

КРАСНОВ О. О. (ПВІЗТ ПАТ «Укрзалізниця»),
ЯГУП В. Г., д. т. н., професор (ХНУМГ імені О. М. Бекетова),
БОЖКО В. В., к. т. н., с. н. с. (ПВІЗТ ПАТ «Укрзалізниця»)

Активний тяговий перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами

З метою підвищення енергетичної ефективності електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами розроблено силову схему і алгоритм управління активного тягового перетворювача з двозонним регулюванням напруги і широтно-імпульсною модуляцією. Результати комп'ютерного моделювання показали можливість підвищення коефіцієнта потужності електровоза 2ЕЛ5 з новим перетворювачем до 0,99 при несинусоїдальності струму в контактній мережі THDi до 13 %.

Ключові слова: електровоз змінного струму, активний тяговий перетворювач, коефіцієнт потужності, широтно-імпульсна модуляція.

Вступ

Основу парку електровозів змінного струму залізниць України складають електровози з колекторними тяговими двигунами постійного струму і тяговими перетворювачами, побудованими на діодах або тиристорах. При діодних випрямлячах регулювання випрямленої напруги здійснюється ступінчастим способом за рахунок перемикання секцій вторинної обмотки трансформатора. Тиристорні перетворювачі забезпечують плавне зонно-фазове регулювання напруги з можливістю переведення електровоза в режим рекуперативного гальмування [1].

Разом з тим, найбільшим недоліком діодних або тиристорних схем є низький коефіцієнт потужності електровоза. У залежності від навантаження, конфігурації і параметрів системи тягового електропостачання, його величина в режимі тяги становить 0,65...0,85 [2] при рекомендованому значенні не менше 0,95 [3]. Коефіцієнт потужності електровоза з тиристорним перетворювачем в режимі рекуперативної тяги становить 0,45...0,65 [4]. Наслідком цього є підвищене споживання реактивної потужності тяговим навантаженням.

Основними причинами зниження коефіцієнта потужності є [3-5]:

— високий реактивний опір системи електропостачання і тягового трансформатора електровоза, що обумовлює необхідність відкривання тиристорів з кутом затримки $(9 \pm 2)^\circ$;

— генерація тяговими перетворювачами гармонік частотою 150...1000 Гц в результаті процесів комутації тиристорів;

— коливання напруги з частотою 750...1950 Гц на струмоприймачі електровоза в результаті перехідних процесів в системі «тягова мережа — електровоз»;

— несинусоїдальна форма струму електровоза внаслідок індуктивного характеру навантаження та інших причин.

Відомо, що серед усіх типів високовольтних перетворювачів найкращі енергетичні показники забезпечують активні перетворювачі на повністю керованих напівпровідникових приладах [6]. Тому задача дослідження режимів роботи такого перетворювача з тяговим двигуном постійного струму являє інтерес з теоретичної та практичної точки зору.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Серед значної кількості робіт, присвячених проблемі підвищення коефіцієнта потужності електровозів змінного струму, можна виділити кілька основних напрямків дослідження:

1) зменшення фазового зсуву між напругою та струмом електровоза шляхом підключення пасивного компенсатора реактивної потужності в коло вторинної обмотки тягового трансформатора. Такий компенсатор може бути дволанковим [3] або одноланковим [7]. У режимі роботи з компенсатором коефіцієнт потужності електровоза збільшується до 0,92, а в окремих випадках і до 0,97. При цьому дещо покращується форма напруги на струмоприймачі за рахунок зменшення 3-ї, 5-ї та 7-ї гармоніки;

2) удосконалення алгоритмів управління без принципової зміни силової схеми електровоза. Такими алгоритмами є одночасна комутація тиристорів [4] та різнофазне управління паралельно ввімкненими

перетворювачами із увімкненням у коло випрямленого струму діодного розрядного плеча [8]. Випробування модернізованого перетворювача на електровозі показали зменшення питомих витрат електроенергії на 7,6 %, а коефіцієнт потужності в номінальному режимі збільшився до 0,88 [9];

3) застосування гібридного фільтра, в якому пасивний LC-фільтр забезпечує компенсацію реактивної потужності, компенсацію 3-ї гармоніки напруги, і частково 5-ї та 7-ї гармонік. Активний фільтр компенсує всі інші вищі гармоніки напруги. Відомо кілька варіантів таких фільтрів, в тому числі з плавним регулюванням реактивної потужності компенсатора [2]. За результатами досліджень, коефіцієнт потужності електровоза ВЛ85 при обладнанні гібридним фільтром збільшується до 0,996 в режимі тяги і до 0,985 в режимі рекуперації [3];

4) останнім часом розвивається напрямок, пов'язаний з розробкою активних тягових перетворювачів. Алгоритмом управління IGBT-транзисторами може бути модифіковане зонно-фазове регулювання, запропоноване в [5, 8, 10] для електровозів ВЛ80Р і 2ЭС5К, або широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) при різних варіантах структур систем автоматичного управління. Випрямлячі з ШІМ [11-13] розглядають, в основному, як активні фільтри. Крім того, на їх базі можлива реалізація регуляторів випрямленої напруги, але цей напрямок, на наш погляд, сьогодні є дослідженим недостатньо.

