

Підвищення енергетичних характеристик електричного рухомого складу змінного струму шляхом застосування трирівневих активних чотириквadrантних випрямлячів

О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. Л. Сушко, І. М. Рищенко,
В. Р. Цибульник, Д. А. Гордієнко

З метою мінімізації реактивної потужності та вищих гармонік струмів, а також поліпшення електромагнітної сумісності мереж тягового електропостачання та систем залізничної автоматики на сучасному електричному рухомому складі змінного струму використовують активні чотириквadrантні випрямлячі. Класичною топологією даного перетворювача є дворівневий повномостовий активний випрямляч, який забезпечує коефіцієнт потужності близький до одиниці та рекуперацію енергії в мережу живлення. Однак висока частота комутації зумовлює високі динамічні втрати в силових транзисторах та низьке значення ККД.

Перспективним є використання трирівневих активних чотириквadrантних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності. В роботі запропонована система керування трирівневого активного випрямляча з двоканальною рівнезсунутою синусоїдальною ШІМ. Перевагою запропонованого алгоритму керування у порівнянні з відомими є покращення якості вхідного струму та зниження частоти комутації силових ключів, що призводить до зменшення втрат потужності та збільшення ККД випрямляча. Представлено результати порівняльного аналізу залежностей втрат потужності та ККД від частоти комутації силових ключів для дворівневого й трирівневого активного випрямляча з запропонованою системою керування, який підтвердив доцільність запропонованої системи керування. У програмі Matlab 2017b проведено імітаційне моделювання дворівневого та трирівневого активного випрямляча, на підставі якого здійснено аналіз параметрів якості електричної енергії, визначено залежність коефіцієнта гармонічних спотворення вхідного струму активного випрямляча від частоти комутації силових ключів. На підставі проведених досліджень доведена технічна та економічна доцільність використання схеми трирівневого активного випрямляча з системою керування на базі двоканальної рівнезсунутої синусоїдальної ШІМ

Ключові слова: трирівневий активний випрямляч, широтно-імпульсна модуляція, частота комутації, коефіцієнт потужності, енергоефективність

1. Вступ

Вхідними перетворювачами електрорухомого складу (ЕРС) змінного струму найбільш часто є діодні та тиристорні випрямлячі. Ці перетворювачі обумовлюють споживання реактивної потужності з мережі живлення, а також обумовлюють значну емісію вищих гармонік споживаних струмів. Це призводить до

збільшення додаткових втрат в системах електропостачання [1–3], а також погіршення електромагнітної сумісності мереж тягового електропостачання та систем залізничної автоматики [4, 5].

В останні роки на електрорухомому складі все частіше застосовуються дворівневі активні чотириквADRантні випрямлячі, відомі як 4QS-випрямлячі [6, 7]. Структуру тягового електроприводу електровоза змінного струму з дворівневим 4QS-випрямлячем наведено на рис. 1. Їх перевагою в порівнянні з класичними діодними та тиристорними випрямлячами є можливість реалізації синусоїдальної форми споживаного струму, забезпечення значення коефіцієнта потужності близького до одиниці ($> 99\%$) і рекуперації енергії в мережу живлення. Крім цього можливість плавного регулювання пуску електрорухомого складу дозволяє знизити динамічні навантаження на його механічну складову [8]. Однак дана топологія не позбавлена недоліків.

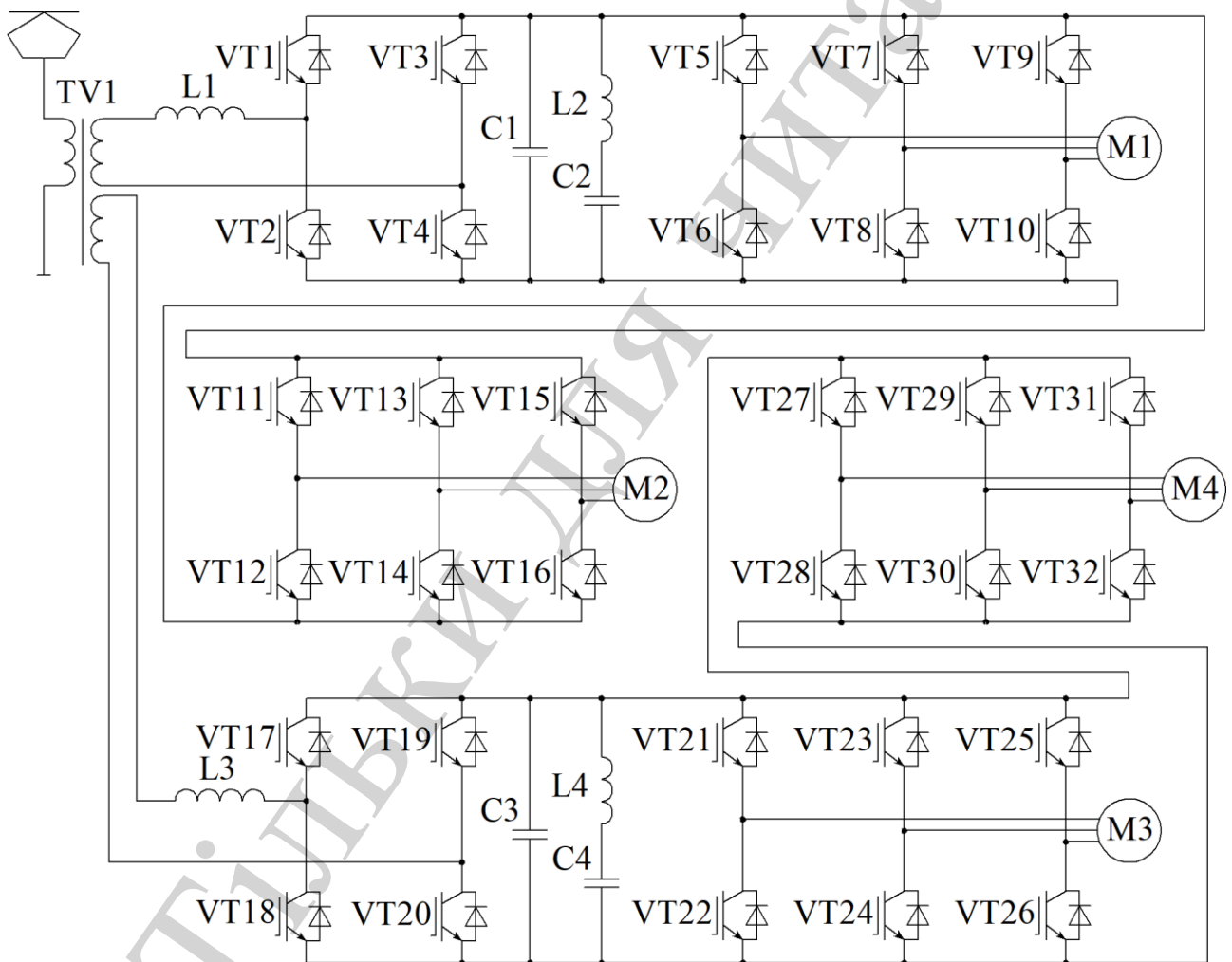


Рис. 1. Структура тягового електроприводу електровоза змінного струму з входними дворівневими 4QS-перетворювачами

Серед недоліків дворівневих 4QS-випрямлячів необхідно звернути увагу на необхідність застосування високовольтних IGBT ключів. При цьому необхідність формування високої частоти комутації силових ключів веде до досить

великих динамічних втрат в силових ключах з більш низьким ККД в порівнянні з діодними та тиристорними випрямлячами. У зв'язку з цим актуальним завданням є пошук рішень для підвищення ККД активних чотириквadrантних випрямлячів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Значення реалізованих енергетичних характеристик активних випрямлячів в значній мірі залежить від обраного алгоритму модуляції та обраної силової схеми.

