

Юрій Дубравін^{1*}, Віктор Ткаченко², Олександр Снівак³

¹Доцент, Кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9006-5198>

²Професор, Кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

³Доцент, Кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2876-4067>

* Автор, відповідальний за листування: dubravin_yf@gsuite.duit.edu.ua

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ

В роботі проведено дослідження енергетичних характеристик активного тягового перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією в складі тягового електропривода електровоза змінного струму. Тяговий перетворювач забезпечує широтно-імпульсне регулювання напруги на колекторних тягових двигунах постійного струму і належить до базової схеми змінно-постійного струму (АС/DC).

Перехідний процес при комутації транзисторних ключів супроводжується значними стрибками напруги, що обумовлені реакцією індуктивності розсіяння тягового трансформатора. Дослідження показали, що діодні розрядні буферні контури на вході навантаження не забезпечують розрядку електромагнітної енергії, накопиченої в обмотках трансформатора. Для зниження комутаційних перенапруг необхідно використовувати конденсатори великої ємності.

Розроблено алгоритм роботи тягового перетворювача з використанням широтно-імпульсного та фазового регулювання випрямленої напруги. Комутація транзисторних ключів відбувається при наявності паралельного кола протікання струму. При цьому створюються умови для розрядки електромагнітної енергії, накопиченої в колі вторинної обмотки тягового трансформатора.

Розроблена математична модель дозволяє дослідити електромагнітні процеси, що відбуваються при комутації транзисторних ключів та оцінити енергетичну ефективність електровоза з активним тяговим перетворювачем. У процесі моделювання досліджено вплив параметрів тягового перетворювача та алгоритму роботи на коефіцієнт потужності електропривода, сумарні коефіцієнти спотворень THD по струму та напрузі і відносні значення випрямленої напруги.

Запропоновано заходи щодо підвищення коефіцієнта потужності та зниження рівня емісії вищих гармонік струму в тягову мережу.

Ключові слова: математична модель, комутація, коефіцієнт потужності, активний тяговий перетворювач, алгоритм роботи.

Вступ. Електровози з колекторними тяговими двигунами (КТД) та діодними випрямлячами (ВЛ80^К, ВЛ80^Т, ВЛ80^С) складають в даний час основу парку вантажних та пасажирських електровозів змінного струму «Укрзалізниця». Тільки незначна частина парку – електровози 2ЕЛ5 обладнані тиристорними випрямно-інверторними перетворювачами (ВІП). Загальними недоліками тягових електроприводів з КТД є низькі значення коефіцієнта потужності K_p , що не

перевищують в режимах тяги 0,84 і рекуперативного гальмування 0,65, а також спотворення форми напруги і струму в первинній обмотці тягового трансформатора, що негативно впливає на надійність роботи електрообладнання електрорухомого складу (ЕРС), систем управління та каналів зв'язку.

Сучасні тенденції розвитку ЕРС пов'язані з впровадженням найбільш перспективного асинхронного тягового електроприводу (АТЕП). основу якого складають 4QS-перетворювачі, автономні інвертори напруги (АІН) та асинхронні тягові двигуни (АТД) [1,2].

АТД найбільш ефективні при високих значеннях частоти обертання, тому їх доцільно застосовувати для високошвидкісного пасажирського ЕРС. Конструктивні особливості, а також висока вартість АТЕП дозволяють зробити висновок про доцільність подальшої експлуатації ЕРС з КТД у вантажному і приміському пасажирському русі зі швидкостями до 120 км/год.

Тяговий електропривод (ТЕП) з КТД постійного струму з двосторонньою тяговою передачею забезпечує більш сприятливі режими в порівнянні з односторонньою при реалізації великих тягових зусиль на ободі колісної пари. Крім того він має більшу динамічну стійкість при різких змінах обертового моменту на валу. Це особливо важливо для вантажних електровозів в умовах руху по коліям невисокої бальності. Враховуючи вказані вище фактори та неможливість швидкого масового переходу на безколекторний тяговий привід, дослідження систем управління ТЕП з КТД з метою підвищення K_p та зниження емісії високочастотних гармонік в контактну мережу є актуальною науково-практичною задачею.

Застосування IGBT-транзисторів дозволяє розв'язати десятиліттями існуючу проблему – забезпечення силових схем електровозів змінного струму напівпровідниковими приладами з повною керованістю. Завдяки розробці нових алгоритмів управління транзисторні АТП та ВІП створюють значні можливості для зниження енерговитрат на тягу потягів. Метою даної роботи є аналіз існуючих схемотехнічних заходів, направлених на покращення енергетичних характеристик ТЕП електровозів змінного струму з КТД та подальший пошук їх раціональних силових схем і алгоритмів управління.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питання покращення енергетичних характеристик ТЕП з КТД на ЕРС змінного струму розглянуті в багатьох публікаціях вітчизняних та зарубіжних спеціалістів. Значна увага приділена розгляду математичних моделей ТЕП та їх алгоритмів. Всі технічні рішення з підвищення енергетичних характеристик ЕРС змінного струму з КТП можна умовно об'єднати в чотири групи:

- 1) застосування на ЕРС АТП на базі IGBT-транзисторів;
- 2) застосування на ЕРС ВІП на базі IGBT-транзисторів;
- 3) удосконалені схеми тягових перетворювачів та їх алгоритмів управління;
- 4) вмикання в коло вторинної обмотки тягового трансформатора (ТТ) активних і пасивних компенсаторів реактивної потужності.

У роботах [3–4] запропоновано застосування АТП на ЕРС змінного струму для живлення КТП. При цьому знижується рівень споживання реактивної потужності та зменшується спотворення форми напруги. Коефіцієнт потужності ТЕП близький до одиниці в режимі тяги та рекуперації. Схема тягового перетворювача включає вхідний 4q-S перетворювач та імпульсний регулятор на базі IGBT-транзистора, ввімкненого послідовно в коло якоря КТД. Регулювання напруги здійснюється методом широтно-імпульсного регулювання (ШІР) за допомогою транзисторного ключа (ТК).

У роботі [5] запропоновано застосувати для ШІР електровоза постійного струму з КТД перетворювачі постійно-постійного струму (DC-DC).

Використання ШІР напруги на електровозах змінного струму, як засобу удосконалення систем регулювання ЕРС, розглядалось неодноразово. Можливість втілення цієї ідеї з'явилась завдяки застосуванню силових транзисторів – елементів з повною керованістю. В роботах [6–9] розглянуті математичні моделі тягового електроприводу та активного випрямляча струму (АВС), розроблені силові схеми і досліджена робота АВС з двозонним регулюванням напруги при кількох варіантах алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Результати

проведеного комп'ютерного моделювання згідно з [7] свідчать про можливість підвищення коефіцієнта потужності електровоза 2ЕЛ5 при застосуванні АВС.

З представлених осцилограм видно, що форма струму електровоза наближається до прямокутної та має високочастотні гармонічні складові, що знижує загальний коефіцієнт потужності перетворювача.

Подальше підвищення техніко-економічних показників ЕРС зі статичними перетворювачами йде шляхом удосконалення алгоритмів управління без принципової зміни силової схеми електровоза. Удосконалення системи зонно-фазового регулювання з заміною тиристорів на IGBT-транзистори та організація нових алгоритмів роботи ВПП з модифікованим фазовим регулюванням дозволяє зменшити питомі витрати електроенергії та збільшити коефіцієнт потужності [10].

У роботі [11-12] розглянуті питання побудови структури математичної моделі «тягова підстанція – контактна мережа – електровоз». Проведені результати імітаційного моделювання на 3,5 зонах регулювання при роботі ВПП на IGBT-транзисторах в режимі тяги.

Про актуальність питання підвищення коефіцієнта потужності електровозів змінного струму за рахунок використання сучасного ВПП, виконаного на базі повністю керованих IGBT, свідчить робота [13-14].

Значною проблемою електротягових систем залишається несинусоїдальна форма струмів, які споживає ЕРС та спотворення форми кривої напруги на струмоприймачах ЕРС, що погіршує енергетичні показники ЕРС.

