 58, ел. пошта kovalov1952@gmail.com, ORCID 0000-0001-5817-8790

^{2*}Каф. «Системи електропостачання та електроспоживання міст», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (066) 939 33 02, ел. пошта kovalova.jv@gmail.com, ORCID 0000-0002-2931-9176

Підвищення енергоефективності тягових електроприводів постійного струму

Мета. Робота спрямована на підвищення енергоефективності тягових електроприводів постійного струму електричного транспорту за рахунок упровадження транзисторних широтно-імпульсних перетворювачів (ШПП) з оптимальною частотою комутації для мінімізації загальних електричних втрат в електроприводі. Електричні втрати тягових електроприводів складаються з електричних втрат в обмотці якоря і в транзисторах ШПП. **Методика.** Для дослідження залежності від частоти комутації транзисторів електричні втрати в обмотці якоря і транзисторах ШПП розкладають на дві частини: статичні втрати від постійної складової струму і динамічні втрати, тобто втрати в обмотці якоря від гармонічних складових струму та втрати в транзисторах від перехідних струмів комутації. Оскільки динамічні електричні втрати в транзисторах у разі зростання частоти збільшуються, а в обмотці якоря зменшуються, то необхідно знайти оптимальну частоту комутації ШПП, за якої загальні динамічні втрати в тяговому електроприводі будуть мінімальними. Поставлена мета підвищення енергоефективності в тяговому електроприводі досягається визначенням залежності динамічних електричних втрат в обмотці якоря від частоти комутації ШПП та комп'ютерним моделюванням транзисторного електропривода. **Результати.** З'ясовано, що відносні динамічні електричні втрати в обмотці якоря в разі полігармонічного живлення дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму якоря. Розроблено алгоритм визначення оптимальної частоти комутації ШПП: 1) на комп'ютерних моделях двигуна і ШПП експериментально визначають залежності динамічних електричних втрат від частоти комутації транзисторів; 2) на графіку залежності загальних динамічних електричних втрат транзисторного електропривода від частоти визначають точку мінімуму втрат, якій відповідає оптимальне значення частоти. **Наукова новизна.** Автори вперше отримали аналітичний вираз відносних динамічних електричних втрат в обмотках якоря, які дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму якоря. **Практична значимість.** Встановлення оптимальної частоти комутації ШПП за розробленою методикою забезпечує зменшення електричних втрат у тягових електроприводах, тобто підвищує їх енергоефективність.

Ключові слова: широтно-імпульсний перетворювач (ШПП); частота комутації транзисторів; електричні втрати; коефіцієнт пульсацій струму; комп'ютерне моделювання

Вступ

В Україні до цього часу експлуатують велику кількість рухомого складу електричного транспорту (міські трамваї і тролейбуси, метрополітен, приміські електропоїзди, рудникові акумуляторні електровози, складські вантажопідйомні механізми тощо) з двигунами постійного струму (ДПС) послідовного збудження з реостатним керуванням.

Під час їх капітального ремонту доцільно проводити модернізацію для підвищення енергоефективності шляхом заміни реостатних релейно-контакторних систем керування системами керування з широтно-імпульсними пере-

творювачами (ШПП). Подальше підвищення загальної енергоефективності таких електроприводів можливе за рахунок вибору оптимальної частоти комутації транзисторів, за якої сума електричних втрат у транзисторах і в обмотках якоря буде мінімальною.

Таким чином, визначення оптимальної частоти комутації транзисторів ШПП є актуальним і практично доцільним.

Мета

Основна мета статті полягає в розробці методики розрахунку частоти комутації широтно-імпульсного перетворювача для зменшення дина-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

мічних електричних втрат у тяговому транзисторному електроприводі постійного струму. Предмет дослідження – залежність електричних втрат в обмотках якоря від коефіцієнта пульсацій струму.

Методика

Напряга живлення ДПС в разі широтно-імпульсного керування має прямокутну форму і розкладається в ряд Фур'є, тому далі використовуємо поняття «полігармонічне живлення».