Мета і задачі дослідження

Метою цього дослідження є підвищення енергетичної ефективності електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами за рахунок використання в електроприводі активних тягових перетворювачів (АТПр).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробити силову схему активного тягового перетворювача з двозонним регулюванням випрямленої напруги і широтно-імпульсною модуляцією, а також алгоритм його управління;
- провести дослідження електромагнітних процесів та оцінити за обраними критеріями енергетичну ефективність запропонованого тягового перетворювача;
- визначити напрямки подальших досліджень активних тягових перетворювачів електровозів змінного струму.

Схема і принцип роботи активного тягового перетворювача

Враховуючи особливості роботи тягових електроприводів магістральних електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами, можна

сформулювати загальні задачі управління такими електроприводами:

— реалізація заданої сили тяги та швидкості руху електровоза шляхом регулювання випрямленої напруги двигуна (режим тяги);

— реалізація заданої гальмівної сили та швидкості руху електровоза шляхом регулювання та інвертування випрямленої напруги в контактну мережу (режим рекуперації).

Виходячи з цього до тягового перетворювача електровоза змінного струму можна сформулювати ряд основних вимог:

- можливість реалізації випрямного та інверторного режимів роботи;
- по можливості одноступінчате перетворення електроенергії;
- високі енергетичні показники при мінімальних втратах енергії в елементах перетворювача.

Активний тяговий перетворювач пропонується розробити на базі двозонної схеми активного випрямляча струму з розрядним діодом. Схему такого перетворювача подано на рис. 1. Будемо розглядати випадок живлення від АТПр одного двигуна M , що дозволить реалізувати індивідуальне регулювання сили тяги.

Конфігурація і параметри тягового трансформатора і тягового двигуна відповідають вантажному електровозу 2ЕЛ5. АТПр підключається до виводів $a1, 2, x1$ вторинної обмотки тягового трансформатора. Напряга секцій $a1-2$ і $2-x1$ складає $U_{21} = U_{22} = 630$ В. Додатний напрямок е. р. с. секцій вторинної обмотки трансформатора E_{21}, E_{22} і е. р. с. якоря тягового двигуна E_d на рис. 1 показано суцільною стрілкою, від'ємний напрямок — штриховою. На вході АТПр встановлено буферні конденсатори C_{21}, C_{22} . Пульсації випрямленого струму I_d згладжуються реактором L_p .

АТПр має шість плечей, кожне з яких складається з послідовно ввімкнених транзистора і діода (відповідно $VT1-VT6$ і $VD1-VD6$). Розрядний діод $VD0$ підключається до навантаження через транзистор $VT7$ і діод $VD7$. У режимі тяги транзистор $VT7$ постійно знаходиться у відкритому стані.

Полярність випрямленої напруги U_d в режимі тяги вказана на рис. 1 без дужок. Випрямлена напруга імпульсної форми утворюється шляхом подачі імпульсів з тактовою частотою f_m на транзистори $VT1-VT6$ відповідно до алгоритму, наведеного в табл. 1. При цьому U_2 — вхідна змінна напруга АТПр. Перетворювач працює в режимі широтно-імпульсної модуляції. На інтервалах паузи коло випрямленого струму замкнене на розрядний діод $VD0$, а струм в колі підтримується за рахунок енергії, запасеної в індуктивності.

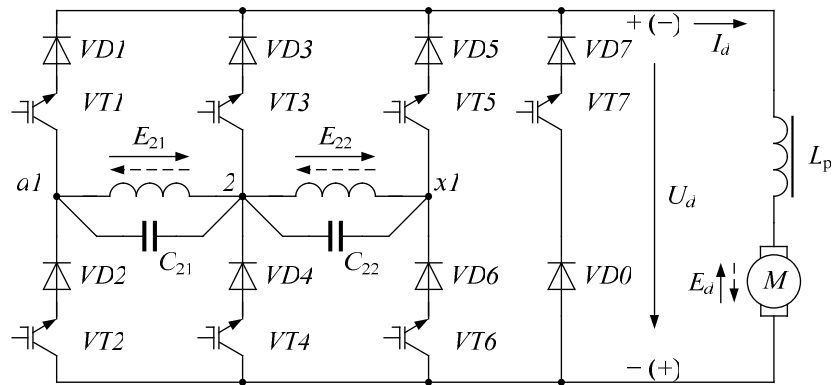


Рис. 1. Принципова схема активного тягового перетворювача з двозонним регулюванням випрямленої напруги

Плавне регулювання випрямленої напруги U_d здійснюється шляхом зміни коефіцієнта модуляції μ . На 1-й зоні ступені регулювання з $\mu \approx 0,3 \dots 0,5$ використовується лише при пуску в короткочасних режимах роботи. На 2-й зоні регулювання починається з $\mu \approx 0,5$.

Таблиця 1

Алгоритм управління АТПр

Режим	Зона регулювання	$U_2, \text{В}$	Полярність напруги U_2	Номери плечей АТПр
Тяга	1	630	+	VT4, VT5
			-	VT3, VT6
	2	1260	+	VT2, VT5
			-	VT1, VT6
Рекуперація	2	1260	+	VT1, VT6
			-	VT2, VT5
	1	630	+	VT3, VT6
			-	VT4, VT5

При переході до рекуперативного гальмування тяговий двигун M переводять в генераторний режим шляхом перемикання обмотки якоря таким чином, щоб напрямок е. р. с. якоря E_d збігався з напрямком випрямленого струму I_d . Цей принцип не відрізняється від прийнятого на електровозах ВЛ85, 2ЭС5К, 2ЕЛ5.