Проведений аналіз свідчить, що досліджень режимів роботи АПТ при регулюванні КТД на сьогодні недостатньо. Тому подальші дослідження в цьому напрямі можна вважати актуальними.

Мета і завдання дослідження. Імпульсне регулювання випрямленої напруги пов'язане зі значними комутаційними перенапругами в колі вторинної обмотки ТТ та емісією широкого спектру високочастотних гармонік в контактну мережу. Високочастотні гармоніки є додатковим фактором зниження коефіцієнта потужності електровоза та потребують застосування вхідних фільтрів зі значною потужністю конденсаторів. Метою роботи є пошук можливостей покращення енергетичних характеристик електровоза змінного струму 2ЕЛ5 в тяговому режимі, зниження спотворення напруги на струмоприймачах ЕРС та пульсації випрямленої напруги на КТД.

Матеріали та методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовувалися: класична теорія електричних кіл, методи математичного моделювання, чисельні методи рішення інтегральних і диференціальних рівнянь, теорія перетворювачів, схемотехніка силової електроніки на IGBT-транзисторах. Наукові дослідження проводилися на математичній моделі електровоза змінного струму в середовищі MatLab/Simulink.

Силова схема секції серійного електровоза 2ЕЛ5 включає дві трисекційні тягові обмотки. До кожної тягової обмотки підключений ВПП, укомплектований тиристорами, за допомогою якого здійснюється чотиризонне фазове регулювання випрямленої напруги. Від кожного ВПП отримують живлення два ТЕД. В коло кожного ТЕД включені індивідуальні згладжувальні реактори. Спрощена пропонується силова схема електровоза 2ЕЛ5 на один візок з транзисторним АПТ в режимі тяги приведена на рис.1. Схема включає такі елементи: виведення А,Х первинної обмотки ТТ для підключення до контактної мережі; тягові перетворювачі АПТ 1-2, за допомогою яких здійснюється три зонне імпульсне регулювання випрямленої напруги. Кожен АПТ має вісім плечей, плече складається з послідовно включеного IGBT-транзистора V_{Tn} та випрямного діода V_{Dn} (n – номер плеча). Випрямні діоди забезпечують випрямлення змінного струму в пульсуючий та запобігають протіканню зворотного струму по вторинній обмотці ТТ. Транзистори V_{Tn} реалізують заданий алгоритм управління випрямленою напругою. Діодні розрядні плечі V_{D0} включені паралельно кожному колу випрямленого струму і створюють буферний контур, через який під час комутації струму транзисторів розряджається електромагнітна енергія, яка накопичена в ланцозі випрямленого струму. Коло випрямленого струму складається зі згладжувального реактора (ЗР) типу РС-20 та ТЕД типу ДТК-820.

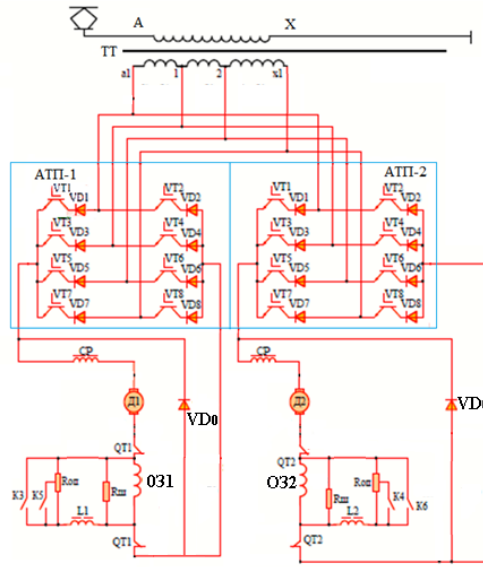


Рис. 1. Спрощена принципова силова схема електровоза на один візок з транзисторним АТП у режимі тяги

Наявність двох АТП дозволяє забезпечити їх роботу зі зсувом по фазі, що дає можливість отримати кращі енергетичні характеристики. Живлення кожного ТЕД здійснюється від індивідуального АТП, що дозволить здійснювати повільне регулювання сили тяги. Проведені попередні дослідження системи регулювання напруги на ТЕД за допомогою АТП показали, що при заміні ВП на АТП з транзисторними плечами та ШІР погіршуються енергетичні характеристики електровоза внаслідок багаторазового розмикання силового кола живлення ТЕД.

Математична модель електровоза в режимі тяги. При дослідженні енергетичних характеристик АТП електровоза розглянуто математичну модель (рис. 2) системи «тягова

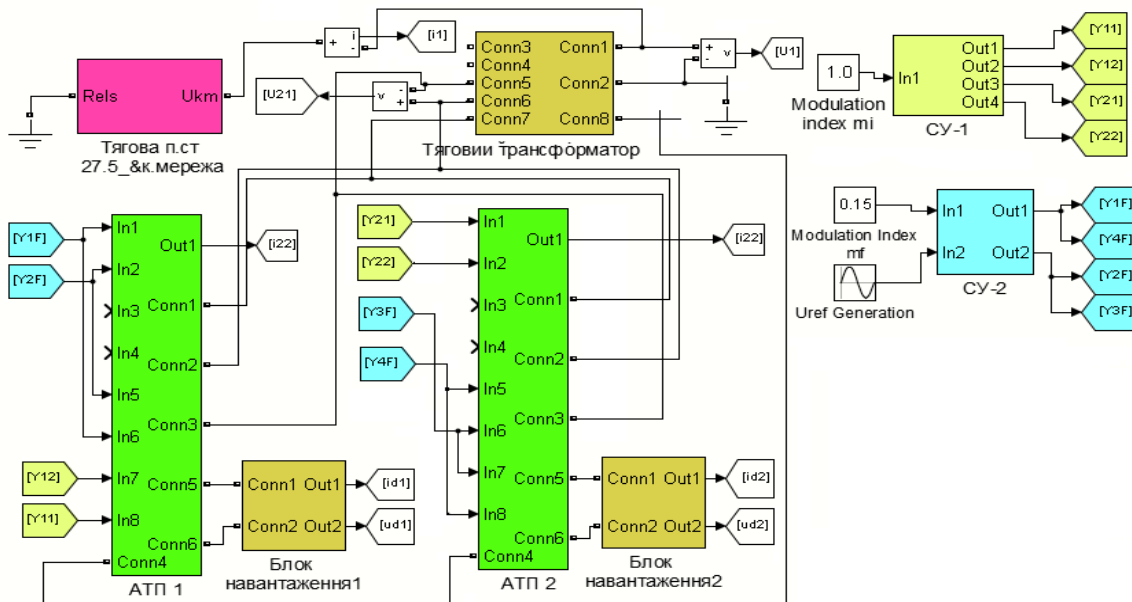


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі половини секції електровоза

мережа – електровоз» та алгоритм комутації плечей транзисторів АТП з широтно-імпульсним та фазовим регулюванням напруги на ТЕД постійного струму. За допомогою моделі досліджені електромагнітні процеси в силових електричних колах електровоза 2ЕЛ5 в режимі тяги. Математична модель є комплексною системою, яка включає в себе моделі тягової підстанції, контактної мережі та електровоза). Модель електровоза містить підсистеми тягового трансформатора, АТП, блоків навантаження з тяговими електродвигунами, ЗР та е.р.с. Система управління СУ-1 забезпечує формування сигналів ШПР, а СУ-2 – формує сигнали фазового управління в процесі реалізації алгоритму управління плечами АТП.

Модель ТТ. Математична модель трансформатора створена за допомогою його схеми заміщення (рис.3), яка має вигляд багато обмотувальних систем з магнітними зв'язками.