Електроенергія за полігармонічного живлення втрачається в напівпровідникових структурах транзисторних модулів та в омичному опорі обмоток якоря. Загальні електричні втрати в транзисторах і в обмотках якоря представляємо у вигляді статичних втрат від постійної складової струму та динамічних втрат в обмотках якоря від гармонік струму, а в транзисторах – від перехідних процесів у разі їх комутації.

Аналіз залежності електричних втрат у транзисторних модулях за умови змінної частоти комутації розглянуто у [2, 11, 12], де їх поділено на електричні втрати в структурах транзисторів та на втрати потужності в структурах зворотних діодів, тобто:

$$\Delta P_{\text{mod}} = \Delta P_{VT} + \Delta P_{VD}, \quad (1)$$

де ΔP_{mod} – загальні електричні втрати в силових транзисторних модулях; ΔP_{VT} – електричні втрати в самих транзисторах; ΔP_{VD} – електричні втрати у зворотних діодах.

Спрощені графіки процесу комутації струму та напруги в силових транзисторах показано на рис. 1.

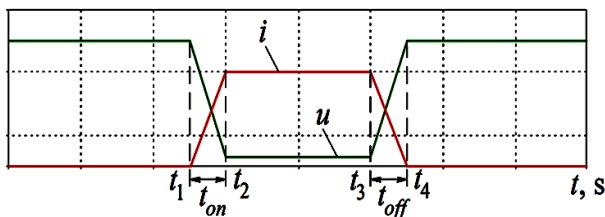


Рис. 1. Перехідні процеси струму та напруги в разі комутації транзисторів

Fig. 1. Transient processes of current and voltage during switching of transistors

При цьому електричні втрати транзистора поділяємо на статичні втрати в інтервалі провідності та на динамічні електричні втрати під час вмикання та вимикання транзистора, тобто:

$$\Delta P_{VT} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{дт}}, \quad (2)$$

де ΔP_{VT} – загальні електричні втрати транзисторах; $\Delta P_{\text{ст}}$ – статичні електричні втрати в інтервалі провідності транзистора; $\Delta P_{\text{дт}}$ – електричні втрати в динамічних режимах комутації.

Статичні електричні втрати в транзисторах в інтервалі їх провідності практично не залежать від частоти комутації, їх визначають як інтеграл добутку миттєвих напруги та струму колектора з виразу:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \int_{t_2}^{t_3} (i_k \cdot u_k) dt, \quad (3)$$

де i_k, u_k – миттєві струм та напруга колектора; t_2, t_3 – інтервали провідності транзистора згідно з рис. 1.

У першому наближенні статичні електричні втрати в транзисторах визначають за формулою:

$$\Delta P_{\text{ст}} = I_0^2 R_T, \quad (4)$$

де I_0, R_T – постійна складова струму і прямий опір транзистора в режимі провідності.

Динамічні електричні втрати визначають інтегруванням добутків струму й напруги на інтервалах вмикання та вимикання транзистора:

$$\Delta P_{VT} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{\text{on}} \cdot u_{\text{on}}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (i_{\text{of}} \cdot u_{\text{of}}) dt, \quad (5)$$

де $u_{\text{on}}, i_{\text{on}}$ – миттєві значення напруги та струму колектора під час вмикання транзистора; t_{on} – інтервал часу вмикання транзистора (рис. 1); $i_{\text{of}}, u_{\text{of}}$ – миттєві значення напруги і струму колектора під час вимикання транзистора; t_{of} – інтервал вимикання транзистора (рис. 1).

Електричні статичні втрати у зворотних діодах визначають як інтеграл добутку миттєвих напруги та струму через діод:

$$\Delta P_{VD0} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{VD0} \cdot u_{VD0}) dt, \quad (6)$$

де i_{VD0}, u_{VD0} – миттєві струм та спад напруги зворотного діода; $t_2 - t_3$ – інтервали провідності зворотного діода.