Полярність випрямленої напруги U_d в режимі рекуперації вказана на рис. 1 в дужках, а напрямок випрямленого струму I_d залишається незмінним. Коло випрямленого струму замикається на діод $VD0$ тільки на інтервалах паузи. Для цього використовується транзистор $VT7$, який також перемикається з тактовою частотою модуляції f_m .

Реалізація рекуперації на електровозах змінного струму відрізняється складністю. Розробка АТПр на повністю керованих напівпровідникових приладах при управлінні методом ШІМ обумовлює необхідність розробки і дослідження випрямної установки збудження, побудованої за схожими принципами [5].

Оскільки ця тема потребує окремого дослідження, у подальшому розглянемо тільки режим тяги.

Будемо враховувати, що на чотиривісній секції електровоза встановлюється чотири АТПр. До однієї тягової обмотки трансформатора (наприклад, $a1-x1$) підключається паралельно два АТПр, при цьому батарея буферних конденсаторів $C_{21}-C_{22}$ є спільною для двох перетворювачів.

Алгоритм широтно-імпульсної модуляції

Для управління активним тяговим перетворювачем пропонується застосувати алгоритм широтно-імпульсної модуляції з прямокутно-ступінчастим модуляційним сигналом. Імпульси управління транзисторами (рис. 2) характеризуються комутаційною функцією s^* і формуються в моменти рівності опорної пілкоподібної напруги $u_{оп}$ і модуляційного сигналу u_m . Частоту модуляції прийнято $f_m = 1200$ Гц, при цьому частота мережі $f = 50$ Гц.

Прямокутно-ступінчастий сигнал є апроксимацією синусоїди і має такі параметри [14]: θ_i — фазовий кут i -ї сходинки; $\Delta\theta$ — дискретний крок зміни фазового кута; $i = 1 \dots n$ — номер сходинки; n — кількість сходинок; τ_1 і τ_0 — відповідно відносна тривалість імпульсу та паузи; μ — коефіцієнт модуляції. Ці параметри можна визначити за формулами

$$n = \frac{f_1}{2f}, \tag{1}$$

$$\Delta\theta = 180^\circ/n, \tag{2}$$

$$\theta_i = i \cdot \Delta\theta, \tag{3}$$

$$\tau_1 = \begin{cases} (0 \leq \theta \leq \pi/2) \rightarrow \mu \cdot \sin \theta \\ (\pi/2 < \theta \leq \pi) \rightarrow \mu \cdot \sin(\theta - \Delta\theta) \end{cases}, \tag{4}$$

$$\tau_0 = 1 - \tau_1. \tag{5}$$

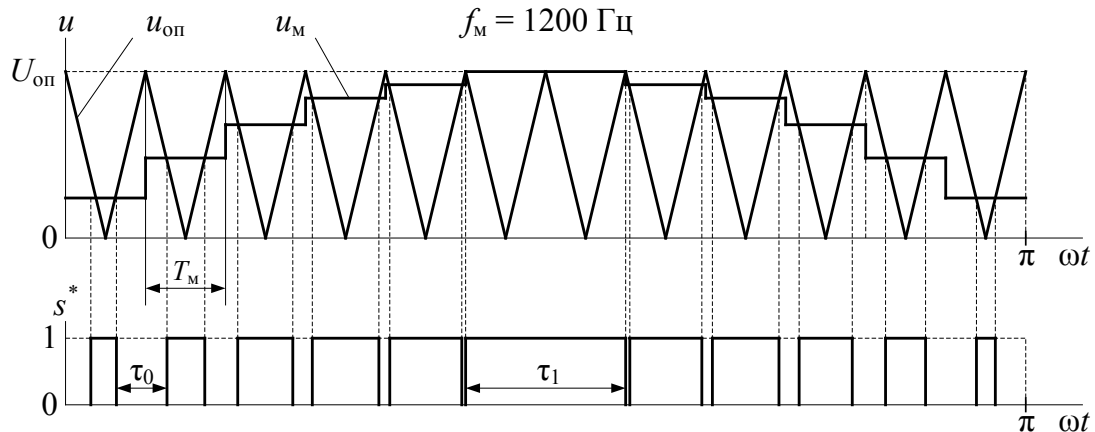


Рис. 2. Діаграми формування імпульсів ШІМ

Опорна пилоподібна напруга $u_{оп}$ і модуляційний сигнал u_M ($U_{оп}$ — амплітуда опорної напруги):

$$u_{оп}(t) = \frac{U_{оп}}{\pi} \left| \arcsin \left[\sin \left(\frac{\omega_M}{2} t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \right|, \quad (6)$$

$$u_M(\theta) = \begin{cases} (0 \leq \theta \leq \theta_1) \rightarrow \tau_1(\theta_1) \\ (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) \rightarrow \tau_1(\theta_2) \\ \dots \\ (\theta_{i-1} \leq \theta \leq \theta_i) \rightarrow \tau_1(\theta_i) \end{cases} \quad (7)$$

При постійній частоті ШІМ параметри імпульсів та пауз можуть бути записані в пам'ять мікроконтролера в індексному або табличному вигляді [14]. Це дозволить не використовувати в системі управління генератори модуляційного та опорного сигналів, і таким чином знизити обчислювальну потужність системи. Залежно від структури системи управління в пам'ять можуть бути записані значення часу подачі імпульсів на транзистори АТПр (t_α ; t_β) або кутів відкриття і закриття транзисторів (α_i ; β_i).