У роботах [9, 10] наведено результати дослідження дворівневих активних випрямлячів, система керування яких заснована на гістерезисній модуляції. Недоліком систем керування активних випрямлячів з гістерезисним алгоритмом комутації ключів є змінна та досить висока частота комутації силових транзисторів (більше декількох десятків кГц). Висока частота комутації з одного боку зумовлює високу якість електроенергії, проте з іншого боку зумовлює високі динамічні втрати в силових транзисторах та низьке значення ККД.

У роботі [11] наведено результати дослідження дворівневого активного випрямляча з системою керування (СК), яка побудована на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ). Наявність ШІМ в СК дозволяє забезпечити меншу та постійну частоту комутації силових ключів (≈ 1 кГц), що призводить до зниження динамічних втрат і підвищення ККД. Проте зі зниженням частоти комутації силових ключів спостерігається і зниження якості електроенергії.

У роботі [12] досліджено підвищення синусоїдальності вхідного струму в активних дворівневих випрямлячах з ШІМ, яке досягнуто при реалізації алгоритму інтерлівінгу. Інтерлівінг – це режим взаємної компенсації вищих гармонік у вхідних струмах у двох або декількох перетворювачах, які живляться від однієї електромережі. Проте алгоритми інтерлівінгу можуть бути використані лише в системах, де використовуються декілька активних випрямлячів, що живляться від однієї мережі.

У роботах [13, 14] проведено дослідження порівняльних показників втрат в силових IGBT ключах різних класів. В ЕРС у схемі дворівневого активного випрямляча ключів необхідним є використання ключів більш високого класу (6,5 кВ або 4,5 кВ) за номінальною напругою, які мають, у порівнянні з ключами меншого класу напруги, більші значення статичних і динамічних втрат. Це призводить до надлишкових втрат потужності в перетворювачі. На базі цих досліджень дано гіпотезу, що перспективним шляхом підвищення енергоефективності електрорухомого складу змінного струму є застосування топології трирівневого активного випрямляча (рис. 2).

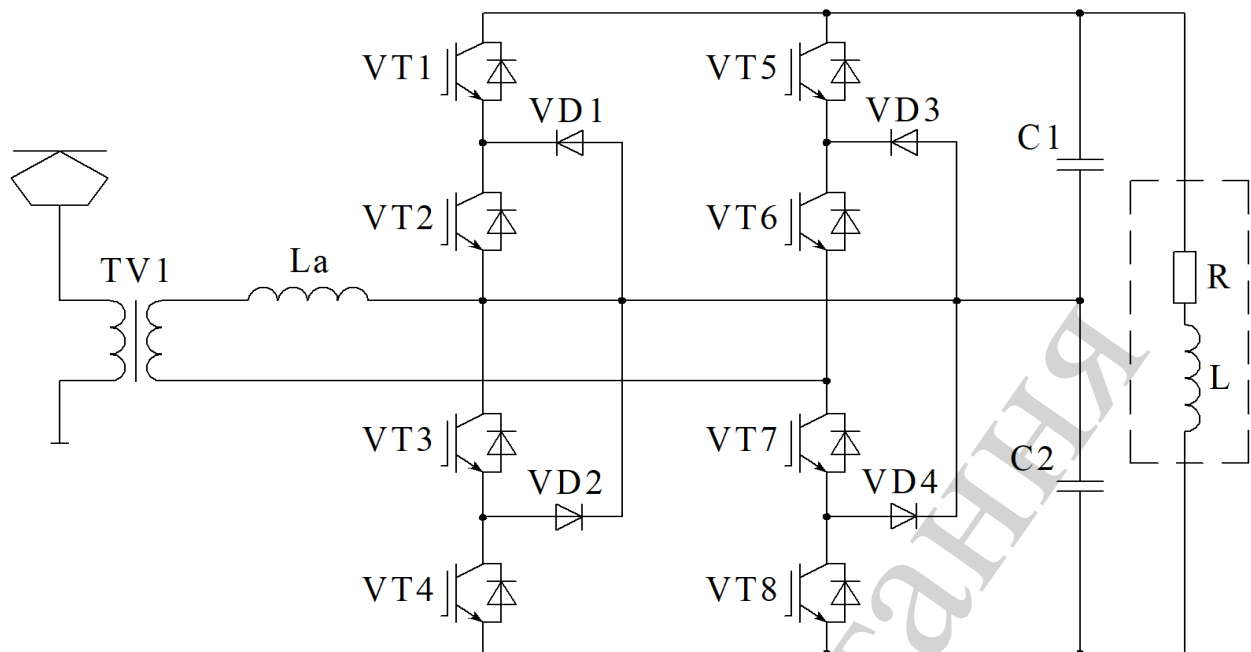


Рис. 2. Схема тривіневого активного випрямляча

На рис. 2 представлено струмоприймач, вхідний понижуючий трансформатор, тривіневий активний випрямляч, ємнісний фільтр та еквівалентне RL-навантаження.

У порівнянні з дворівневим активним випрямлячем, схема тривіневого активного випрямляча містить удвічі більше IGBT-транзисторів та чотири додаткові силові діоди. Проте тривінева схема дозволяє використовувати ключі з номінальною напругою у два рази нижче. Таким чином, невирішеною технічною задачею є дослідження та обґрунтування використання схеми однофазного тривіневого активного випрямляча ЕРС змінного струму.

Варто відзначити, що до теперішнього часу на електрорухомому складі змінного струму схема тривіневого активного випрямляча не застосовувалася.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності електрорухомого складу змінного струму шляхом застосування тривіневих активних випрямлячів в режимі тяги, ще досягається зниженням емісії реактивної потужності, зниженням емісії вищих гармонік вхідного струму та підвищенням ККД.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- визначити втрати потужності, енергетичні та вартісні характеристики силових IGBT-транзисторів для дворівневого та тривіневого активного випрямляча;
- визначити залежність ККД дворівневого та тривіневого активного випрямляча від частоти комутації силових ключів;
- провести опис запропонованого алгоритму керування силових ключів тривіневого активного випрямляча, який забезпечує покращення синусоїдальності вхідного струму;
- визначити залежність коефіцієнта гармонічних спотворення вхідного струму активного випрямляча від частоти комутації силових ключів;

– обґрунтувати енергозберігаючий ефект від застосування топології трирівневого активного випрямляча з запропонованою системою керування на базі двоканальної фазо-зсунутої синусоїдальної ШІМ шляхом імітаційного моделювання.

4. Порівняння втрат потужності в дворівневому та трирівневому активному випрямлячі з класичною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією

Визначення втрат потужності в IGBT-транзисторах може бути виконано шляхом розрахунку статичних P_{DC} та динамічних P_{SW} втрат в IGBT-транзисторах і паралельних діодах [14, 15].

$$P = P_{DC} + P_{SW}, \quad (1)$$

де P_{DC} – статичні втрати в IGBT-транзисторах; P_{SW} – динамічні втрати в IGBT-транзисторах.

Процес комутації струму та напруги в IGBT-ключі й графічне розподілення статичних і динамічних втрат наведено на рис. 3.