Електричні динамічні втрати у зворотних діодах визначають за виразом:

$$\Delta P_{DD} = \int_{t_1}^{t_2} (i_{on} \cdot u_{on}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (i_{of} \cdot u_{of}) dt, \quad (7)$$

де u_{on}, i_{on} – миттєві значення напруги та струму діода під час вмикання; t_1, t_2 – інтервал часу вмикання діода; i_{of}, u_{of} – миттєві значення напруги та струму діода під час вимикання; t_3, t_4 – інтервал часу вимикання діода.

Розрахунок електричних втрат у силових транзисторах проводять за спеціалізованими програмами від підприємств-виробників силових транзисторів. У [2, 11, 12] з використанням спеціалізованого програмного забезпечення SemiSel від підприємства-виробника транзисторів проведено розрахунок статичних та динамічних електричних втрат для IGBT-транзистора типу SKM300GAR123D (виробництво компанії SEMIKRON: струм колектора 300 А, напруга 1 200 В, прямий опір колектор-емітер 4,7 мОм за 125 °С, напруга насичення 2,8 В).

За результатами розрахунків, отриманих у [2, 11, 12], апроксимовано графік відносних електричних динамічних втрат транзистора за формулою:

$$\Delta P_{дт}^* = \Delta P_{дт} / \Delta P_{ст} = K_{дт} \cdot f, \quad (8)$$

де $K_{дт}$ – коефіцієнт пропорційності, отриманий експериментально з графіка електричних динамічних втрат у транзисторі, $K_{дт} = 0,064$ Вт·Гц.

Проведемо аналіз публікацій щодо електричних втрат у ДПС за полігармонічного живлення. У [7] розглянуто модель для розрахунку електричних втрат у ДПС за полігармонічного живлення з урахуванням нелінійності кривої намагнічування сталі магнітопроводу якоря. Аналогічну модель запропоновано в [5] для транзисторного електропривода тролейбуса з двигунами змішаного збудження. У [14, 16] змодельовано магнітні втрати від вищих гармонік під час полігармонічного живлення. У [9] розглянуто теплову карту нагрівання обмоток тягових електродвигунів за полігармонічного живлення. У [5]

проаналізовано електричні втрати за полігармонічного живлення та змінної частоти комутації і змінної ширини імпульсів транзисторного перетворювача. У [8] запропоновано вдосконалену модель електричних втрат тягового двигуна електровоза. У [13, 15] досліджено залежність коефіцієнта пульсацій напруги від ширини імпульсів живлення обмотки якоря. У [6] проведено аналіз провалів крутного моменту ДПС з постійними магнітами через неідеальність їх характеристик. У [1] запропоновано методику визначення оптимальної частоти комутації ШПП за допомогою виразів тривалостей наростання і спаду струму, які унеможливають її практичне використання, оскільки визначити час наростання і спаду фронтів струму в колі з індуктивністю аналітично неможливо.

З аналізу вищенаведеної літератури можна зробити такі висновки: 1) в основному розглядають лише моделювання втрат; 2) практичної методики визначення оптимальної частоти комутації транзисторів із метою зменшення електричних втрат не запропоновано. Таким чином, тема статті є актуальною.

Результати

Споживана потужність перетворюється в механічну на валу двигуна і на механічні, магнітні та електричні втрати. Пульсівна напруга живлення обмотки якоря не впливає на механічні втрати. У разі пульсівних струмів обмотки якоря розрахунок магнітних втрат виконують за спрощеною формулою без їх розподілу на вихрові струми та на перемагнічування [4]:

$$P_{ст.v} = B_v^2 f_v^\beta, \quad (9)$$

де $P_{ст.v}$ – потужність магнітних втрат у сталі від дії v -ї гармоніки струму; B_v – v -а гармоніка магнітної індукції, яка зменшується зі зростанням частоти, f_v – частота v -ї гармоніки; $\beta = 1,3-1,5$ – показник ступеня для заданої марки електротехнічної сталі залежно від співвідношення втрат на вихрові струми та перемагнічування на частоті 50 Гц.

Потужність сумарних магнітних втрат визначають шляхом додавання втрат від дії кожної гармоніки.

Не враховуємо вплив на нагрівання обмотки якоря нагрівання сталі осердя якоря від магніт-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

них втрат, спричинених гармоніками магнітного потоку.