Розрахункові формули для вказаних параметрів ШІМ отримаємо з таких міркувань. На періоді повторюваності $T = 0 \dots \pi$ є n періодів модуляції T_M (див. рис. 2). Тоді $T = nT_M$. На кожному періоді T_M відносна тривалість відкриття ключа дорівнює τ_1 . Тому тривалість імпульсу на i -му періоді модуляції, t_{1i} , с,

$$t_{1i} = \frac{T}{n} \tau_{1i}. \quad (8)$$

Час подачі t_α і завершення t_β i -го імпульсу, с,

$$t_\alpha = \frac{T}{n}(i-1) + \frac{T}{2n}(1-\tau_{1i}), \quad (9)$$

$$t_\beta = \frac{T}{n}(i-1) + \frac{T}{2n}(1-\tau_{1i}) + \frac{T}{n}\tau_{1i}. \quad (10)$$

З урахуванням коефіцієнта модуляції $\tau_{1i} = \mu\tau_{11i}$, де τ_{11i} — відносна тривалість i -го імпульсу при $\mu = 1$. Тоді кути α_i і β_i в радіанах

$$\alpha_i = 2\pi f t_\alpha = \frac{2\pi}{n} \left[(i-1) + \frac{1}{2}(1-\mu\tau_{11i}) \right], \quad (11)$$

$$\beta_i = 2\pi f t_\beta = \frac{2\pi}{n} \left[(i-1) + \frac{1}{2}(1-\mu\tau_{11i}) + \mu\tau_{11i} \right]. \quad (12)$$

Середнє значення випрямленої напруги АТПр у випадку її регулювання методом однополярної ШІМ без урахування втрат напруги і пульсацій (при $C = \infty$) при $f_M = 1200$ Гц можна знайти за формулою [6]

$$U_d = \frac{\sqrt{2}\mu U_2}{\pi} [2(\cos \alpha_1 - \cos \beta_1 + \dots + \cos \alpha_6 - \cos \beta_6)], \quad (13)$$

де U_2 — діюче значення напруги відповідної секції вторинної обмотки трансформатора;

$\alpha_1 \dots \alpha_6$ і $\beta_1 \dots \beta_6$ — відповідно кути відкриття і закриття транзисторів при $\mu = 1$;

$n = 1 \dots 6$ — номер імпульсу.

Результати розрахунку номінальної випрямленої напруги за формулою (13) в режимі тяги подано в табл. 2.

Таблиця 2

Розрахунок номінальної випрямленої напруги АТПр ($f_m = 1200$ Гц)

Зона	U_2 , В	U_d , В, при коефіцієнті модуляції μ							
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	630	143,4	191,2	238,9	286,7	334,5	382,3	430,1	477,9
2	1260	–	–	477,9	573,5	669,0	764,6	860,2	955,8

Моделювання електровоза в режимі тяги

Моделювання електровоза з АТПр в режимі тяги виконувалось в програмному пакеті MATLAB при таких умовах [15]: напруга на шинах тягової підстанції $U_{тп} = 25$ кВ, одноколійна електрифікована ділянка довжиною 10 км з одностороннім живленням, електровоз знаходиться на кінці ділянки. Працює вісім тягових двигунів (дві секції). Маса поїзда 2500 т. Швидкість руху поїзда: 3...25 км/год (1 зона), 25...52 км/год (2 зона).

Оцінка енергоефективності АТПр при віртуальних експериментах була проведена шляхом визначення таких показників: коефіцієнт потужності електровоза, вимірний в колі первинної обмотки тягового трансформатора (K_M), коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги на струмоприймачі u_1 (K_U , %) і струму первинної обмотки трансформатора електровоза i_1 (K_I , %), коефіцієнт спотворення струму v_I , коефіцієнти k -х гармонічних складових напруги (K_{Uk} , %) і струму (K_{Ik} , %).

Коефіцієнт потужності електровоза K_M був

розрахований за формулою

$$K_M = P_1 / U_1 I_1 = \left(\int_0^T u_1 i_1 dt \right) / \sqrt{\left(\int_0^T u_1^2 dt \right) \left(\int_0^T i_1^2 dt \right)}, \quad (14)$$

де P_1 , U_1 , I_1 — відповідно потужність та діючі значення напруги та струму первинної обмотки трансформатора; u_1 , i_1 — відповідно миттєві значення напруги та струму первинної обмотки трансформатора.

Коефіцієнт спотворення струму первинної обмотки тягового трансформатора є відношенням діючого значення 1-ї гармоніки струму $I_{1(1)}$ до діючого значення всього струму I_1

$$v_I = I_{1(1)} / I_1. \quad (15)$$

Результати комп'ютерного моделювання при $\mu = 0,5$ і $\mu = 1,0$ наведені в табл. 3. Осцилограми напруги та струму електровоза з АТПр в режимі тяги на 2 зоні регулювання подано на рис. 3.