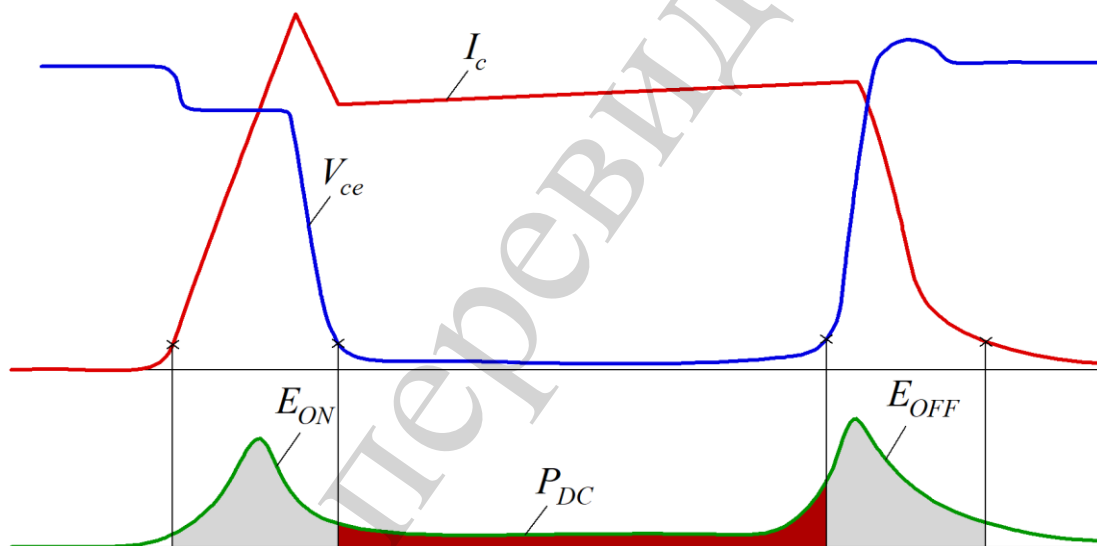


Рис. 3. Процес комутації струму та напруги в IGBT-ключі

Статичні втрати в IGBT-транзисторах P_{DC} визначаються відповідно до виразу:

$$P_{DC} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} (I_c \cdot V_{ce}(I_c) \cdot D_{on}) \cdot dt, \quad (2)$$

де I_c – струм колектора; $V_{ce}(I_c)$ – напруга між колектором і емітером, що залежить від величини струму колектора (залежність $V_{ce}(I_c)$ представлена в документації на транзистор); D_{on} – коефіцієнт заповнення ШІМ.

Динамічні втрати в IGBT-транзисторах P_{SW} визначаються відповідно до виразу:

$$P_{SW} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} [(E_{ON}(I_c) + E_{OFF}(I_c) \cdot f)] dt, \quad (3)$$

де f – частота ШІМ; $E_{ON}(I_c)$ – енергія, що розсіюється в транзисторі при вмиканні, яка залежить від величини струму колектора; $E_{OFF}(I_c)$ – енергія, що розсіюється в транзисторі при вимиканні, яка залежить від величини струму колектора.

Застосування трирівневої топології активного випрямляча дозволяє застосовувати ключі меншого класу для реалізації тієї ж напруги в колі постійного струму. При цьому характерною рисою ключів меншого класу є менше падіння між колектором та емітером, а також менша енергія перемикавання [16, 17].

Характеристики IGBT-транзисторів різних класів, розрахованих на один струм, наведено в табл. 1.

Таблиця 1
Характеристики IGBT-транзисторів різних класів

Тип	Струм, А	Напруга, В	V_{ce} , В	E_{ON} , Дж/імп	E_{OFF} , Дж/імп	Ціна, \$
CM750HG-130R	750	6600	3,8 (при 25 °C) 4,8 (при 125 °C)	3,5 (при 25 °C) 4,4 (при 125 °C)	3,4 (при 25 °C) 4,9 (при 125 °C)	929
CM800HC-90R	800	4500	3,5 (при 25 °C) 4,5 (при 125 °C)	3,1 (при 25 °C) 3,8 (при 125 °C)	2,15 (при 25 °C) 2,85 (при 125 °C)	714
CM800HC-66H	800	3300	3,3 (при 25 °C) 3,6 (при 125 °C)	1,4 (при 25 °C) 1,7 (при 125 °C)	2,15 (при 25 °C) 2,85 (при 125 °C)	450
CM800HB-50H	800	2500	2,8 (при 25 °C) 3,15 (при 125 °C)	0,65 (при 25 °C) 0,80 (при 125 °C)	0,75 (при 25 °C) 0,96 (при 125 °C)	397
CM800HA-34H	800	1700	2,75 (при 25 °C) 3,15 (при 125 °C)	0,3 (при 25 °C) 0,37 (при 125 °C)	0,3 (при 25 °C) 0,39 (при 125 °C)	285
CM800DX-24T1	800	1200	1,9 (при 25 °C) 2,15 (при 125 °C)	0,08 (при 25 °C) 0,1 (при 125 °C)	0,084 (при 25 °C) 0,11 (при 125 °C)	105

Вольт-амперні характеристики транзисторів $V_{ce}(I_c)$, а також залежності енергії перемикання від комутованого струму $E_{ON}(I_c)$ і $E_{OFF}(I_c)$ для описаних в табл. 1 IGBT-транзисторів наведено на рис. 4.

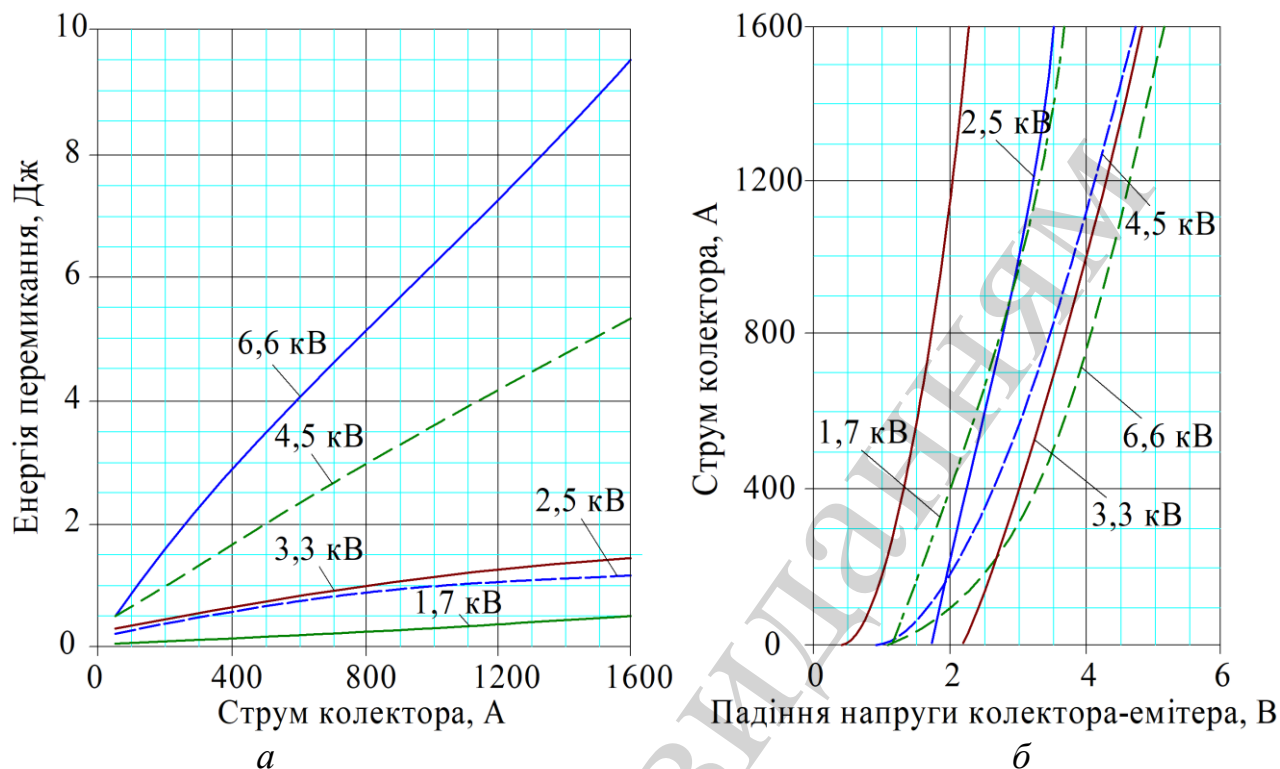


Рис. 4. Характеристики IGBT-транзисторів: *a* – залежність енергії перемикання IGBT різних класів від струму; *б* – залежність падіння напруги колектора-емітера від струму

Як видно з залежностей, приведених на рис. 4, при тій же частоті комутації і при тому ж струмі навантаження, ключі вдвічі меншого класу мають значно менші втрати на перемикання.