Для аналізу електричних втрат у ДПС за пульсівної напруги живлення обмотки якоря від ШПП беремо узагальнений параметр, який впливає на електричні динамічні втрати і не залежать від потужності ДПС. Як узагальнений параметр виступає коефіцієнт пульсацій струму, який має три визначення за міжнародним стандартом ІЕК–60050–161 Міжнародної електротехнічної комісії. Для дослідження впливу пульсацій струму на динамічні електричні втрати використовуємо таке визначення: коефіцієнт пульсацій струму дорівнює відношенню суми діючих значень гармонік струму $\sqrt{\sum I_k^2}$ до постійної складової, тобто:

$$K_{\text{пс}} = \sqrt{\sum I_k^2} / I_0. \quad (10)$$

У разі полігармонічного живлення струм обмотки якоря визначають за формулою:

$$I_{\text{я}} = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2}. \quad (11)$$

Виразимо діюче значення струму якоря через коефіцієнт пульсацій струму:

$$I_{\text{я}} = I_0 \sqrt{1 + K_{\text{пс}}^2}. \quad (12)$$

При цьому електричні втрати в ДПС розкладаємо на статичні від постійної складової струму та динамічні від гармонік струму, тобто:

$$\Delta P_{\text{я}} = \Delta P_{\text{ста}} + \Delta P_{\text{дин}} = I_0^2 R_{\text{я}} + \Delta P_{\text{дин}}. \quad (13)$$

Виразимо повні електричні втрати (13) у ДПС в разі живлення від ШПП відносно статичних втрат від постійної складової струму:

$$\Delta P_{\text{я}}^* = \frac{I_0^2 (1 + K_{\text{пс}}^2) R_{\text{я}}}{I_0^2 R_{\text{я}}} = 1 + K_{\text{пс}}^2. \quad (14)$$

Із виразу (14) видно, що відносні загальні електричні втрати зростають на величину відносних динамічних втрат, які чисельно дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму. Тоді в іменованих одиницях динамічні електричні втрати від гармонік струму визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{дин}} = K_{\text{пс}}^2 \Delta P_{\text{ста}}. \quad (15)$$

Коефіцієнт пульсацій струму в загальному випадку залежить від частоти f комутації транзисторів ШПП, від моменту навантаження на валу (постійна складова струму), від індуктивності кола якоря (електромагнітна стала) та від коефіцієнта заповнення імпульсу $\gamma = t_i/T$, де t – тривалість імпульсу, T – період комутації транзисторів.

У процесі експлуатації електропривода постійна (середня) складова струму і коефіцієнт відносної тривалості імпульсу змінюються випадковим чином. Беремо їх значення для подальшого розрахунку чисельно рівними середньостатистичним значенням: відносний струм навантаження $I/I_n = 0,6$, де I_n – номінальний струм. Коефіцієнт відносної тривалості імпульсу $\gamma = t_i/T = 0,5$.

Вищенаведений аналіз показує, що електричні динамічні втрати в ШПП збільшуються зі зростанням частоти, а в обмотці якоря зменшуються. Таким чином, повинно бути оптимальне значення частоти, за якої сумарні динамічні електричні втрати в транзисторному електроприводі будуть мінімальними.

Виходячи з вищевикладеного, складемо алгоритм розрахунку оптимальної частоти комутації транзисторів, яка забезпечує мінімізацію сумарних динамічних електричних втрат:

1) складають комп'ютерні моделі двигуна постійного струму і транзистора та шляхом комп'ютерного експерименту визначають залежності динамічних електричних втрат від частоти комутації;

2) за отриманими даними будують результативний графік залежності загальних динамічних електричних втрат транзисторного електропривода від частоти;

3) на результативному графіку визначають точку мінімуму втрат та відповідне їм оптимальне значення частоти комутації.