Таблиця 3

Результати моделювання електровоза з АТПр

Найменування параметрів	Познач., од. вим.	1 зона		2 зона	
		$\mu = 0,5$	$\mu = 1,0$	$\mu = 0,5$	$\mu = 1,0$
Напруга на струмоприймачі	U_1 , кВ	25,00	24,94	25,00	24,63
Струм первинної обмотки трансформатора електровоза	I_1 , А	54,4	75,9	83,8	151,2
Коефіцієнт потужності електровоза	K_M	0,932	0,972	0,964	0,991
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги u_1	K_U , %	4,90	2,58	9,42	5,75
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму i_1	K_I , %	10,73	9,35	12,55	9,68
Коефіцієнт спотворення струму i_1	v_I	0,9943	0,9957	0,9922	0,9953
Випрямлена напруга	U_d , В	233	465	471	922
Струм тягового двигуна	I_d , А	1014	737	755	732
Сила тяги електровоза	F_k , кН	561	367	379	363

З теоретичної та практичної точки зору являє інтерес залежність коефіцієнта потужності електровоза від випрямленої напруги. Ця залежність отримана при зміні коефіцієнта модуляції $\mu = 0,3...1$ (1 зона), $\mu = 0,55...1$ (2 зона) і показана на рис. 4 (крива 1). Для порівняння на цьому ж рисунку

наведено залежність $K_M = f(U_d)$ для електровоза 2ЕЛ5 (крива 2) з тиристорним випрямно-інверторним перетворювачем (ВІП), отриману за умов: 1–4 зона регулювання, кути відкриття тиристорів $\alpha_0 = 9^\circ$; $\alpha_p = 13...165^\circ$.

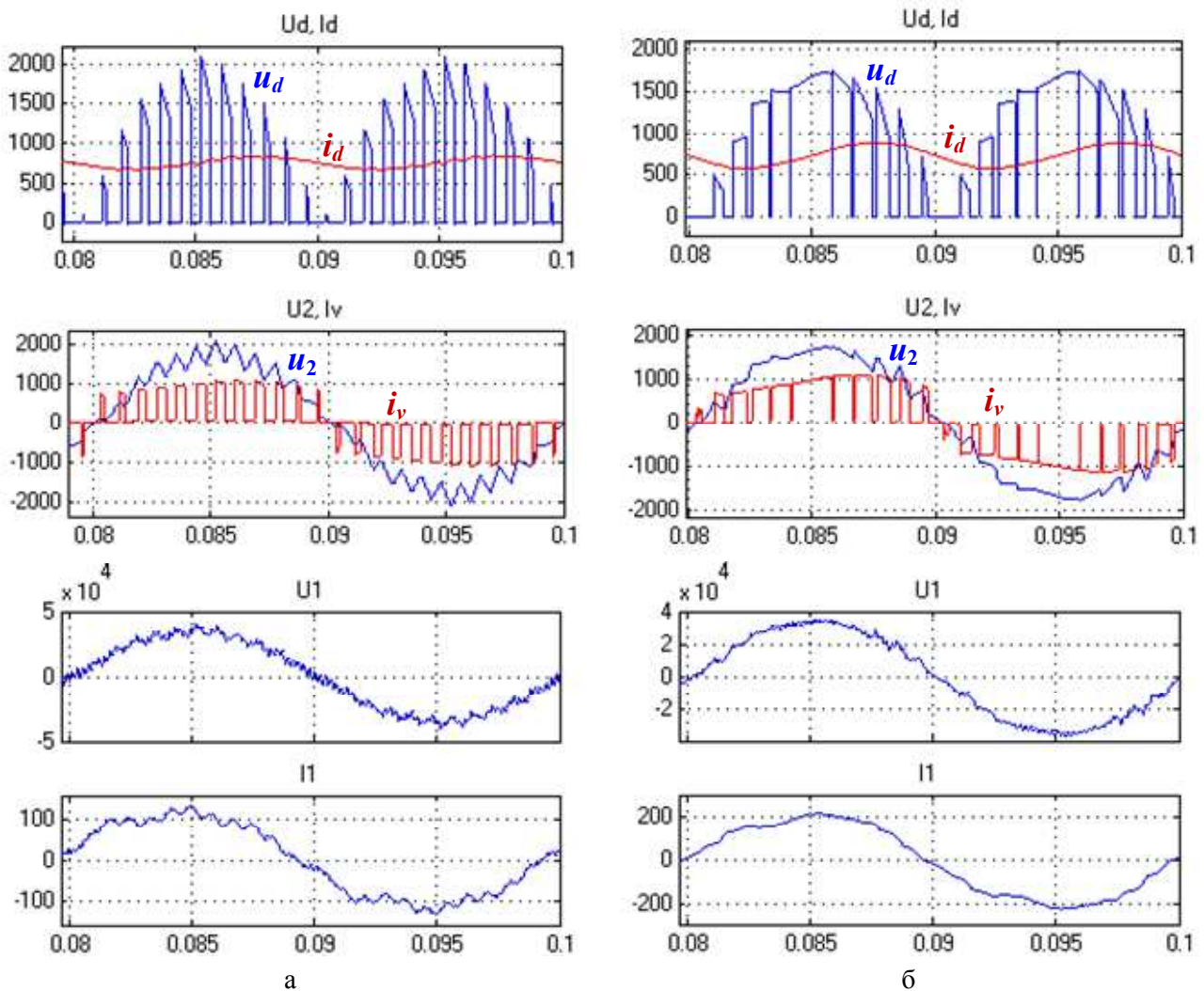


Рис. 3. Осцилограми напруги та струму електровоза з АТПр на 2 зоні:
 а — $\mu = 0,5$; б — $\mu = 1,0$; u_d, i_d — випрямлені напруга і струм;
 u_2 — напруга вторинної обмотки трансформатора; i_v — вхідний струм АТПр;
 u_1, i_1 — напруга на струмоприймачі і струм первинної обмотки трансформатора

Середній коефіцієнт потужності $K_{мс}$ у всьому діапазоні регулювання

$$K_{мс} = \left(\sum_{j=1}^m K_{mj} \right) / m, \quad (16)$$

де $j = 1 \dots m$ — номер дослід; m — кількість вимірювань.