Чисельний розрахунок втрат потужності в потужних високовольтних IGBT-транзисторах в складі дворівневих і триврівневих інверторів напруги було проведено в спеціалізованій програмі MelcoSim 5.4 від компанії Mitsubishi (рис. 5). Перевагою цієї програми є урахування реальних характеристик транзисторів, заявлених виробником Mitsubishi.

Розрахунок втрат потужності для триврівневого активного випрямляча було проведено для IGBT транзисторів 33-го класу типу CM800HG-90R і діодів типу RM1200DB-66S.

Для дворівневого активного випрямляча розрахунок втрат виконано для транзисторів 65-го класу типу CM750HG-130R. Розрахунок було проведено при таких вихідних даних: напруга в колі постійного струму – 3,3 кВ, струм в фазі – 400 А, тип модуляції – синусоїдальна ШІМ.

Результати розрахунку втрат потужності в зазначених IGBT модулях для дворівневого та триврівневого активного випрямляча наведено на рис. 6.

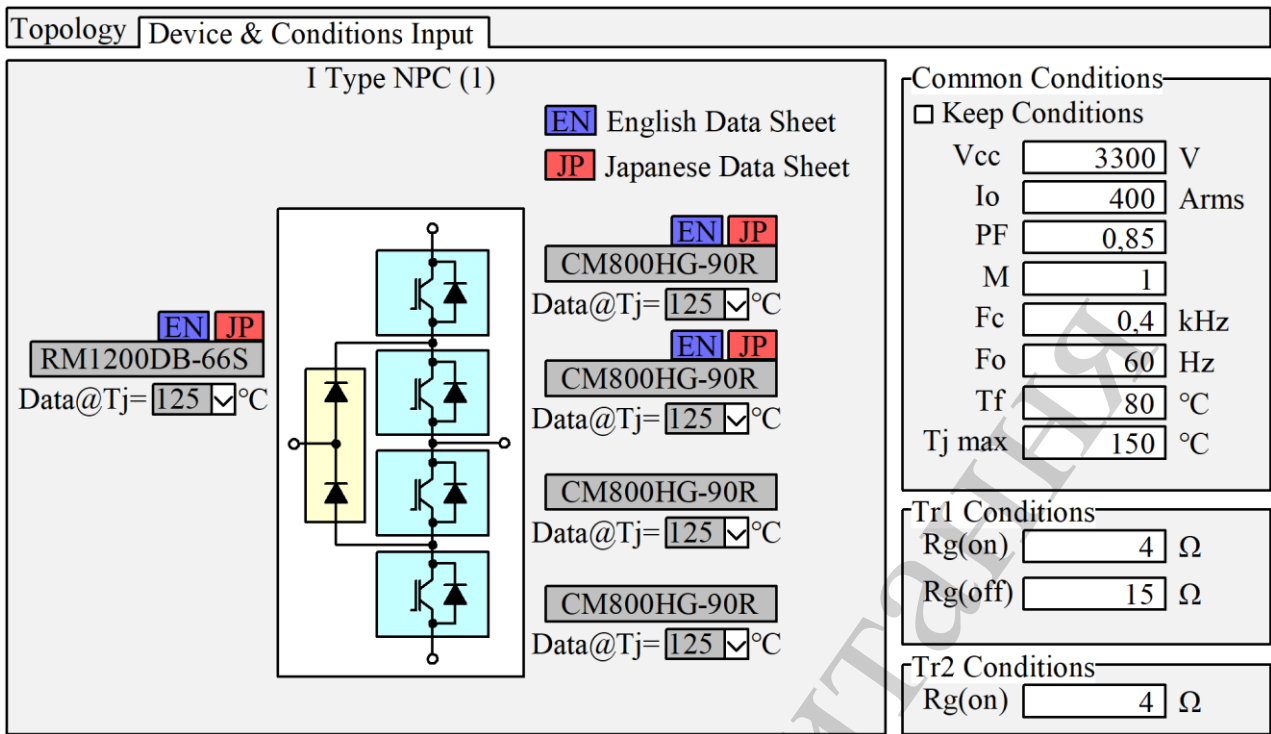


Рис. 5. Інтерфейс програми MelcoSim 5.4 при розрахунку втрат в трирівневому активному випрямлячі

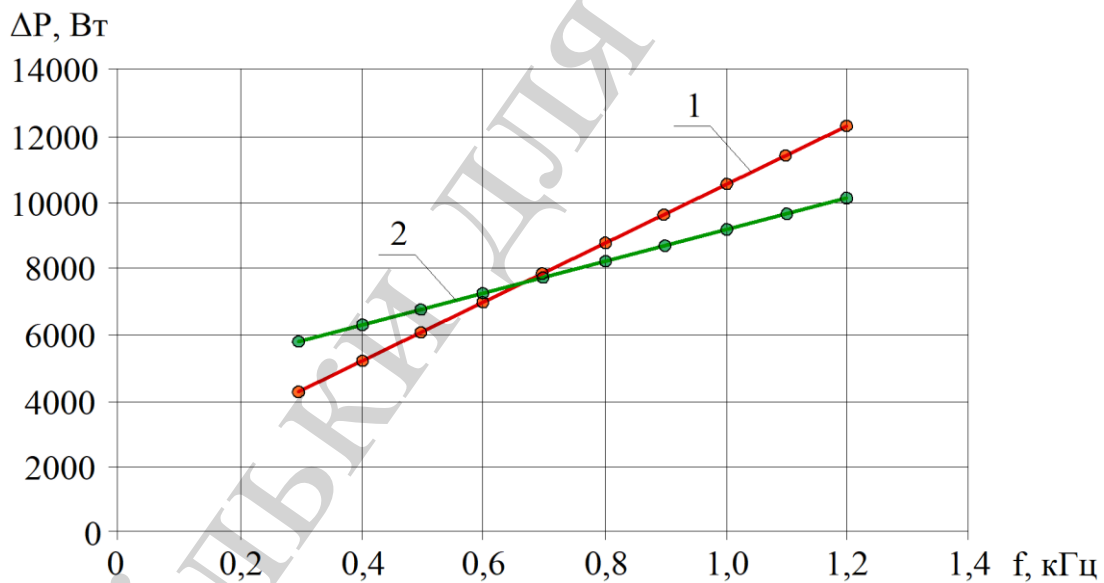


Рис. 6. Залежність втрат потужності від частоти: 1 – для дворівневого АІН; 2 – для трирівневого АІН

Залежність ККД дворівневого та трирівневого активного випрямляча (без урахування втрат в активному опорі провідників) від частоти комутації наведено на рис. 7.

Як видно з рис. 6, починаючи від частоти 700 Гц втрати в трирівневій топології стають нижче втрат відносно дворівневої, а ККД (рис. 7) стає вище, що свідчить про доцільність застосування даної топології на зазначених частотах.