Використаємо як приклад запропоновану методику та визначимо оптимальну частоту комутації ШПП для електропривода трамвая з тяговим двигуном послідовного збудження типу ДК–261А: потужність $P = 60$ кВт; напруга обмотки якоря $U = 550$ В; частота обертання $n = 1\,460$ об/хв; номінальний струм якоря $I = 250$ А; омичний опір обмотки якоря $0,0316$ Ом, обмотки послідовного збудження $0,033$ Ом, обмотки додаткових полюсів

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$R_{я} = 0,014$ Ом; загальна індуктивність кола якоря $L_{я} = 1,17$ мГн. Складемо модель транзисторного електропривода (рис. 2) в програмному пакеті Simulink [8], щоб отримати залежності коефіціє-

нта пульсацій струму від частоти для подальшого розрахунку динамічних електричних втрат в обмотці якоря двигуна постійного струму.

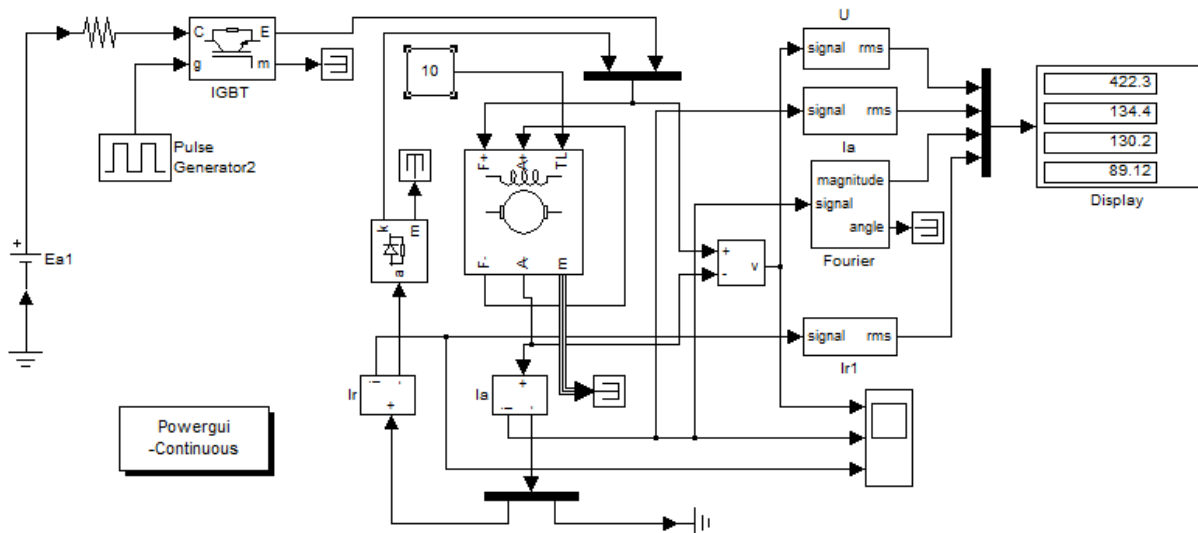


Рис. 2. Модель тягового електропривода трамвая для визначення коефіцієнта пульсацій струму

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

Комп'ютерний експеримент проведено таким чином. У діапазоні частот комутації ШПП від 100 до 1 100 Гц вимірювали діючі значення струму $I_{я}$ та їх постійні складові I_0 . Коефіцієнт пульсацій струму визначаємо за формулою:

$$K_{\text{пс}} = \sqrt{I_{я}^2 - I_0^2} / I_{я}. \quad (16)$$

У результаті комп'ютерного експерименту для відносного струму навантаження 0,6 від номінального і для коефіцієнта заповнення імпульсу $\gamma = 0,5$ отримано графіки залежностей коефіцієнта пульсацій струму якоря від частоти, які мають практично лінійний характер.

Статичні і динамічні втрати в транзисторі отримано в [3] в результаті розрахунків за спеціальною програмою Semisel, розробленою підприємством-виробником, і програмою в пакеті MatLab. Експериментальні значення електричних втрат отримано для постійної складової струму 100 А і для частоти 5 кГц. Використовуючи результати моделювання, побудуємо графіки залежностей динамічних втрат у транзисторі та в ДПС, які показано на рис. 3.