Збільшення або зменшення середнього коефіцієнта потужності електровоза з АТПр відносно базового значення (ВП) визначимо за формулою

$$\delta_{км} = \frac{K_{мс}^{АТПр} - K_{мс}^{ВП}}{K_{мс}^{ВП}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

де $K_{мс}^{ВП}$, $K_{мс}^{АТПр}$ — відповідно середній коефіцієнт потужності електровоза з ВП і АТПр у всьому діапазоні регулювання.

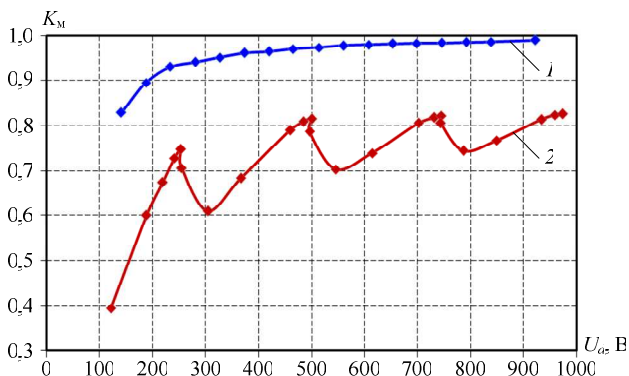


Рис. 4. Залежність коефіцієнта потужності електровоза від випрямленої напруги: 1 — АТПр; 2 — ВП

Розрахунок за формулами (16), (17) дав такі результати: $K_{mc}^{ВП} = 0,740$; $K_{mc}^{АТПр} = 0,959$. У середньому коефіцієнт потужності електровоза з АТПр вище, ніж з ВП, на $\delta_{км} = 29,6\%$. У номінальному режимі збільшення коефіцієнта потужності електровоза з АТПр у порівнянні з ВП становить $\delta_{км} = 20\%$.

Результати моделювання показали, що коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги на струмоприймачі K_U в усьому діапазоні регулювання змінюється в межах 2,58...10,63%, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму K_I — 9,14...13,07%. При цьому, як показали досліді, K_U на шинах 27,5 кВ тягової підстанції не перевищує 7% (гранично допустиме значення для даного класу напруги за ГОСТ 13109-97 — 8%).

Залежність коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги на струмоприймачі K_U від відстані від електровоза до тягової підстанції s у номінальному режимі його роботи (2 зона, $\mu = 1,0$) наведена на рис. 5.

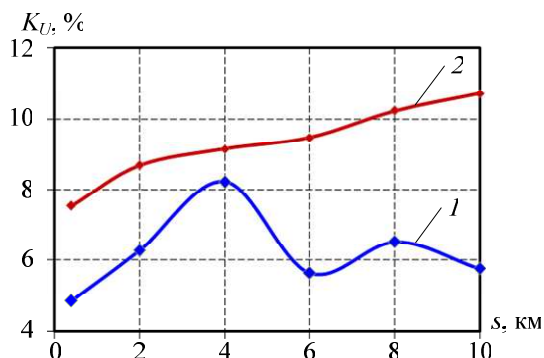


Рис. 5. Залежність коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги на струмоприймачі від відстані від електровоза до тягової підстанції: 1 — АТПр; 2 — ВП

Гармонічний склад напруги на струмоприймачі u_1 та струму первинної обмотки тягового трансформатора i_1 на 2 зоні регулювання наведено на рис. 6.

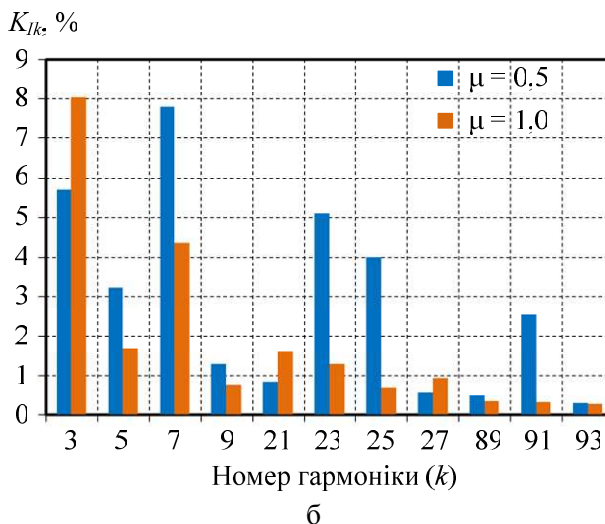
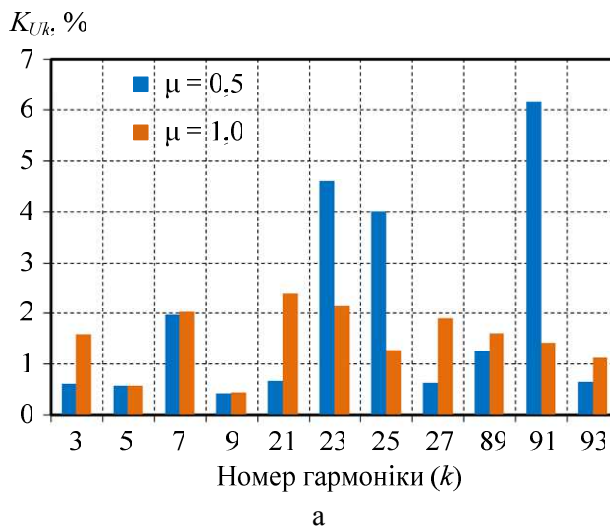