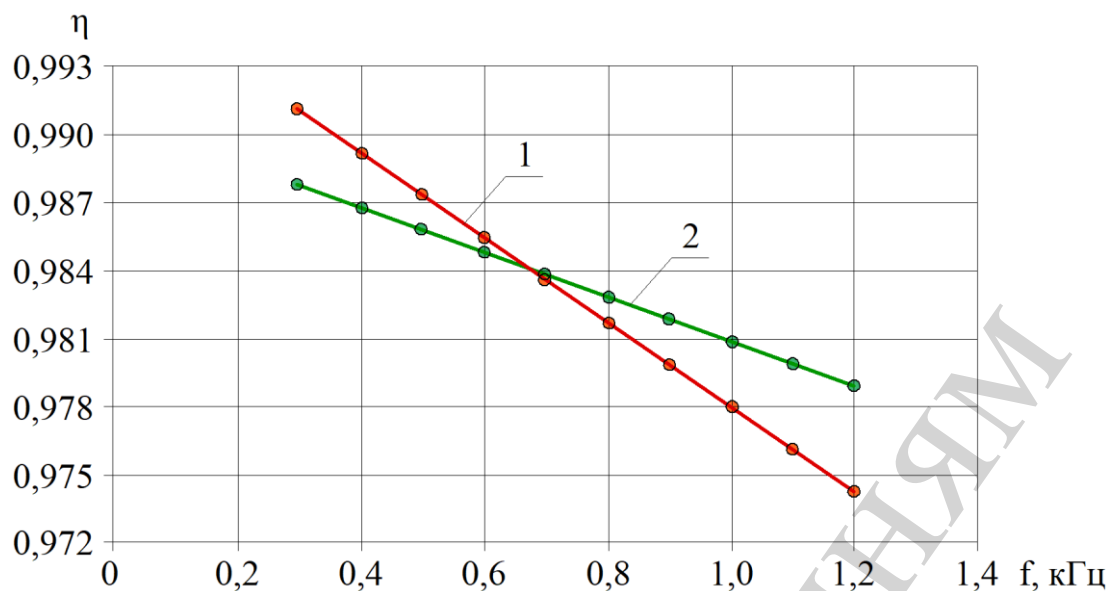


Рис. 7. Залежність ККД від частоти комутації: 1 – в дворівневому активному випрямлячі; 2 – в трирівневому активному випрямлячі

5. Алгоритми модуляції в трирівневих активних випрямлячах

В однофазних трирівневих активних випрямлячах, по аналогії з трирівневими автономними інверторами напруги, використовується одноканальна рівне-зсунута ШІМ (рис. 8). Особливістю такого алгоритму модуляції є те, що вхідний струм однофазного трирівневого активного випрямляча комутується з частотою опорного сигналу.

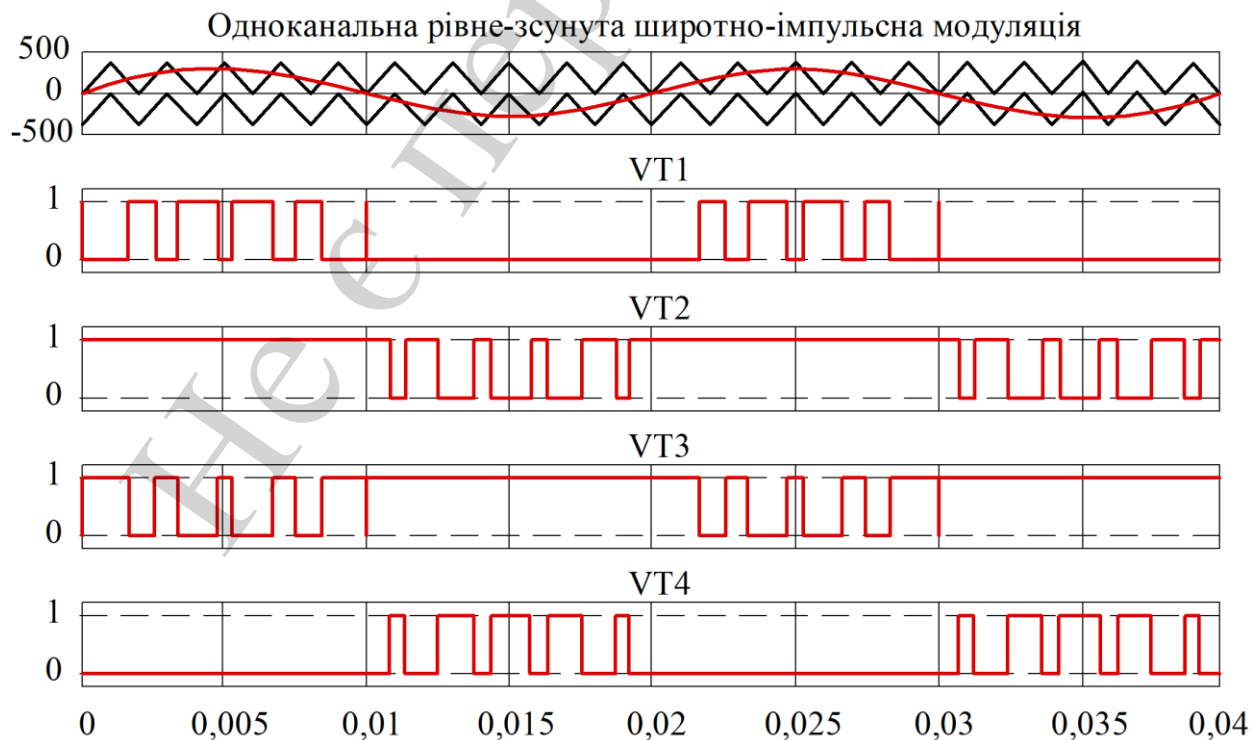


Рис. 8. Одноканальна синусоїдальна рівне-зсунута ШІМ

Запропоновано застосування двоканальної рівне-зсунутої широтно-імпульсної модуляції (ДРЗ-ШІМ), (рис. 9).