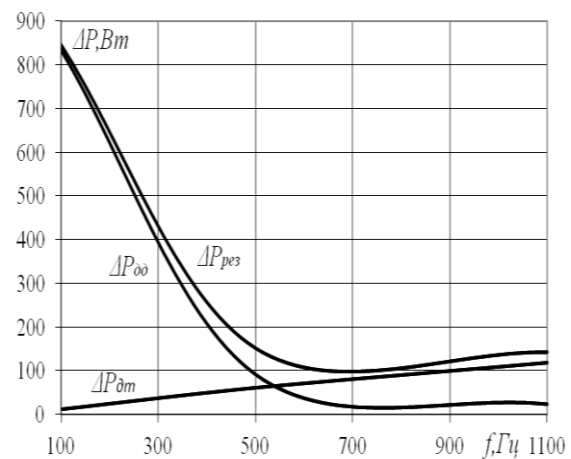


Рис. 3. Графіки залежності динамічних електричних втрат від частоти

Fig. 3. Graphs of dynamic electrical losses versus frequency

Із графіка на рис. 3 випливає, що сумарні електричні втрати потужності в транзисторному електроприводі є мінімальними за частоти 750 Гц.

Необхідно відзначити, що механічна потужність на валу двигуна також залежить від коефіцієнта пульсацій струму обмотки якоря, тобто чим більший коефіцієнт пульсацій струму, тим менша величина механічної потужності на валу двигуна. Це пояснюється тим, що гармоніки струму якоря створюють знакозмінний момент і не створюють крутного моменту на валу. 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

Автори вперше отримали аналітичний вираз для визначення відносних динамічних електричних втрат в обмотках якоря від гармонік струму, які дорівнюють квадрату коефіцієнта пульсацій струму якоря.

Визначення оптимальної частоти комутації ШІП за розробленою методикою забезпечує зменшення електричних втрат у тягових електроприводах, тобто підвищує їх енергоефективність.

Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано методику для визначення оптимальної частоти комутації транзисторів, за якої забезпе-

чується мінімізація загальних динамічних електричних втрат у транзисторному електроприводі постійного струму. Алгоритм розрахунку полягає в такому:

1) складають комп'ютерні моделі двигуна постійного струму та транзисторного широтно-імпульсного перетворювача, на яких визначають залежності динамічних електричних втрат від частоти комутації;

2) за отриманими даними моделювання будують графік залежності загальних динамічних електричних втрат транзисторного електропривода від частоти;

3) на графіку визначають точку мінімуму втрат та відповідне їм оптимальне значення частоти комутації.

У підсумку отримано аналітичний вираз для розрахунку відносних динамічних електричних втрат в обмотці якоря за пульсівної напруги живлення якоря, за яким втрати дорівнюють квадрату пульсацій струму якоря.

Використання результатів роботи дозволить суттєво підвищити енергоефективність електроприводу, який широко експлуатують в Україні.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глазєнко Т. О. *Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока*. Киев : Техника, 1973. 304 с.
2. Жемеров Г. Г., Ивахно В. В., Ковальчук О. И. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 4. С. 2129.
3. Островерхов М. Я., Пижов В. М. *Моделирование электромеханических систем в Simulink*. Киев : ВД «Стилос», 2008. 528 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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>

7. Goolak S., Riabov Ie., Tkachenko V., Sapronova Natsionalnoh S., Rubanik I. Model of pulsating current traction motor taking into consideration magnetic losses in steel. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 6. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.6.02>
8. 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, No. 5 (108). P. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
9. 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. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051472>
10. Kharchenko V., Kostenko I., Liubarskyi B., Shaïda 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). P. 46–54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205288>
11. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization frequency in frequency convertor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 1. P. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103>
12. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Khoruzhevskyi, H. A. (2020). Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 2. P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-82>
13. 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>
14. 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>
15. Xue L. L., Su G.-J., Ozpineci B. DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization Modulation Scheme for a High Power Density Converter. *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>
16. Yamazaki K., Noiaki F. Torque and Loss Calculation of Rotating Machines 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^{1*}, YU. V. KOVALOVA²

^{1*}Dep. «Automated Electromechanical Systems», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kirpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (066) 222 05 58, e-mail kovalov1952@gmail.com, ORCID 0000-0001-5817-8790