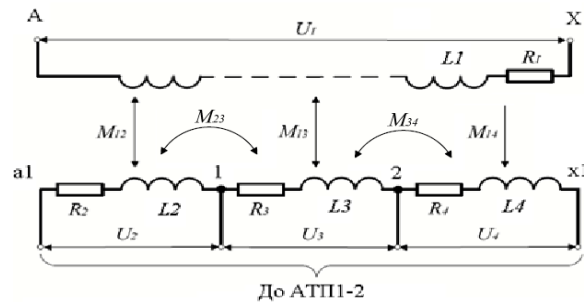


Рис. 3. Схема заміщення тягового трансформатор ОНДЦЭ-4350/25

На схемі заміщення позначені: U_1, L_1, R_1 – напруга, індуктивність і активний опір первинної обмотки ТТ; $U_2, L_2, R_2, U_3, L_3, R_3, U_4, L_4, R_4$ – напруги, індуктивності і активні опори секцій вторинних обмоток; $M_{12}, M_{13}, M_{14}, M_{23}, M_{34}$ – взаємні індуктивності між первинною обмоткою і секціями вторинних обмоток. При умові, що індуктивності обмоток мають постійні значення та не враховуючи ємності між секціями вторинної обмотки, можна записати такі рівняння зв'язку між параметрами тягового трансформатора:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt}; \\ u_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt}; \\ u_3 = M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} + i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt}; \\ u_4 = M_{14} \frac{di_1}{dt} + M_{24} \frac{di_2}{dt} + M_{34} \frac{di_3}{dt} + i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt}; \end{cases} \quad (1)$$

де u_1, u_2, u_3, u_4 – напруга первинної і вторинних обмоток трансформатора;

i_1, i_2, i_3, i_4 – струм первинної і вторинних обмоток трансформатора.

Запис системи рівнянь в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} & M_{24} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 & M_{34} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_4 \end{bmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Величини повних індуктивностей і активних опорів обмоток тягового трансформатора розташовані по діагоналі матриці (2). Величини взаємних індуктивностей між обмотками трансформатора розташовані зліва і праворуч від діагоналі матриці (2). Моделювання тягового трансформатора виконано за допомогою функціонального блоку бібліотеки Simulink- MultiWinding Transformer з урахуванням параметрів тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25.

Математична модель АТП. При математичному описі і моделюванні активного тягового перетворювача напруги використовується схема заміщення, яка представлена на рис.4.

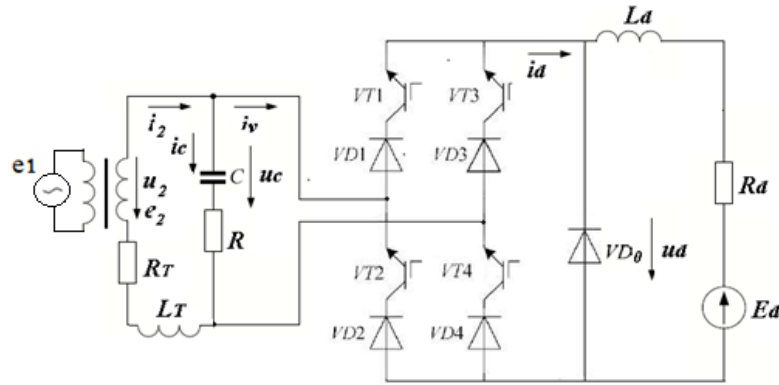


Рис. 4. Схема заміщення активного тягового перетворювача в режимі тяги

Схема містить вторинну обмотку ТТ з е.р.с. e_2 та приведеною індуктивністю L_T , активним опором R_T , буферний конденсатор C з опором R , IGBT-модулі $VT1-VT4$, діоди $VD1-VD4$, зворотний діод VD_0 , індуктивність і активний опір навантаження L_d, R_d та е.р.с. ТЕД E_d .

Алгоритм управління побудований на основі синусоїдної ШІМ. Стан транзисторних ключів описується комутаційними функціями S_1, S_2 , які приймають значення 0 або 1. Моделююча напруга $U_m(t) = \sin(\omega_m t + \psi)$ частотою $\omega_m = 2\pi f_m$ порівнюється з тактовою напругою

$$U_T(t) = \frac{2}{\pi} \arcsin\left[\sin\left(\omega_T t + \frac{\pi}{2}\right)\right], \quad (3)$$

де $\omega_T = 2\pi f_T$.

Відношення частот тактового і моделюючого сигналів оцінюється коефіцієнтом кратності $\varepsilon = \frac{f_T}{f_M}$. Глибина модуляції оцінюється відношенням амплітуд напруги моделюючого і тактового сигналів $\mu = U_M / U_T$.

Математичний опис формування сигналів управління

$$S_i = f_n(X) S[U_M(t) - U_T(t)], \quad (4)$$

де $f_n(X)$ – функція порівняння; S_i – логічна змінна.

Стан транзисторів протилежних плечей моста описуються однією комутаційною функцією: $VT1, VT4$ – функцією S_1 , а $VT2, VT3$ – функцією S_2 . При $U_M(t) > U_T(t)$ вмикаються транзистори $VT1, VT4$, при цьому $S_1=1$. Для транзисторів протилежної фази при $-U_M(t) > U_T(t)$ вмикаються $VT2, VT3$ і $S_2=1$, а $S_1=0$. Транзисторні ключі $VT1-VT4$ забезпечують імпульсне перетворення напруги вторинної обмотки ТТ.

Формування імпульсів фазового регулювання відбувається в моменти порівняння трикутного тактового сигналу $U_T(t)$ амплітудою 1В з рівнем, який задається глибиною модуляції μ_f . Тактова напруга має частоту $f_{TM} = 100\text{Гц}$. Стан транзисторів при фазовому

регулюванні описується комутаційною функцією S_f . Умовою вмикання транзисторів є залежність:

$$S_f = [(U_{Tf}(t) > \mu_f) \wedge u_2(t) > 0] = 1 \quad (5)$$

При аналізі цієї схеми передбачається, що транзистори і діоди є ідеальними ключами. У відкритому стані вони замикають накоротко ділянки електричних ланцюгів, в закритому стані розривають їх. При цьому стани транзисторів описуються функціями S_i .

Функція випрямленої напруги $u_v(t)$ являє собою криву, що складається з імпульсів напруги, ширина яких змінюється відповідно з модулюючим сигналом $U_M(t)$, а частота визначається частотою тактового сигналу $U_T(t)$. Миттєве значення випрямленої напруги $u_d(t)$ на виході АТП змінюється в залежності від комутаційної функції АТП

$$f_u(t) = \begin{cases} 1 \text{ при } S_1 = 1 \vee S_2 = 1 \vee S_f = 1 \\ 0 \text{ при } S_1 = 0 \wedge S_2 = 0 \wedge S_f = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Електромагнітні процеси в колі змінної і постійної напруги АТП характеризуються такими рівняннями:

$$\begin{aligned} e_2 &= E_{2\max} \sin \omega t; \\ e_2 - [L_T + f_u(t)L_d] \frac{di_2}{dt} - i_2 R_T - (L_d \frac{di_v}{dt} + i_v R_T - E_d) &= 0; \\ u_2 &= e_2 - i_2 R_T - L_T \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= RC \frac{dU_c}{dt} + U_c; \\ i_2 - i_v - i_c &= 0; \\ u_d &= f_u(t)u_2 \\ L_d \frac{di_d}{dt} - i_d R_d - E_d &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Отримані вирази дають змогу знайти значення напруг і струмів ділянок електричного кола АТП в сталому режимі при замкнутому та розімкнутому станах транзисторів.

Алгоритм роботи АТП в режимі тяги. Для найбільш ефективного споживання електроенергії при роботі АТП послідовно використовується фазове та імпульсне регулювання напруги на ТЕД, яке складається з трьох зон регулювання.

В першій зоні при ШР напруги обмотки а1-1 (рис. 3) здійснюється пуск та розгін електровоза. Плавне підвищення напруги відбувається шляхом збільшення глибини модуляції μ сигналів управління α_i транзисторів плечей АТП-2, що з'єднані з виведеннями обмотки а1-1. При подальшому збільшенню напруги на ТЕД АТП-2 працюють по різним алгоритмам.

В другій зоні АТП-1 поступово додає шляхом імпульсного регулювання напругу обмотки 1-2 до напруги обмотки а1-1. При цьому на протязі кожного півперіоду напруги живлення мережі подаються імпульси управління α_f на два транзистори плеч АТП-1, що відповідають позитивній полярності обмотки а1-1, а імпульси ШР α_i подаються на транзистори, що з'єднані з виведенням 2 обмотки 1-2. АТП-2, навпаки, шляхом імпульсного регулювання додає напругу обмотки а1-1 до напруги обмотки 1-2, яка на протязі півперіоду включена в електричне коло.