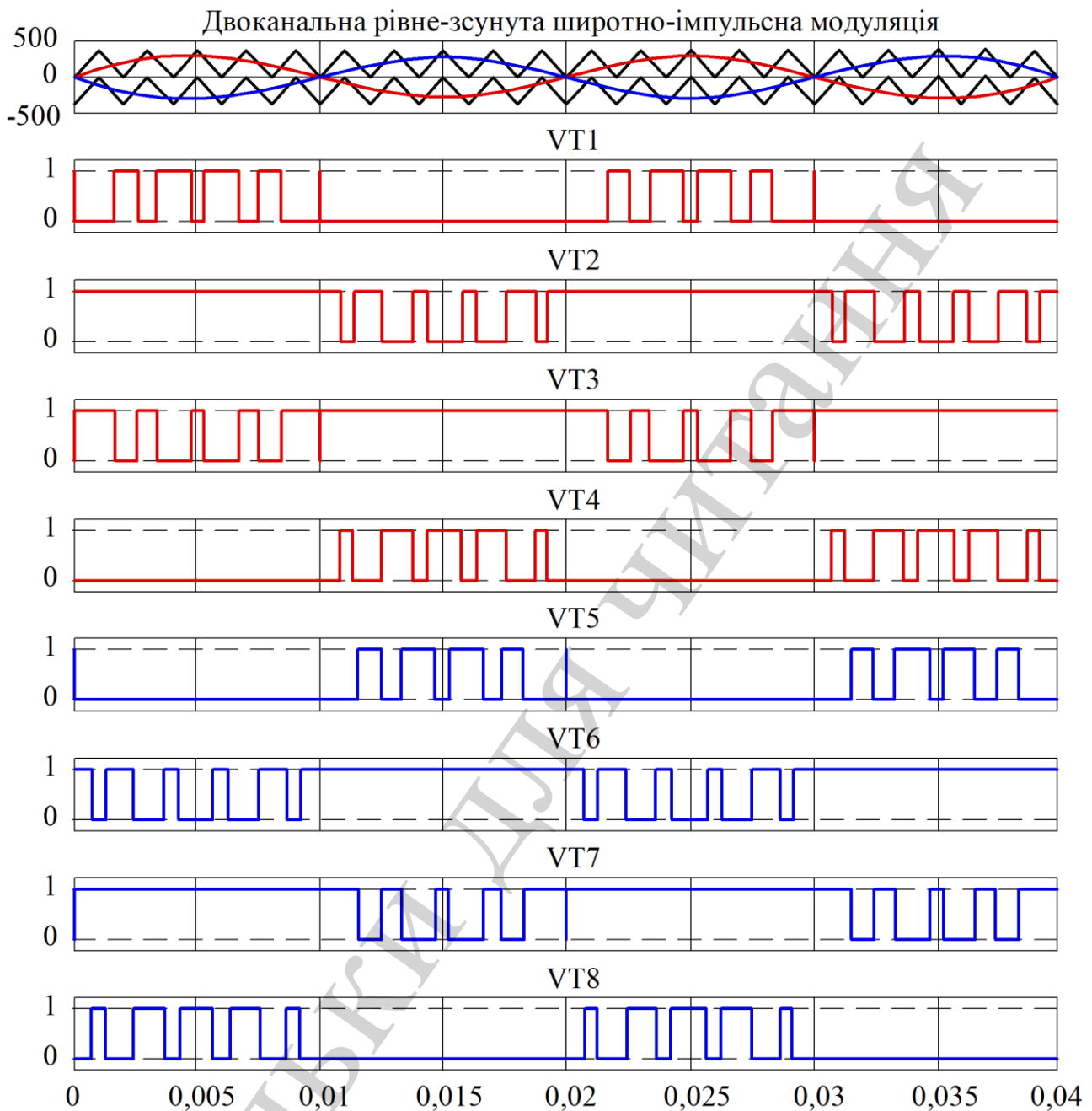


Рис. 9. Двоканальна синусоїдальна рівне-зсунута ШІМ

Значення запропонованої двоканальної ШІМ полягає в доданні в алгоритм модуляції додаткового інверсного синусоїдального сигналу завдання. Цим досягається таке: при тій же частоті комутації силових ключів частота комутації фазного струму подвоюється. Це призводить до підвищення синусоїдальності струму споживаного з мережі живлення. Підвищення синусоїдальності струму призводить до зниження емісії вищих гармонік струму.

6. Імітаційне моделювання

Для дослідження та порівняння якісних показників електромагнітної сумісності дворівневих та трирівневих активних випрямлячів з мережею живлення в середовищі Matlab 2017b було розроблено відповідні імітаційні моделі (рис. 10).

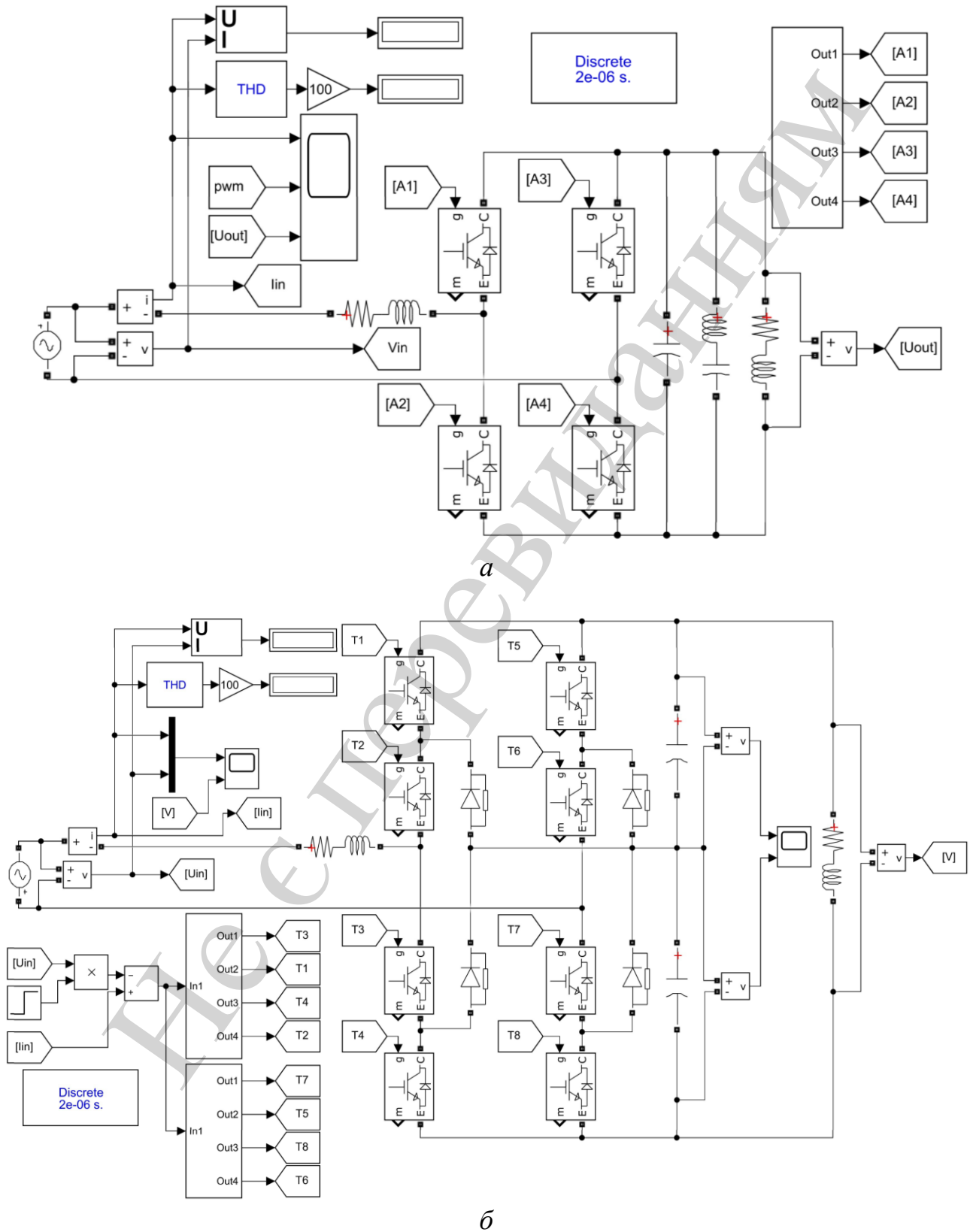


Рис. 10. Імітаційні моделі активних випрямлячів: *а* – дворівневого; *б* – трирівневого

Параметри імітаційної моделі: амплітуда вхідної напруги 600 В; індуктивність вхідного реактора 0,5 мГн, ємність вихідного конденсатора 24 мФ, вихідна напруга 800 В, вихідна потужність 320 кВт. Моделювання проводилося при вирішенні диференціальних рівнянь, що описують моделі, при використанні оператора `ode23tb`, який використовує неявний метод Рунге-Кутта на початку рішення і метод, який використовує формули зворотного диференціювання 2-го порядку в подальшому. Допустима відносна похибка розрахунку 0,01 %.

Важливою властивістю активних випрямлячів є можливість рекуперації енергії до мережі живлення. Процес переходу активного трирівневого активного випрямляча з режиму випрямлення до режиму рекуперації наведено на рис. 11.

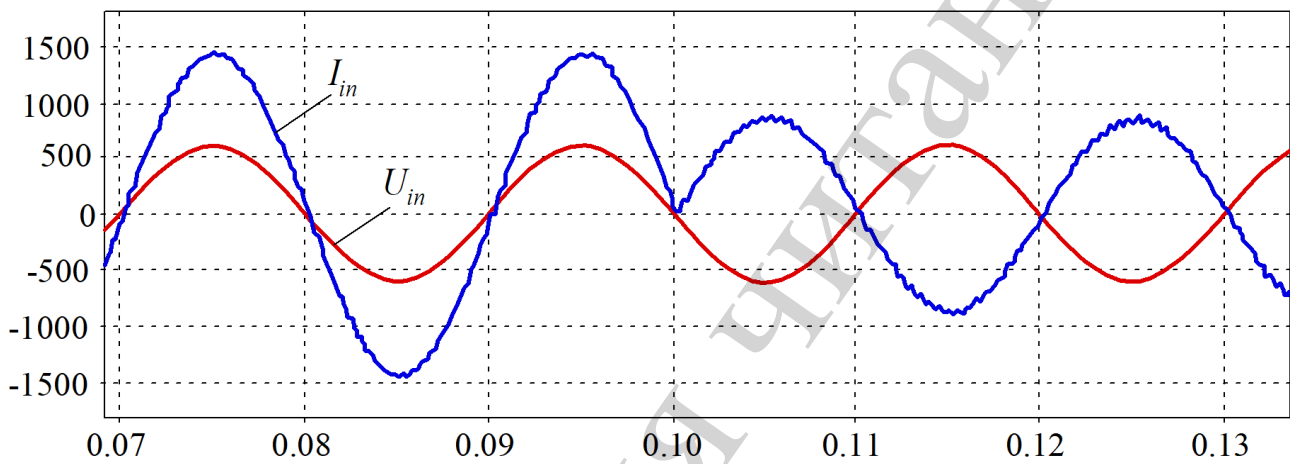


Рис. 11. Осцилограми вхідного струму та вхідної напруги трирівневого активного випрямляча при переході з режиму випрямлення до режиму рекуперації

Як видно з рис. 11, перехід від режиму випрямлення до режиму рекуперації доцільно проводити в момент перетину миттєвого значення вхідної напруги в області нуля.