Рис. 6. Гармонічний склад напруги u_1 (а) та струму i_1 (б) електровоза з АТПр (2 зона регулювання)

Обговорення результатів моделювання активного тягового перетворювача

Результати експериментального дослідження активного тягового перетворювача на електровозі змінного струму 2ЕЛ5 показали, що робота АТПр характеризується такими енергетичними показниками:

1) у діапазоні регулювання $\mu = 0,5 \dots 1,0$ коефіцієнт потужності електровоза складає 0,93...0,97 (1 зона) і 0,96...0,99 (2 зона). З рис. 4 видно, що характер зміни коефіцієнта потужності електровоза з АТПр і ВП різний. Найбільший K_m при ВП має місце на початку і в кінці зони регулювання, а в середині зони він знижується. Коефіцієнт потужності електровоза з

АТПр при збільшенні коефіцієнта модуляції зростає за нелінійною залежністю. Результати дослідження дозволяють стверджувати, що, з точки зору споживання реактивної потужності, АТПр має переваги перед тиристорним ВПП;

2) прийнятий алгоритм управління АТПр забезпечує дотримання коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинях 27,5 кВ тягової підстанції не більше 7%. Оскільки дослідження проводились при синусоїдальній формі напруги джерела живлення, логічно припустити, що при несинусоїдальних спотвореннях, зумовлених роботою мережі зовнішнього електропостачання або інших електровозів на ділянці, несинусоїдальність напруги на струмоприймачі електровоза буде ще більшою. У такому випадку для дотримання показників якості електроенергії слід встановлювати додаткові активні фільтри на тягових підстанціях або на електроурухомих складах;

3) за рахунок активного формування струму коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму первинної обмотки трансформатора електровоза з АТПр складає 9...13%, що приблизно в 2 рази менше, ніж у тиристорного ВПП ($K_I = 20...30\%$ [3]);

4) з точки зору гармонічного складу напруги та струму, найменш вигідним є режим при $\mu \approx 0,5...0,6$. У цьому режимі найбільшу амплітуду мають гармоніки напруги 7, 23, 25, 91 та струму 3, 5, 7, 23, 25, 91. Зменшення коефіцієнта модуляції з 1,0 до 0,5 призводить до збільшення коефіцієнтів k -х гармонічних складових 23, 25, 91 гармонік напруги та 5, 7, 9, 23, 25, 91 гармонік струму. Слід відмітити, що детальне дослідження гармонічного складу напруги та струму електровоза з АТПр потребує окремого розгляду і виходить за межі даної статті.

Оскільки наявність вищих гармонічних складових в контактній мережі є небажаною, подальші дослідження повинні враховувати необхідність корекції форми напруги та струму електровоза з АТПр. Можливими шляхами вирішення цієї проблеми є застосування багаторівневої схеми випрямляча, модифікованих алгоритмів ШІМ або підключення до АТПр додаткового активного фільтра.

Слід відмітити, що модернізація існуючих серій електровозів та електропоїздів змінного струму шляхом встановлення активних тягових перетворювачів, на нашу думку, буде доцільною в умовах неможливості швидкого масового переходу локомотивного господарства залізниці на асинхронний тяговий привод. При цьому необхідно враховувати можливість продовження терміну служби модернізованого електроурухомих складах.

Висновки

1. Одним із способів підвищення енергетичних характеристик електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами є заміна діодного або тиристорного тягового перетворювача на перетворювач на повністю керованих напівпровідникових приладах. У даній роботі запропоновано і досліджено активний тяговий перетворювач з двозонним регулюванням випрямленої напруги і широтно-імпульсною модуляцією за прямокутно-ступінчастим законом при частоті модуляції 1200 Гц.

2. Результати математичного моделювання і аналіз енергетичної ефективності показали, що активний тяговий перетворювач забезпечує високий коефіцієнт потужності електровоза (0,93...0,99) і більш низький рівень несинусоїдальності струму первинної обмотки трансформатора електровоза (ТНДі до 13%) у порівнянні з тиристорним перетворювачем. Можна відмітити, що активний тяговий перетворювач при встановленні на восьмивісному електровозі змінного струму 2ЕЛ5 з колекторними тяговими двигунами дозволить забезпечити підвищення коефіцієнта потужності в номінальному режимі на 20%, що дає змогу скоротити витрати електроенергії на тягу поїздів.

3. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на корекцію форми напруги та струму електровоза з активним тяговим перетворювачем при ШІМ-регулюванні випрямленої напруги. Цю проблему можна вирішити шляхом застосування багаторівневої схеми випрямляча, модифікованих алгоритмів ШІМ або підключення додаткового активного фільтра.