В третій зоні регулювання АТП-1 додає шляхом ШР напругу обмотки 2-х1 до напруги обмоток а1-2. Обмотка а1-2 включається в роботу транзисторами, які з'єднані з виведеннями а1-2.

обмотки при подачі на них імпульсів управління α_f . ШПР напруги обмотки 2-х1 забезпечується подачею імпульсів керування α_i на транзистори, що з'єднані з виведенням х1 обмотки 2-х1. Одночасно АТП-2 до введеної в роботу напруги обмотки 2-х1 додає шляхом ШПР напругу обмотки а1-2 відповідно до алгоритму, наведеного в табл. 1. При пропонованому алгоритмі роботи комутація ТК відбувається в умовах наявності паралельного кола протікання струму і можливості розрядки електромагнітної енергії при розмиканні ТК. Це зменшує амплітуди комутаційних і післякомутаційних коливань, дозволяє підвищити показник використання напруги ТТ, знизити споживання реактивної енергії та спотворення напруги на струмоприймачах ЕРС.

Для найбільш ефективного споживання електроенергії упродовж роботи електровоза необхідно забезпечувати фазове регулювання випрямленої напруги АТП з випередженням по фазі відносно середини півперіода напруги. Це дасть змогу частково компенсувати індуктивний характер навантаження та збільшити коефіцієнт потужності. За допомогою блока Signal Builder пакету Simulink розроблена діаграма фазового управління транзисторами, що має різні кути нахилу. При цьому упродовж напівперіода регулювання напруги забезпечується непропорційна зміна випрямленої напруги як по передньому, так і по задньому фронтах.

Таблиця 1. Алгоритм роботи плеч АТП 1-2 електровоза в режимі тяги

Зона	U_2, B	Напрямок е.р.с.	АТП-1								АТП-2							
			VT 1	VT 2	VT 3	VT 4	VT 5	VT 6	VT 7	VT 8	VT 1	VT 2	VT 3	VT 4	VT 5	VT 6	VT 7	VT 8
1	315	→	α_i			α_i					α_i			α_i				
		←		α_i	α_i							α_i	α_i					
2	630	→	α_f			α_f		α_i			α_i		α_f			α_f		
		←		α_f	α_f		α_i				α_i		α_f	α_f				
3	1260	→	α_f					α_f		α_i	α_i				α_f			α_f
		←		α_f			α_f		α_i			α_i				α_f	α_f	

α_i – сигнали управління ШПР;

α_f – сигнал фазового управління транзистором.

Імітаційне моделювання електромагнітних процесів. Для вивчення енергетичних характеристик пропонованого АТП була розроблена математична модель системи «тягова мережа – електровоз з АТП» в середовищі імітаційного моделювання MatLab/Simulink.

Як критерії, які характеризують споживання реактивної потужності, а також несинусоїдальність напруги та струму, прийнято коефіцієнт потужності K_p , коефіцієнт спотворення форми кривої струму K_i та коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих напруги K_u .

Модель тягового електропостачання. Для аналізу електромагнітних процесів ЕРС напруга на вихідних шинах тягової підстанції визначена за таким виразом:

$$U_{ТП} = e_{ТП} - r_{ТП}I - 2\pi fL_{ТП}I, \quad (8)$$

де $r_{ТП}$ – активний опір; $L_{ТП}$ – індуктивність; $e_{ТП}$ – значення е.р.с. тягової підстанції.

Модель контактної мережі реалізована як ділянка з двосторонньою схемою живлення і виконана у вигляді схеми заміщення, що складається з каскадно сполучених Т-подібних чотириполосників (рис.5). На представленій схемі заміщення параметри ділянки контактної мережі визначають індуктивність L_l , активний опір R_l , ємність C і поперечну провідність g .

Розрахункові значення активного і реактивного опорів елементів схеми заміщення визначені за такими виразами [9]:

$$R_{км} = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 L_2^2}{L_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (9)$$

$$X_{км} = \omega \left[L_1 + L_2 \frac{R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right]. \quad (10)$$

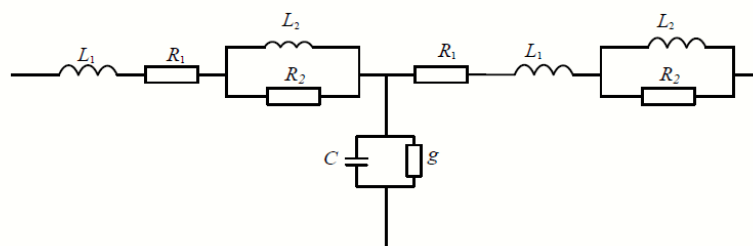


Рис.5. Схема заміщення ділянки контактної мережі завдовжки l

При розташуванні електровоза в середині фідерної зони ($L_\phi = 50$ км) при вказаній схемі заміщення контактної мережі отримаємо наступні параметри елементів схеми: $L_1 = 7,16$ мГн; $L_2 = 1,26$ мГн; $R_1 = 0,93$ Ом; $R_2 = 8,18$ Ом; $C = 0,435$ мкФ; $g = 15 \cdot 10^{-6}$ Ом $^{-1}$.

Модель тягового трансформатора реалізована за допомогою блоку Multi-Winding Transformer пакету Simulink. Блок Multi-Winding Transformer моделює однофазний багатообмоточний трансформатор з довільним числом обмоток як на первинній, так і на вторинній стороні. У блоці враховується нелінійність характеристики намагнічення матеріалу сердечника, магнітні характеристики сталі. Піктограма і електромагнітна схема трансформатора показана на рис.6. Моделі тягового трансформатора і тягового двигуна відповідають розроблені відповідно до параметрів обладнання вантажного електровоза 2ЕЛ5.

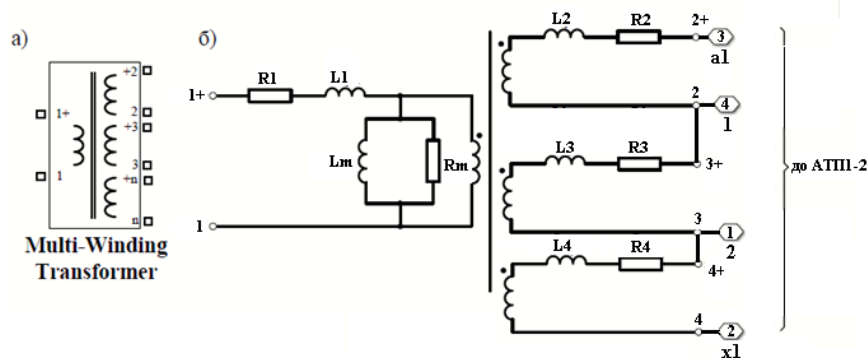


Рис. 6. Піктограма і схема тягового трансформатора

Блок-схема АТП виконана в редакторі Simulink і представлена на рис. 7. У пакеті MatLab плечі АТП моделюються за умови, що в схемі використані модулі CM1200HC-66H, 3300 В, 1200 А (IGBT-транзистори VT1-VT8) та RM1200DG-66S (діоди VD1-VD8). Схемні виведення 1-4 призначені для з'єднання з обмотками a1-1-2-x1 вторинної обмотки ТТ. На входи In1-In8 подаються сигнали управління від СУ-1, СУ-2 (рис. 2). Схемні виведення 5-6 призначені для з'єднання з блоком навантаження. Блок навантаження включає: ТЕД, е.р.с. обмотки якоря (кероване джерело напруги) та згладжуючий реактор. Тяговий електродвигун типу ДТК - 820

моделное блок DCMachine. Параметри кола ТЕД: активний опір ярірного кола з компенсаційними обмотками та котушками додаткових полюсів $R_{я} = 0,01652$ Ом; активний опір обмотки головних полюсів $R_{ос} = 0,0107$ Ом; активний опір згладжуючого реактора $R_{зп} = 0,014$ Ом; сумарна індуктивність ярірного кола з урахуванням обмотки збудження $L_{я} = 1,37$ мГн; індуктивність згладжуючого реактора $L_{зп} = 8,2$ мГн. Параметри індуктивностей обмоток ТЕД і згладжуючого реактора вважаємо постійними.