²Dep. «Electricity supply and consumption systems in cities», O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanov Str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (066) 939 33 02, e-mail kovalova.jv@gmail.com, ORCID 0000-0002-2931-9176

Increasing the Energy Efficiency of Traction Electric Drives of Direct Current

Purpose. The work is aimed at improving the energy efficiency of direct current traction electric drives of electric transport by introducing transistor pulse width converters (PWC) with an optimal switching frequency to minimize total electrical losses in the electric drive. The electrical losses of traction electric drives consist of electrical losses in the armature winding and in the PWC transistors. **Methodology.** To study the dependence on the switching frequency of transistors, the electrical losses in the armature winding and PWC transistors are divided into two parts: static losses from the direct current component of the current and dynamic losses, i.e., losses in the armature winding from harmonic current components and losses in the transistors from transient switching currents. Since the dynamic electrical losses in transistors increase with increasing frequency and decrease in the armature winding, it is necessary to find the optimal PWC co-mutation frequency at which the total dynamic losses in the traction electric drive will be minimal. The goal of increasing energy efficiency in a traction electric drive is achieved by determining the dependence of dynamic electrical losses in the armature winding on the switching frequency of the PWC and computer modeling

of the transistor electric drive. **Findings.** It is found that the relative dynamic electrical losses in the armature winding in the case of polyharmonic power supply are equal to the square of the armature current ripple coefficient. An algorithm for determining the optimal switching frequency of the PWC is developed: 1) the dependence of dynamic electrical losses on the switching frequency of transistors is determined experimentally on computer models of the motor and PWC; 2) the graph of the dependence of total dynamic electrical losses of the transistor electric drive on the time-to-the point of minimum losses, which corresponds to the optimal frequency value, is determined. **Originality.** For the first time, the authors obtained an analytical expression for the relative dynamic electrical losses in the armature windings, which are equal to the square of the armature current ripple factor. **Practical value.** Establishing the optimal switching frequency of the PWC according to the developed methodology reduces electrical losses in traction electric drives, i.e., increases their energy efficiency.

Keywords: pulse width converter (PWC); transistor switching frequency; electrical losses; current ripple coefficient; computer modeling

REFERENCES

1. Glazenko, T. O. (1973). *Poluprovodnikovye preobrazovateli v elektroprivodakh postoyannogo toka*. Kyiv: Tekhnika. (in Russian)
2. Zhemerov, G. G., Ivakhno, V. V., & Kovalchuk, O. I. (2011). Raschet moshchnosti poter i temperatury struktury tranzistorno-diodnykh moduley pri kompyuternom modelirovanii preobrazovateley. *Electrical engineering and electromechanics*, 4, 21-29. (in Russian)
3. Ostroverkhov, M. Ya., & Pizhov, V. M. (2008). *Modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem v Simulink*. Kyiv: VD «Stilos». (in Russian)
4. Petrenko, A. N., Tanyanskiy, V. I., & Petrenko, N. Ya. (2012). Dopolnitelnye poteri moshchnosti chastotno-upravlyаемого asinkhronnogo dvigatelya ot vysshikh garmonik napryazheniya. *Electrical engineering and electromechanics*, 5, 34-35. (in Russian)
5. 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)
6. 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)
7. Goolak, S., Riabov, Ie., Tkachenko, V., Saponova, 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)
8. Goolak, S., Saponova, 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)
9. 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, 1-32. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051472> (in English)
10. 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>
11. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Tugay, D. V., & Hordiienko, D. A. (2021). Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 103-110. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103> (in English)
12. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Khoruzhevskyi, H. A. (2020). Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 82-88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-82> (in English)
13. Raminoso, 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)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

14. 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), 1-14. <https://doi.org/10.3390/wevj11010024> (in English)
15. Xue, L. L., Su, G.-J., & Ozpineci, B. (2021). 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)
16. Yamazaki, K., & Noiaki, F. (2011). Torque and Loss Calculation of Rotating Mashines 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: 30.11.2023

Прийнята до друку: 28.03.2024