Список використаних джерел

1. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст]: монографія. В 2 т. Т. 1 / Г. К. Гетьман. — Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. — 456 с.
2. Кулинич, Ю. М. Повышение энергетической эффективности пассивного компенсатора электровоза однофазно-постоянного тока [Текст] / Ю. М. Кулинич, В. К. Духовников // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2013. — № 1. — С. 44-50.
3. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения [Текст]: монографія / Ю. М. Кулинич. — Хабаровск: ДВГУПС, 2001. — 153 с.
4. Власевский, С. В. Улучшение формы напряжения контактной сети при работе электровозов с тиристорными преобразователями [Текст] / С. В. Власевский, В. Г. Скорик,

- О. В. Мельниченко // Вестник ВНИИЖТ. — 2007. — № 5. — С. 42-47.
5. Шрамко, С. Г. Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения [Текст] / С. Г. Шрамко // Вестник ИрГТУ. — 2016. — № 4 (111). — С. 192-199.
 6. Електроніка і мікросхемотехніка [Текст]: навч. посібник у 4-х т. Т. 4. Книга 1. Силова електроніка / В. І. Сенько та ін.; за ред. В. І. Сенька. — К.: Каравела, 2012. — 640 с.
 7. Испытания системы компенсации реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К [Текст] / А. С. Копанев, П. А. Хрипков, В. М. Волков, П. С. Вольт // Вестник ВЭЛНИИ. — 2010. — № 2 (60). — С. 14-36.
 8. Мельниченко, О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока [Текст]: дисс... д-ра техн. наук: спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / О. В. Мельниченко. — Хабаровск, 2015. — 392 с.
 9. Власьевский, С. В. Дальневосточный государственный университет на пути содействия инновационному развитию [Текст] / С. В. Власьевский, А. К. Пляскин, А. В. Плотников // Наука и транспорт. — 2008. — С. 58-62.
 10. Яговкин, Д. А. Разработка математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока и его блока управления в режиме тяги [Текст] / Д. А. Яговкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 3 (47). — С. 197-202.
 11. Michalik, J. Single Phase Current-Source Active Rectifier for Traction: Control System Design and Practical Problems [Text] / J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka // Advances in Electrical and Electronic Engineering. North America, 5 Jun. 2011. — P. 86-89.
 12. Michalik, J. Active Elimination of Low-Frequency Harmonics of Traction Current-Source Active Rectifier [Text] / J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka // Transactions on Electrical Engineering. — Vol. 1 (2012). — No. 1. — P. 30-35.
 13. Michalik, J. Behavior of Active Current Source Rectifier under Critical Transient Conditions in Traction [Text] / J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe. Novi Sad, Serbia, 2012. — 6 p.
 14. Стрижнев, А. Г. Синтез напряжений многократных равномерных ШИМ, созданных по ступенчатым функциям построения [Текст] / А. Г. Стрижнев, Г. В. Ледник // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 2010. — № 5. — С. 24-30.
 15. Ягуп, В. Г. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги [Текст] / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов // 36. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. — Харків: УкрДУЗТ, 2017. — Вип. 170. — С. 20-31.
- Краснов А. А., Ягуп В. Г., Божко В. В. Активный тяговый преобразователь с широтно-импульсной модуляцией для электровоза переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями.** С целью повышения энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями разработана силовая схема и алгоритм управления активного тягового преобразователя с двухзонным регулированием напряжения и широтно-импульсной модуляцией. Результаты компьютерного моделирования показали возможность повышения коэффициента мощности электровоза 2ЭЛ5 с новым преобразователем до 0,99 при несинусоидальности тока в контактной сети THDi до 13 %.
- Ключевые слова:** электровоз переменного тока, активный выпрямитель тока, коэффициент мощности, широтно-импульсная модуляция.
-
- Krasnov O., Yagup V., Bozhko V. Active traction converter with pulse-width modulation for AC electric locomotives with DC traction motors.** One way to increase the energy efficiency of AC electric locomotives with DC traction motors is to use converters on fully controlled semiconductor devices. Power circuit and control algorithm of active traction converter with two-zone voltage regulation are developed in this article. As an algorithm for controlling IGBT-transistors, rectangular-stepped pulse width modulation with a carrier frequency of 1200 Hz is used. The simulation of the active traction converter is performed in MATLAB. The results of the experiments showed that the power factor of 2EL5 electric locomotive with a new converter is 0.83...0.99 over the entire range of loads. This is more than for a thyristor rectifier. The THDi of the contact wire current is up to 13%. In further research, we must focus on finding ways to compensate for the higher harmonics of the voltage and current of an electric locomotive under PWM voltage regulation.
- Key words:** AC electric locomotive, active current-source rectifier, power factor, pulse-width modulation.
- Надійшла 01.06.2018 р.*
- Краснов Олексій Олександрович, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу «Інфраструктура залізниць та електрична тяга». Харківське відділення філії «Прокетно-вишукувальний*

інститут залізничного транспорту»
ПАТ «Укрзалізниця». E-mail: uzdlines@gmail.com.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Ягуп Валерій Григорович, д. т. н., професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст. Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: yagup.walery@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>.

Божко Володимир Вячеславович, к. т. н., с. н. с., начальник науково-дослідного відділу «Інфраструктура залізниць та електрична тяга». Харківське відділення філії «Прокетно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Укрзалізниця». E-mail: bozhkovv81@gmail.com.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6068-2881>.

Krasnov Oleksii, Leading Researcher, Department of railway infrastructure and traction, Branch "Design and survey institute of railway transport" of Public Joint-Stock Company "Ukrainian zaliznytsia". E-mail: uzdlines@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Yagup Valerii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Systems and Electric Power Supply of Cities, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: yagup.walery@gmail.com.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>.

Bozhko Volodimir, Candidate of Technical Sciences, Department Chief, Department of railway infrastructure and traction, Branch "Design and survey institute of railway transport" of Public Joint-Stock Company "Ukrainian zaliznytsia". E-mail: bozhkovv81@gmail.com.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6068-2881>.