

УДК 621.314

ПЛАХТІЙ О. А., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту),
 НЕРУБАЦЬКИЙ В. П., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту),
 ГОРДІЄНКО Д. А., інженер (ПрАТ «ЕЛАКС»),
 ЦИБУЛЬНИК В. Р., магістрант (Український державний університет залізничного транспорту)

Аналіз енергоефективності трирівневих автономних інверторів напруги в режимі перемодуляції

У статті запропоновано використання алгоритму перемодуляції в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для трирівневого автономного інвертора напруги (АІН), який відносно класичної ШІМ з коефіцієнтом модуляції, рівним одиниці, є виправданим і дозволяє збільшити діапазон регулювання вихідної потужності АІН, знизити динамічні втрати в силових ключах, покращити синусоїдальність вихідного струму, а також знизити коефіцієнт пульсації вхідного струму. Наведено залежності енергетичних показників АІН від коефіцієнта модуляції в режимі перемодуляції. У спеціалізованій програмі MelcoSim від компанії Mitsubishi виконано розрахунок статичних і динамічних втрат в силових ключах автономного інвертора напруги в режимі перемодуляції. Отримано залежності втрат в силових ключах від значення коефіцієнта модуляції.

Ключові слова: автономний інвертор напруги, широтно-імпульсна модуляція, коефіцієнт модуляції, режим перемодуляції, гармоніки, втрати, мережа, потужність, амплітуда, імітаційна модель.

Вступ

Найбільш часто застосовуються перетворювачі енергії, виконані за типом автономного інвертора напруги (АІН) [1, 2], схему якого наведено на рис. 1. АІН є важливою ланкою в системі асинхронного тягового приводу.

Одним з головних показників роботи АІН є енергоефективність, яка визначається такими показниками [3]:

- коефіцієнтом корисної дії (ККД), який залежить від статичних і динамічних втрат в напівпровідникових силових ключах і додаткових втрат, пов'язаних з опором провідників і живленням кіл системи керування;

- коефіцієнтом пульсації і спектром вищих гармонік вхідного струму, від яких залежать додаткові втрати від вищих гармонік в лініях електропостачання;

- синусоїдальністю вихідної напруги та струму, від яких залежать додаткові втрати в провідниках статора та ротора асинхронного тягового електродвигуна.

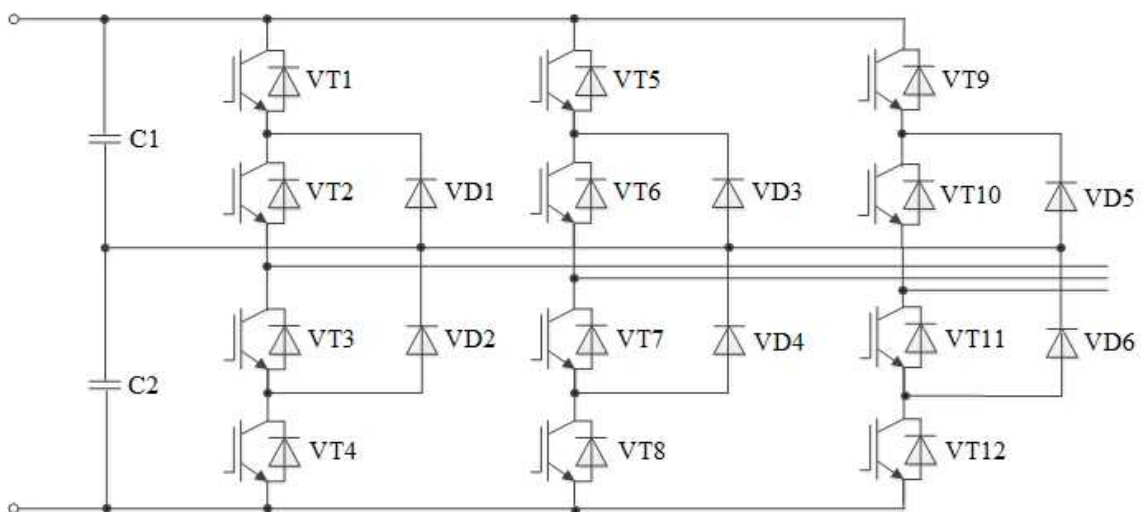


Рис. 1. Трирівневий автономний інвертор напруги

Вищевказані показники енергоефективності АІН залежать не тільки від використовуваної в АІН елементної бази IGBT або MOSFET-транзисторів, але і від обраного алгоритму модуляції.