Результати досліджень активного тягового перетворювача електровоза змінного струму. В процесі моделювання електромагнітних процесів, що відображають роботу ТЕП електровоза, отримані осцилограми напруги u_1 і струму i_1 в первинній обмотці ТТ, напруги u_2 і струму i_2 у вторинній обмотці, а також середнє значення випрямленої напруги U_d та струму тягового електродвигуна i_d .

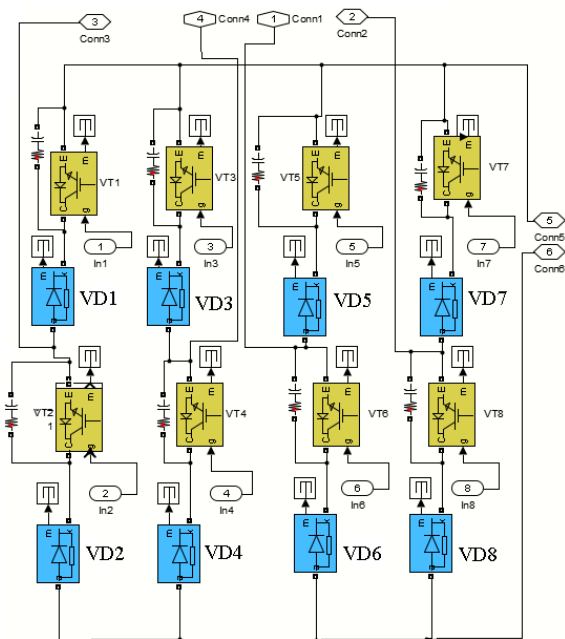


Рис. 7. Блок-схема АТП в редакторі Simulink

При моделюванні проведено дослідження впливу параметрів АТП та алгоритмів управління на такі енергетичні характеристики: значення коефіцієнта потужності K_p , виміряних на затискачах первинної обмотки ТТ; сумарні коефіцієнти спотворень по струму $THDi$ та напрузі $THDu$; відносні значення випрямленої напруги u_d/u_{d0} .

Визначення параметрів захисних RC-контурів моделі. Перехідний процес при комутації ТК супроводжується значними скачками напруги на елементах кола, що обумовлено реакцією індуктивності розсіяння ТТ, приведеної до вторинної обмотки ТТ. Для зменшення комутаційних перенапруг і коливань в колі вторинної обмотки ТТ встановлені індивідуальні снаберні RC-контури для кожного транзистора АТП та на виведеннях вторинних обмоток ТТ. На основі дослідження перехідного процесу в колі АТП та згідно рекомендацій [15] визначені параметри захисних RC-контурів моделі, які мають такі значення: на виведеннях вторинних обмоток ТТ- $R_{ТТ}=0.5$ Ом, $C_{ТТ} = 600$ мкФ; снаберні RC-контури транзисторів – $R_{СТ}=0.01$ Ом, $C_{СТ} = 10$ мкФ. Детальне дослідження перехідного процесу в колі АТП потребує окремого розгляду і виходить за межі даної статті.

Алгоритм фазового та імпульсного регулювання напруги. Алгоритм управління передбачає фазове регулювання та ШПР. При фазовому регулюванні коефіцієнт модуляції по амплітуді μ_f задає кути включення α та виключення β транзисторів. Зона роботи транзисторів розташована асиметрично відносно напівперіоду напруги живлення зі зміщенням в напрямку випередження. При зрушенні ЕРС з місця мінімальне значення випрямленої напруги забезпечується імпульсним регулюванням напруги вторинної обмотки ТТ $a1-1$ – перша зона регулювання. Для подальшого

підвищення випрямленої напруги здійснюється перехід на другу зону регулювання, де випрямлена напруга дорівнює сумі випрямлених напруг обмоток a1-1 та 1-2. При цьому випрямлена напруга обмотки a1-1 регулюється фазовим способом, а обмотка 1-2 – імпульсним (табл. 1). На третій зоні здійснюється фазове регулювання випрямленої напруги обмоток a1-1 і 1-2 та імпульсне регулювання напруги обмотки 2-х1. Для порівняння, в табл. 2 приведені результати моделювання роботи АТП електровоза 2ЕЛ5 при регулюванні напруги на ТЕД при використанні тільки системи ШПР та при алгоритмі спільного використання ШПР і фазового регулювання напруги. При цьому коефіцієнти модуляції мали значення: $\mu_i = 0,6-1,0$; $\mu_f = 0,15$. Отримані результати свідчать, що при алгоритмі спільного використання ШПР та фазового регулювання напруги зростає коефіцієнт потужності на 7–15% при зміні коефіцієнта модуляції μ_i в межах 0,6 – 0,8 та знижується сумарний коефіцієнти спотворень по струму $THDi$.

Таблиця 2. Порівняльна таблиця результатів імітаційного моделювання АТП при алгоритмі спільного використання ШПР та фазового регулювання напруги

Зона рег. луювання	μ_i	μ_f	K_p	$THDi$	$THDu$	U_d, B	u_d/u_{d0}
2	0,6	-	0,75	0,25	0,009	801	0,7
2	0,8	-	0,90	0,37	0,012	838	0,71
2	1,0	-	0,97	0,24	0,055	873	0,77
3	0,6	0,15	0,95	0,27	0,031	821	0,71
3	0,8	0,15	0,96	0,23	0,067	887	0,78
3	1,0	0,15	0,973	0,228	0,048	980	0,86

Результати свідчать, щовідносно значення випрямленої напруги u_d/u_{d0} перевищує на 9% відповідний показник роботи АТП при використанні тільки алгоритму ШПР

З урахуванням зсуву по фазі опорних сигналів при паралельній роботі двох АТП. В типовій схемі електровоза живлення двох ТЕД здійснюється від одного ВП. В розглянутій моделі живлення кожного ТЕД здійснюється від окремого АТП. На рис. 8,б показані сигнали управління тиристорами АТП 1-2. Опорні напруги ШПР кожної пари АТП, що отримують живлення від однієї вторинної обмотки ТТ, взаємно зсунуті по фазі на кут 160 ел. град., (рис. 8, а, в); де $\varphi_1 = -80$ град. (рис. 8, а), $\varphi_2 = 80$ град. (рис. 8, в). Завдяки зсуву по фазі в більшій частині напівперіоду напруги живлення по вторинній обмотці ТТ протікають струми навантаження обох АТП. Для прикладу в табл. 3 приведені результати моделювання роботи АТП на першій зоні ШПР за відсутності та наявності зсуву по фазі опорних напруг. Результати моделювання свідчать, що завдяки зсуву по фазі опорних сигналів збільшується коефіцієнт потужності K_p та зменшуються коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих напруги та струму.

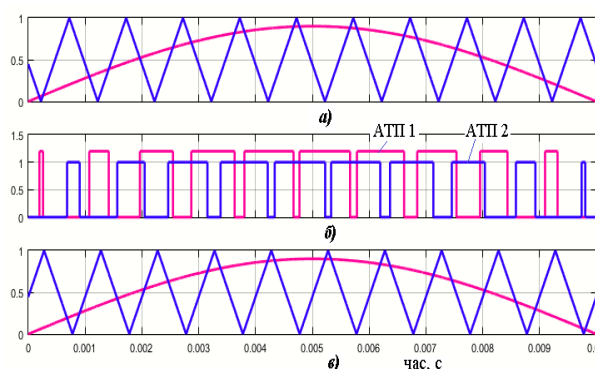


Рис. 8. Формування сигналів управління ШПР АТП 1-2

Таблиця 3. Параметри роботи АТП при зсуві по фазі опорних напруг

Частота опорного сигналу f_{on} , Гц	μ_i	Зсув по фазі		K_p	$THDi$	$THDu$	U_d , В	u_d/u_{d0}
		φ_1	φ_2					
600	0,8	0	0	0,77	0,79	0,05	170	0,59
600	0,8	-80	80	0,932	0,37	0,034	172	0,61
900	0,8	0	0	0,93	0,35	0,08	677	0,769
900	0,8	-80	80	0,96	0,28	0,073	679	0,77

Вплив частоти опорного сигналу ШІМ. З метою виявлення впливу на енергетичні характеристики електровоза частоти опорного сигналу ШІМ проведено дослідження роботи АТП при частотах 600, 900, 1000, 1200 Гц. Отримані результати на третій зоні регулювання при $\mu_i = 1.0$ та ємності конденсаторів $C_1 = C_2 = C_3 = 600$ мкФ приведені в табл.4.