Результати гармонійного аналізу форми вхідного струму дворівневого та трирівневого активного випрямляча в режимі тяги при частоті комутації IGBT-ключів 1 кГц наведено на рис. 12.

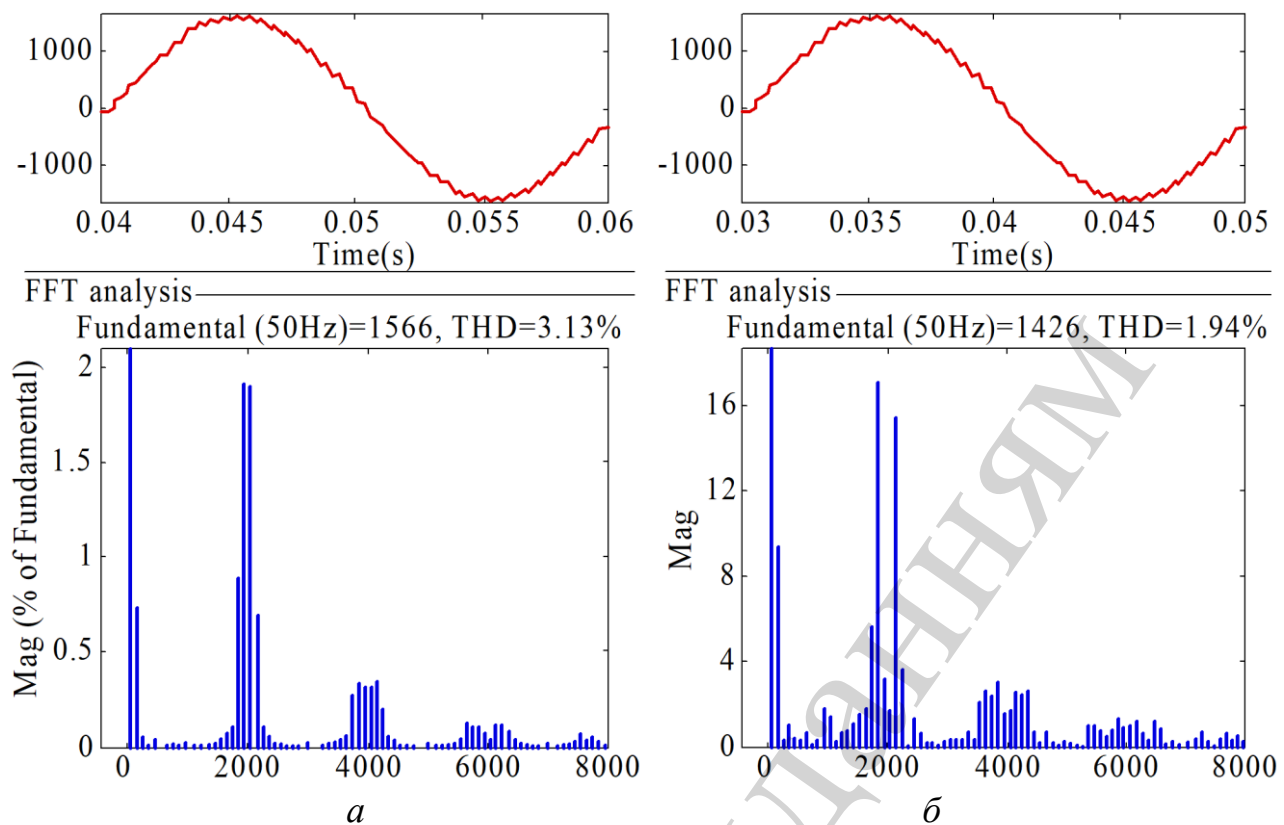


Рис. 12. Результати моделювання: *а* – дворівневого активного випрямляча; *б* – тривірневого активного випрямляча

Оцінка якості роботи активних випрямлячів проводилася шляхом порівняння значення коефіцієнтів потужності ζ і коефіцієнтів гармонік (англ. – total harmonic distortion або THD) вхідного струму. Коефіцієнт гармонічних спотворень вхідного струму розраховується відповідно до виразу:

$$THD = \frac{I_H}{I_1}, \quad (4)$$

де I_H – середньоквадратичне значення суми вищих гармонік струму; I_1 – середньоквадратичне значення першої гармоніки струму.

Значення I_{H_RMS} визначається відповідно до виразу:

$$I_{H_RMS} = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=m} I_n^2}, \quad (5)$$

де m – число вищих гармонік; I_n – n -а вища гармоніка струму.

Відповідно, чим менше значення THD, тим менше вміст вищих гармонік в струмі й тим менші додаткові втрати в мережі.

Коефіцієнт потужності ζ було розраховано відповідно до виразу:

$$\xi = \frac{P_1}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\alpha)}{U \cdot I}, \quad (6)$$

де P_1 – середньоквадратичне значення потужності першої гармоніки; U_1 – середньоквадратичне значення напруги першої напруги; S – повна потужність.

В ході моделювання було отримано залежності значень коефіцієнтів гармонічних значень вхідного струму дворівневого та трирівневого активного випрямляча в залежності від частоти комутації IGBT, що наведено на рис. 13.

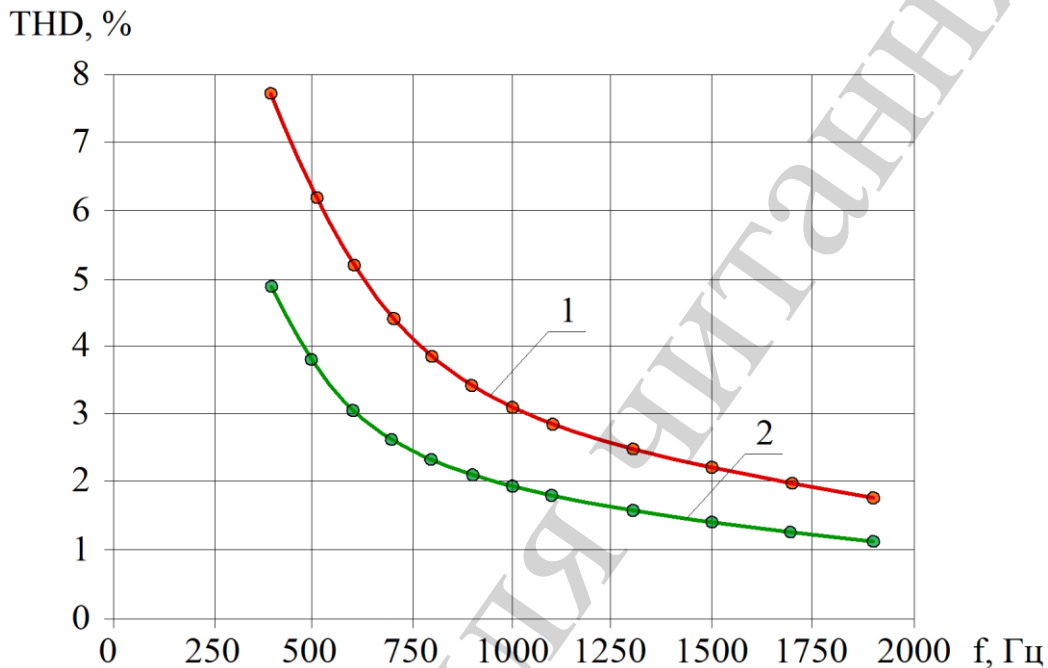


Рис. 13. Залежність THD вхідного струму активного випрямляча від частоти комутації IGBT ключів: 1 – дворівневого активного випрямляча; 2 – трирівневого активного випрямляча з двоканальною рівне-зсунутою синусоїдальною ШІМ

З отриманих залежностей на рис. 13 видно, що в повному діапазоні зміни частоти комутації силових транзисторів трирівневий активний випрямляч реалізує покращені показники синусоїдальності вхідного струму та зумовлює меншу емісію вищих гармонік струмів.