Найчастіше в АІН застосовуються широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) і однократна модуляція [4, 5]. Перевага ШІМ перед однократною модуляцією полягає в можливості регулювання амплітуди першої гармоніки вихідної напруги і відповідно струму, що є необхідним як при скалярному, так і при векторному керуванні асинхронного електроприводу.

У той же час недоліком ШІМ є необхідність більш високої частоти комутації силових ключів, що обумовлює більш високі динамічні втрати. Крім цього в режимі ШІМ АІН при тих же параметрах навантаження має меншу амплітуду першої гармоніки вихідної напруги, а отже, й меншу вихідну потужність [6].

Мета роботи

Робота спрямована на вирішення таких цілей та задач:

- доказ можливості застосування режиму перемодуляції в ШІМ для АІН;
- визначення залежності вихідної потужності від коефіцієнта модуляції, залежності амплітуди першої гармоніки вихідного струму від коефіцієнта модуляції, залежності коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги від коефіцієнта модуляції $THD_{U_{out}} = f(k)$, залежності коефіцієнта гармонічних спотворень вихідного струму від коефіцієнта

модуляції $THD_{I_{out}} = f(k)$, залежності втрат в силових ключах від коефіцієнта модуляції.

Викладення основного матеріалу

Перемодуляція – це режим модуляції, при якому амплітуда синусоїдального сигналу завдання навмисно задається вище амплітуди несучого пилоподібного сигналу, при цьому коефіцієнт модуляції k перевищує одиницю [7].

$$k = \frac{A_{\sin}}{A_{\text{пил}}}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт модуляції; A_{\sin} – амплітуда синусоїдального сигналу завдання; $A_{\text{пил}}$ – амплітуда пилоподібного несучого сигналу.

Перемодуляція може виникати як при аналоговій модуляції (амплітудній, частотній, фазовій), так і при імпульсній (амплітудно-імпульсній, частотно-імпульсній, широтно-імпульсній чи інших видах модуляції).

Для дослідження енергетичних показників АІН з обраним алгоритмом модуляції в спеціалізованій програмі Matlab було розроблено модель трирівневого АІН. Моделювання проводилося з такими параметрами: напруга в колі постійного струму 3 кВ; індуктивність навантаження 1 мГн, опір навантаження 2 Ом, частота першої гармоніки вихідної напруги 50 Гц, частота опорного сигналу в ШІМ 1 кГц. Імітаційну модель автономного інвертора напруги з досліджуваною системою керування наведено на рис. 2.