Таблиця 4. Результати дослідження роботи АТП при різних значеннях частоти опорного сигналу

Частота опорного сигналу f_{on} , Гц	μ_i	K_p	$THDi$	$THDu$	U_d , В	u_d/u_{d0}
600	1,0	0,97	0,2	0,1	961	0,84
900	1.0	0.973	0.228	0.048	980	0.86
1000	1.0	0.971	0.256	0.065	846	0.87
1200	1.0	0.972	0.255	0.065	991	0.87

Отримані дані свідчать, що при збільшенні частоти перемикання транзисторних ключів досліджувані параметри практично мало змінюються. Разом з тим зі збільшенням частоти перемикання зростає кількість комутацій ключів та втрат в ключах. Виходячи з цього зроблено висновок про недоцільність підвищення частоти опорного сигналу і подальші дослідження характеристик виконувались при частоті опорного сигналу 900 Гц.

В результаті моделювання електромагнітних процесів в секції електровоза на третій зоні регулювання напруги, отримані осцилограми напруги і струму в первинній і вторинній обмотках ТТ, а також випрямленої напруги U_d і струму i_d кола ТЕД. Осцилограми напруги U_1 та струму i_1 первинної обмотки ТТ приведені на рис. 9, а. З приведених осцилограм видно, що струм обмотки ТТ повністю співпадає по фазі з напругою, що свідчить про високий рівень коефіцієнта потужності.

Зі спектрограми струму i_1 (рис. 9, б) видно, що найбільшу амплітуду серед вищих гармонік має 3-я гармоніка (13,2% від основної гармоніки) з частотою 150 Гц. Найбільш інтенсивні гармоніки з 7-ї по 17-у (3–6,8% від основної гармоніки) займають діапазон частот в межах 350–850 Гц. Підвищену інтенсивність (2,5–3,5%) мають гармоніки 31,35 і 41. Осцилограми напруги U_2 та струму i_2 вторинної обмотки ТТ приведені на рис.10. З приведених осцилограм видно, що струм вторинної обмотки ТТ повністю співпадає по фазі з напругою. Максимуми споживання струму та напруги розташовані симетрично відносно півперіода напруги

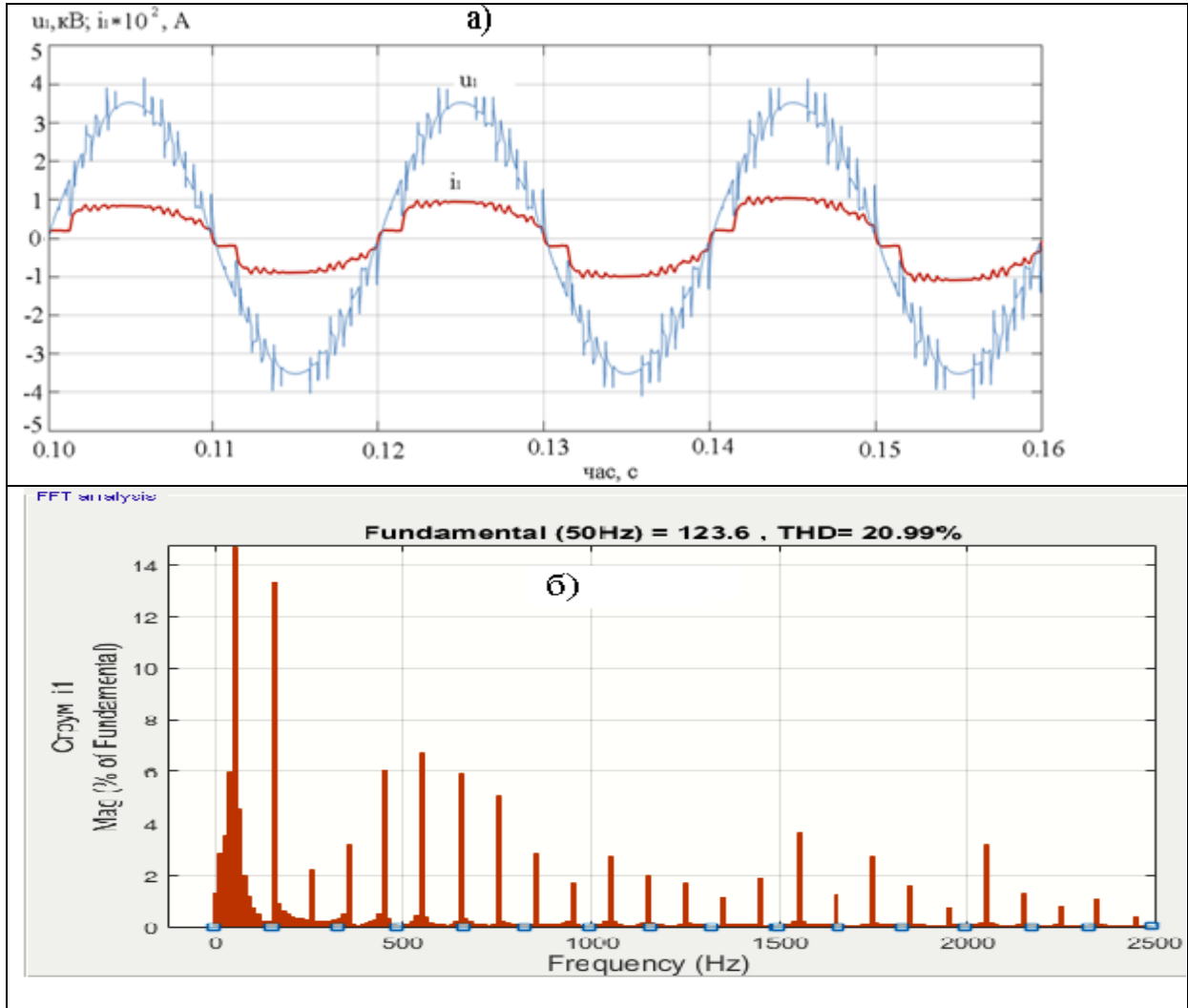


Рис. 9. Діаграми електромагнітних процесів при роботі електровоза в режимі тяги на 3-й зоні регулювання : а) осцилограма напруги U_1 і струму i_1 первинної обмотки ТТ, б) спектрограма струму i_1

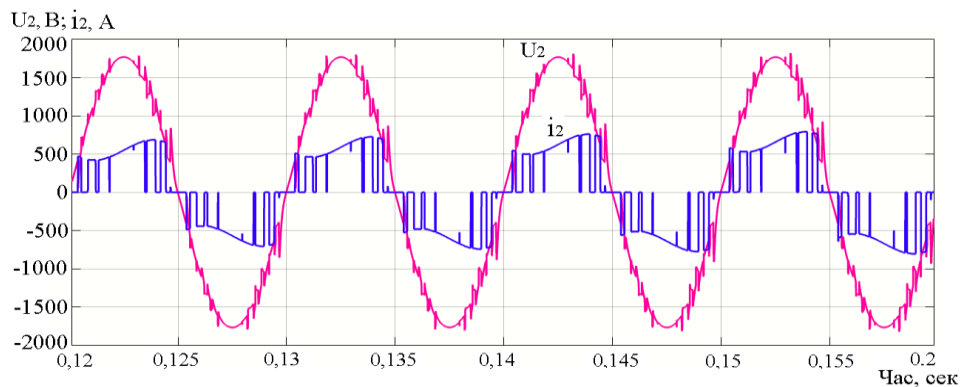


Рис. 10. Осцилограми напруги U_2 та струму i_2 вторинної обмотки ТТ

Осцилограми випрямленої напруги U_d і струму i_d приведені на рис.11.