Отримані енергетичні показники роботи дворівневого та трирівневого активного випрямляча при частоті комутації IGBT 1 кГц наведено в табл. 2.

Вибір реальної топології активного випрямляча залежить від багатьох складових, таких як вартість, ККД і якісні показники роботи, а саме коефіцієнт потужності й коефіцієнт гармонічних спотворень. При цьому трирівнева топологія краща за всіма вищезазначеними показниками, що зумовлює доцільність її використання.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз показників роботи дворівневого та трирівневого активного випрямляча

Показник	Дворівневий активний випрямляч з двоканальною ШІМ	Трирівневий активний випрямляч з одноканальною ШІМ	Трирівневий активний випрямляч з двоканальною ШІМ
Частота комутації IGBT, Гц	1000	1000	1000
Коефіцієнт гармонічних спотворень вхідного струму, %	3,13	3,83	1,94
Коефіцієнт потужності, %	99,63	99,72	99,77
Коефіцієнт гармонічних спотворень вихідної напруги, %	3,6	5,26	7,2
ККД, %	97,8	98,1	98,55

7. Обговорення результатів дослідження трирівневого активного випрямляча

Проведені дослідження підтверджують доцільність використання на ЕРС змінного струму схеми трирівневого активного випрямляча з системою керування на базі ДРЗ-ШІМ. Схема трирівневого активного випрямляча у порівнянні з дворівневою схемою має більше значення ККД, меншу вартість силових транзисторів та обумовлює реалізацію меншої емісії вищих гармонік, що підтверджується розрахунками та імітаційним моделюванням.

Отримані результати пояснюються тим, що схема трирівневого активного випрямляча дозволяє використовувати IGBT-ключі з удвічі меншою номінальною напругою, які мають менші статичні та динамічні втрати.

Особливістю запропонованої системи керування з ДРЗ-ШІМ є можливість реалізації подвоєння частоти комутації вхідного струму відносно тактової частоти ШІМ. Це дозволяє при тих же втратах потужності в перетворювачі отримати покращені показники якості вхідного струму.

Обмеження даного дослідження пов'язані з тим, що запропонована система керування ДРЗ-ШІМ може працювати з коефіцієнтом модуляції в діапазоні від 0 до 1 і в режимі перемодуляції працювати не може.

До недоліків вказаного дослідження варто віднести відсутність врахування під час імітаційного моделювання впливу імпульсного характеру навантаження трирівневого активного випрямляча. Проте це буде виконано в наступних роботах.

У розвитку цього дослідження трирівневого активного випрямляча з ДРЗ-ШІМ необхідним є подальше створення математичних моделей електромагнітних процесів, синтез системи автоматичного регулювання вихідної напруги та дослідження режиму рекуперації енергії до живлячої мережі. Після завершення

теоретичної частини необхідним є створення експериментального макетного зразка перетворювача.

8. Висновки

1. Виконано порівняльний аналіз статичних та динамічних втрат потужності дворівневого та трирівневого активного випрямляча при використанні транзисторів CM800HG-90R (33-го класу для трирівневої структури) та транзистора CM750HG-130R (65-го класу для дворівневої структури) виробництва компанії Mitsubishi. Показано, що застосування трирівневого активного випрямляча доцільно при реалізації частоти комутації більше 700 Гц. При цьому перевага полягає в отриманні більш високого значення ККД і меншого значення вмісту вищих гармонік вхідного струму. При цьому проведений аналіз вартості силових ключів показав, що схема трирівневого активного випрямляча має меншу вартість.

2. Для трирівневого активного випрямляча запропоновано двоканальну рівне-зсунуту синусоїдальну ШІМ, яка дозволяє при тій же частоті комутації силових ключів забезпечити подвоєння частоти комутації вхідного струму, чим досягається покращення його синусоїдальності.

3. Для дворівневого та трирівневого активного випрямляча отримано такі енергетичні залежності:

- залежність THD вхідного струму від частоти комутації IGBT ключів;
- залежність ККД від частоти комутації IGBT ключів.

Таким чином, проведене дослідження дає змогу зробити висновки, що використання схеми трирівневого активного випрямляча з системою керування на базі двоканальної рівне-зсунутої синусоїдальної ШІМ є технічно та економічно виправдане.

Література

1. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Ryshchenko, I., Zinchenko, O., Tykhonravov, S., Hordiienko, D. (2019). Determining additional power losses in the electricity supply systems due to current's higher harmonics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (8 (97)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155672>
2. Жежеленко, И. В. (2010). Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. Москва: Энергоатомиздат, 375.
3. Люতারевич, А. Г., Вырва, А. А., Долингер, С. Ю., Осипов, Д. С., Четверик, И. Н. (2009). Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения. *Омский научный вестник*, 1, 109–113.
4. Жежеленко, И. В., Шидловский, А. К., Пивняк, Г. Г. (2012). Электромагнитная совместимость потребителей. Москва: Машиностроение, 351.
5. Бадер, М. П. (2014). Анализ и синтез электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения и инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением. *Електрифікація транспорту*, 7, 78–83.
6. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Гладка, А. В. (2018). Покращення електромагнітної сумісності тягового електропривода змінного струму шляхом

застосування 4QS-випрямлячів. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 178, 21–28. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.138906>

7. Blahnik, V., Talla, J. (2016). Single-phase synchronization for traction active rectifier. 2016 International Conference on Applied Electronics (AE). doi: <https://doi.org/10.1109/ae.2016.7577233>

8. Щербак, Я. В., Плахтій, О. А., Нерубацький, В. П. (2017). Регульовальні характеристики активного чотириквadrантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації. Технічна електродинаміка, 6, 26–31. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.026>

9. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P. (2017). The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. Scientific bulletin of National mining university, 6, 89–96.

10. Колмаков, Н. М., Баховцев, И. А., Гарганеев, А. Г. (2016). Анализ гистерезисного управления по напряжению автономного инвертора напряжения. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 19 (2), 84–89.

11. Якупов, Д. В., Казачковський, Н. Н. (2010). Управление активным выпрямителем с широтно-импульсной модуляцией при возмущениях со стороны нагрузки. Вестник КДУ имени Михаила Остроградского, 4 (63), 16–19.

12. Oleksandr, P., Volodymyr, N. (2018). Analyses of Energy Efficiency of Interleaving in Active Voltage-Source Rectifier. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). doi: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559514>

13. Gervasio, F., Mastromauro, R. A., Liserre, M. (2015). Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). doi: <https://doi.org/10.1109/icit.2015.7125248>

14. Zhao, L., Wang, Q., Li, G., Chen, Q., Hu, C. (2014). Analyze and compare the efficiency of two-level and three-level inverter in SVPWM. 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. doi: <https://doi.org/10.1109/iciea.2014.6931488>

15. Винтрих, А., Ульрих, Н., Колпаков, А. И., Мысак, Т. В., Полищук, С. И. (2017). Анализ динамических потерь мощных IGBT. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», 27, 191–196.

16. Wu, R., Wen, J., Wu, J., Chen, Z., Peng, C., Wang, Y. (2012). Analysis of power losses in voltage source converter with new generation IGBTs. 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE). doi: <https://doi.org/10.1109/csae.2012.6272683>

17. Dai, P., Guo, G., Gong, Z. (2016). A Selection Precharge Method for Modular Multilevel Converter. International Journal of Control and Automation, 9 (4), 161–170. doi: <https://doi.org/10.14257/ijca.2016.9.4.16>