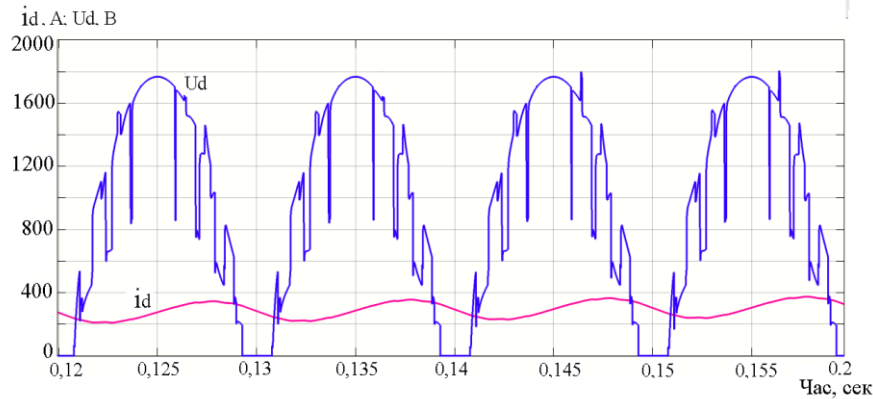


Рис. 11. Осцилограми випрямлених напруги U_d та струму i_d кола ТЕД

Випрямлена напруга U_d , завдяки спільному використанню алгоритма ШІР і фазового регулювання в кожному напівперіоді складається з постійної складової та регульованих по ширині імпульсів, що підвищує ефективність використання ТТ, підвищує коефіцієнт потужності K_p та сприяє зниженню спотворення синусоїдальності кривих напруги та струму.

Отримані результати моделювання свідчать про можливість використання моделі для подальших досліджень систем ЕРС з метою покращення їх енергетичних характеристик.

Висновки. 1. Розроблена математична модель системи «тягова підстанція – контактна мережа – електровоз» для електровоза 2ЕЛ5 із застосуванням АТП на IGBT-транзисторах. Модель дозволяє зробити оцінку електромагнітних процесів, що відбуваються при комутації транзисторних ключів та дослідити енергетичну ефективність електровоза з АТП.

2. Розроблено алгоритм одночасного використання широтно-імпульсного та фазового регулювання випрямленої напруги на трьох зонах регулювання. Пропонований алгоритм управління дає змогу підвищити до 0,86 відносно значення випрямленої напруги та показник використання тягового трансформатора (при широтно-імпульсному регулюванні показник має найвище значення 0,78).

3. Пропоновано мережеву комутацію плечей АТП електровоза зі зрушенням фаз опорних сигналів ШІМ та рекомендовано оптимальний варіант і частоти опорних сигналів при формуванні ШІМ.

За результатами проведеного моделювання можна зробити висновок, що за рахунок впровадження запропонованих способів управління АТП електровоза можливе збільшення значення коефіцієнта потужності до 0,90–0,97, тобто на 15% більше ніж у штатного тиристорного ВП на четвертій зоні регулювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иньков Ю.М., Литовченко В.В., Назаров Д.В. Особенности тягового электрооборудования перспективного электроподвижного состава. //Электротехника. 2016. № 9. С. 38-44. ISSN: 0013-5860.
2. Бурков А.Т., Валинский О.С., Евстафьев А.М., Мазнев А.С., Третьяков А.В. Системы управления тяговым приводом современных локомотивов.//Электротехника. 2019. №.10. С. 33-36. ISSN: 0013-5860.
3. Arvind Kumar Verma, Tripathi V. Simulation and Controlling the Speed of Electric Locomotive through PWM Technique // International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering. 2016. № 4, P. 239-243.
4. Дубравін Ю.Ф. Підвищення коефіцієнта потужності електроозів однофазно-постійного струму.// Технології та інфраструктура транспорту: зб.тез доп. між нар. наук.-техн. конф., м. Харків, 14-16 травня 2018 р. Харків: «УкрДУЗТ», 2018. С.113-114.
5. Мазнев, А. С., Киселев А.А. Улучшение регулировочных свойств электрического подвижного состава постоянного тока // Известия Транссиба. Омский гос. ун-т путей сообщения. 2019. Вып. № 1 (37). С. 17 – 27.
6. Краснов О. О. Математичне моделювання електровоза змінного струму з активним перетворювачем в режимі тяги // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 179. С. 40-51.

7. Ягуп В. Г., Краснов А. А., Божко В. В. Энергетические характеристики однофазного активного выпрямителя тока при синусоидальной и трапецеидальной широтно-импульсной модуляции // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2018. № 2. С. 3-11. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.130527>.
8. Краснов О. О., Ягуп В. Г., Божко В. В. Активный тяговый перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2018. № 4. С. 11-20.
9. Ягуп В. Г., Краснов А. А. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2017. Вип. 170. С. 20-31.
10. Газизов Ю., Мельниченко О. «Ермак» должен стать лучшим в мире электровозом // Локомотив. 2017. № 2. С. 21-23.
11. Яговкин Д.А. Разработка математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока и его блока управления в режиме тяги // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 197-202.
12. Яговкин Д.А., Портной А.Ю., Мельниченко О.В., Линьков А.О., Шрамко С.Г., Селдцов К.П. Структура математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока в режиме тяги. Электропривод на транспорте и в промышленности. Труды II Всероссийской научно-практической конференц. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. С. 121-129.
13. Богинский С. А., Мельниченко О. В., Линьков А. О. Повышение коэффициента мощности электровозов переменного тока за счет новой организации сетевой коммутации плеч выпрямительно-инверторного преобразователя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 2 (62). С. 166–177. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166–177.
14. Томилов В. С., Мельниченко О. В., Шрамко С. Г., Богинский С. А. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. Т. 65 № 1. С. 172–182. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).172-182.
15. Сосков А.Г., Сабалаева Н.О., Глебова М.Л., Форкун Я.Б. Розробка удосконалених методик розрахунку комутаційних перенапруг в напівпровідникових апаратах змінного струму. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. № 8 (80). С. 14-22. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.63765.

REFERENCES

1. Yu.M. Inkov, V.V. Litovchenko, D.V. Nazarov. (2016). Osobennosti tiahovoho elektrooborudovaniya perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava [Features of traction electrical equipment of promising electric rolling stock]. *Russ.Electr.Engin.*, 9, 38-44 [in Russian]. ISSN: 0013-5860.
2. A.T. Burkov, O.S. Valinsky, A.M. Evstafiev, A.S. Maznev, A.V. Tretyakov.. (2019). Sistemy upravleniya tyagovym privodom sovremennykh lokomotivov [Traction control systems for modern locomotives]. *Russ.Electr.Engin.*, 10, 33-36 [in Russian]. ISSN: 0013-5860.
3. Arvind Kumar Verma, V. Tripathi. (2016). Simulation and Controlling the Speed of Electric Locomotive through PWM Technique. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 4, 239-243.
4. Yu.F. Dubravin. (2018). Pidvyshchennia koefitsiienta potuzhnosti elektrovoziv odnofazno-postiinoho strumu. [Increasing the power factor of single-phase DC electric locomotives]. *Proceedings from MIIM '12: Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia «Tekhnologii ta infrastruktura transportu» – International Scientific and Technical Conference «Transport Technologies and Infrastructure»*. (pp 113-114). Kharkiv: «UKrDUZT» [in Ukrainian]
5. A.S. Maznev, A.A. Kiselev. (2019). Uluchshenie regulirovochnykh svoystv ehlektricheskogo podvizhnogo sostava postoyannogo toka [Improvement of regulating properties of electric rolling stock of direct current]. *Izvestiya Transsiba. Omskiy gosudarstvennyi unyversytet putei soobshcheniya*, 1 (37), 17 – 27 (2019) [in Russian]
6. O.O. Krasnov. (2018). Matematychni modeliuvannya elektrovoza zminnogo strumu z aktyvnym peretvoriuvachem v rezhymy tiahvy [Mathematical modeling of an alternating current electric locomotive with an active converter in traction mode]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 179, 40-51 [in Ukrainian]
7. V.G. Yagup, O.O. Krasnov, V.V. Bozhko. (2018). Ehnergeticheskie kharakteristiki odnofaznogo aktivnogo vypryamitelya toka pri sinusoidal'noj i trapeceidal'noj shirotno-impulsnoj modulyacii [Energy characteristics of single-phase active current rectifier with sinusoidal and trapezoidal pulse-width modulation]. *Information and control systems in railway transport*, 2, 3–11 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.130527>
8. O.O. Krasnov, V.G. Yagup, V.V. Bozhko. (2018). Aktyvnyi tiahovy peretvoriuvach z shyrotno-impulsnoiu modulatsiieiu dlia elektrovoza zminnogo strumu z kolektornymi tiahovymi dvyhunamy [Active traction converter with pulse-width modulation for AC electric locomotive with collector traction engines] *Information and control systems in railway transport*, 4, 11–20 [in Ukrainian]
9. V.G. Yagup, A.A. Krasnov. (2017). Matematicheskoe modelirovanie ehleketroprivoda ehleketrovoza 2EHL5 v rezhime tyagi [Mathematical modeling of the electric drive of the electric locomotive 2EL5 in traction mode] *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 170, 20-31 [in Ukrainian]
10. Yu.V. Gazizov, O.V. Melnichenko. (2017). «Ermak» dolzhen stat' luchshim v mire ehleketrovozom [«Yermak» should become the best electric locomotive in the world] *Locomotive*, 2, 21–23 [in Russian]

11. D.A. Yagovkin. (2015). Razrabotka matematicheskoy modeli vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na IGBT-tranzistorakh dlya ehlektrovoza peremennogo toka i ego bloka upravleniya v rezhime tyagi [Development of a mathematical model of a rectifier-inverter converter on IGBT transistors for an alternating current electric locomotive and its control unit in traction mode] *Sovremennye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovanie*,3(47), 197-202 [in Russian]

12. D.A. Yagovkin, A.Yu. Portnoy, O.V. Melnichenko, A.O. Linkov, S.G. Shramko, K.P. Seledtsov. (2018). Struktura matematicheskoy modeli vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na IGBT-tranzistorakh dlya ehlektrovoza peremennogo toka v rezhime tyagi [The structure of a mathematical model of a rectifier-inverter converter on IGBT transistors for an electric locomotive AC in traction mode] *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti. Trudy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Khabarovskogo Dalnevostochnogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia - Electric drive in transport and industry. Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference of the Khabarovsk Far Eastern State University of Railways*, 121-129 [in Russian]

13. S.A. Boginsky, O.V. Melnichenko, A.O. Linkov. (2019). Povyshenie koefitsienta moshchnosti ehlektrovozov peremennogo toka za schet novoj organizatsii setevoy kommutatsii plech vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya [Increasing the power factor of alternating current electric locomotives due to the new organization of network switching of the rectifier-inverter converter arms] *Sovremennye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovanie*,2(62), 166-177 [in Russian] DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166-177

14. V.S. Tomilov, O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, S.A. Boginsky. (2020). Povyshenie ehnergeticheskoy ehffektivnosti raboty ehlektrovozov peremennogo toka [Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives] *Sovremennye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovanie*, 1(65), 172-182 [in Russian] DOI: 10.26731 / 1813-9108.2020.1 (65) .172-182.

15. A.G. Soskov, N.O. Sabalaeva, M.L. Glebova, Ya.B. Forkun. (2016). Rozrobka udoskonalenykh metodyk rozrakhunku komutatsiinykh perenapruih v napivprovodnykovykh aparatakh zminnoho strumu [Development of advanced methods for calculating switching overvoltages in semiconductor AC devices] *Vostochno-Yevropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 8(80),14-22 [in Ukrainian] (ISSN 1729-3774 2/8 (80) 2016 - DOI: 10.15587 / 1729-4061.2016.63765.

Yuri Dubravin¹, Viktor Tkachenko², Oleksandr Spivak³

¹ Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

² Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

³ Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE AC ELECTRIC LOKOMOTIVE TRACTION DRIVE

The study of the energy characteristics of the active traction converter with pulse-width modulation as part of the traction electric drive of an AC electric locomotive was held during the research. Active traction converter provides pulse-width control of the collector DC traction motors voltage and belongs to the basic AC / DC circuit.

The transient process when switching transistor switches is accompanied by significant voltage surge, due to the scattering inductance reaction of the traction transformer. Studies have shown that the diode discharge buffer circuits do not provide discharge of the electromagnetic energy accumulated in the winding of the transformer.

An active traction converter control algorithm has been developed, which implies the use of pulse-width and phase regulation of rectified voltage. Switching of transistor switches occurs in the presence of a parallel current circuit. This creates the conditions for the discharge of electromagnetic energy accumulated in the secondary winding circuit of the traction transformer.

The developed mathematical model allows to investigate the electromagnetic processes that occur during the switching of transistor switches and to evaluate the energy efficiency of the electric locomotive with active traction converter. In the simulation process, the influence of active traction converter parameters and control algorithms on the power rate of the converter, the total THD distortion rate of current and voltage and the relative values of the rectified voltage were investigated.

Measures to increase the power rate and to reduce the emission level of higher current harmonics into the traction network were proposed.

Keywords: mathematical model, switching, power factor, active traction converter, algorithm.

Andrii Sulym^{1*}, *Oleksandr Safronov*², *Inna Gladkykh*³, *Nadiia Lupitko*⁴

¹ State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

² State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5865-7756>

³ State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

⁴ State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3387-2000>

*Corresponding author: innagladkih59@gmail.com

STUDY OF PERFORMANCE INDICATORS OF TRANSPORT MACHINE-BUILDING AND RAILWAY INDUSTRY ENTERPRISES IN A PANDEMIC CONDITION COVID-19

The article analyzes the impact of the consequences of the quarantine measures introduction to counter the pandemic COVID-19 on the economy of Ukraine in general and the domestic transport machine-building sector in particular. It has been established that one of the most affected sectors of the economy is transport and mechanical engineering, in particular the railway transport sector. It is determined that at present a very relevant issue for the further development of domestic enterprises of transport machine-building and railway industry is the assessment of the impact of the COVID-19 pandemic on the activities and financial and economic performance of these enterprises. The financial and economic indicators of such domestic enterprises of transport machine-building and railway industry, such as JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", SE "UkrNDIV", LLC "LEMTRANS" and LLC "KERNEL-TRADE", TDV "Popasnyansky Car Repair Plant" are analyzed. It was determined that the most affected of the studied domestic enterprises under the conditions of quarantine measures were JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", TDV "Popasnyansky Car Repair Plant". The main reasons for the decrease in technical and economic indicators at domestic enterprises of transport machine-building and the railway industry are studied by the method of expert evaluation. According to the analysis of expert evaluation data, the most important reason for the deterioration of technical and economic indicators of enterprises is the lack of state support and incentives for the development of transport machine-building and the railway industry in the country (19.6%). Experts estimate the impact of the consequences of the introduction of quarantine measures to counter the COVID-19 pandemic at 8.1%. Measures are proposed to improve the technical and economic performance of the most affected domestic enterprises of the transport machine-building and railway industries in the context of the COVID-19 pandemic.

Keywords: *domestic enterprise, railway industry, COVID-19 pandemic, resource-saving technologies, technical and economic indicators, transport machine-building.*

Introduction and problem statement. Throughout its historical existence, mankind has faced many crises, which later became the driving force for the development of society as a whole. At the end of 2019, humanity faced a fundamentally new catastrophe - the COVID-19 coronavirus pandemic, which spread rapidly around the world. As a result, in order to slow down the spread of the disease caused by COVID-19, governments have introduced quarantine measures at the legislative level. Quarantines, closing of borders, restriction on human mobility, creation of numerous problems practically for all states, all these are realities of today. The COVID-19 pandemic has changed not only the lives of many people, but also the situation in global and local markets. There has been a