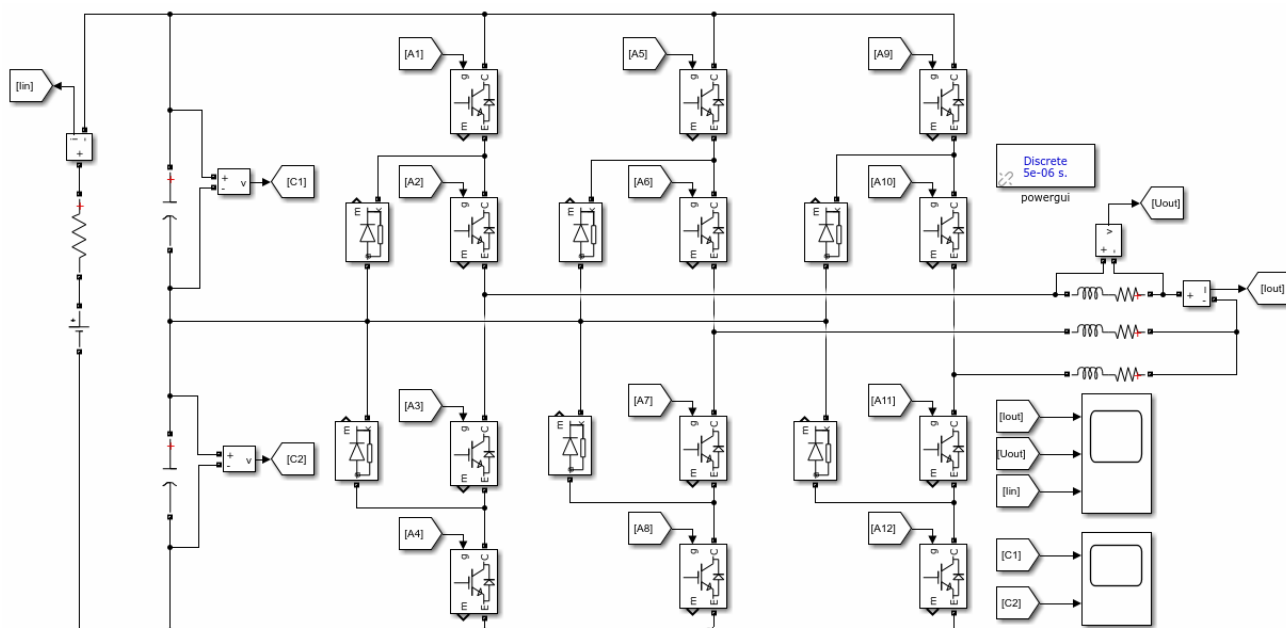


Рис. 2. Імітаційна модель трирівневого автономного інвертора напруги

Широтно-імпульсна модуляція в класичному аналоговому виконанні реалізується шляхом порівняння височастотного пилоподібного сигналу й низькочастотного синусоїдального сигналу [8].

У режимі ШІМ-перемодуляції амплітуда синусоїдального сигналу завдання навмисно задається вище амплітуди несучого пилоподібного сигналу (рис. 3), тобто коефіцієнт модуляції набуває значення вище одиниці ($k > 1$). При значному збільшенні коефіцієнта модуляції АІН переходить в режим фазної комутації.

У режимі перемодуляції в АІН виникають такі явища:

- при тих же параметрах навантаження підвищуються амплітуди перших гармонік вихідної напруги та вихідного струму АІН;

- знижуються динамічні втрати в ключах;

- підвищується синусоїдальність вихідної напруги та вихідного струму.

У режимі перемодуляції формуються інтервали часу, в які не відбувається комутація силових ключів. Це веде до зниження числа перемикань силових ключів, а відповідно й до зниження динамічних втрат [9, 10].

Форми вихідної напруги АІН при коефіцієнтах модуляції $k = 1$ і при $k = 2$ наведено на рис. 4.

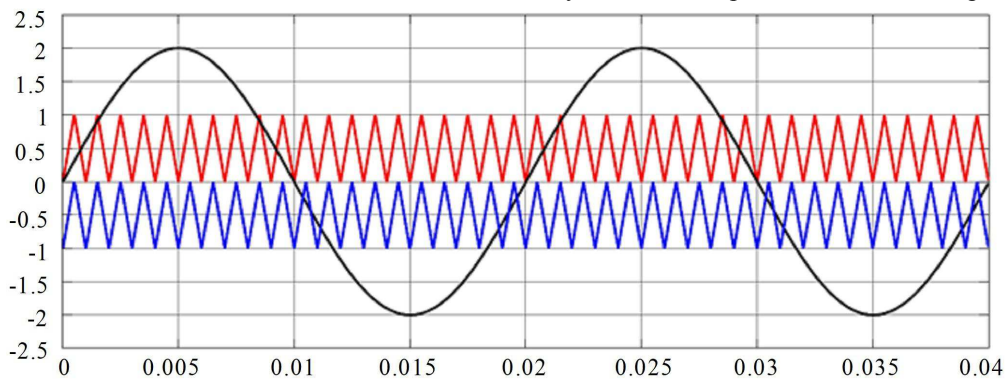
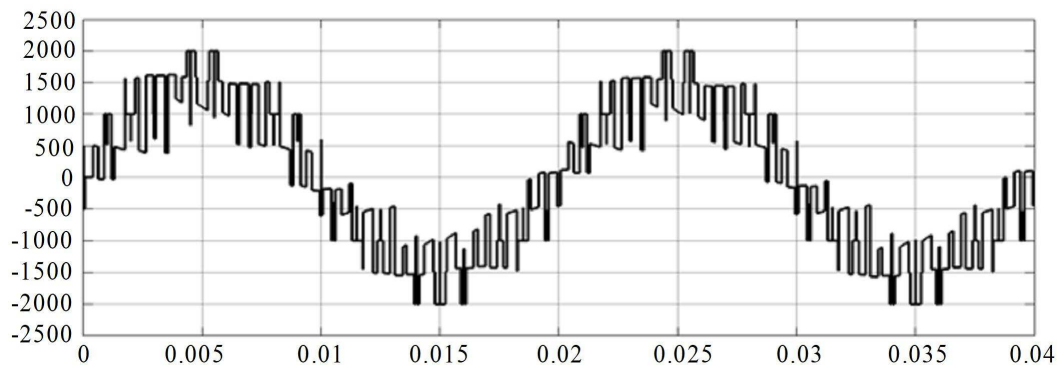
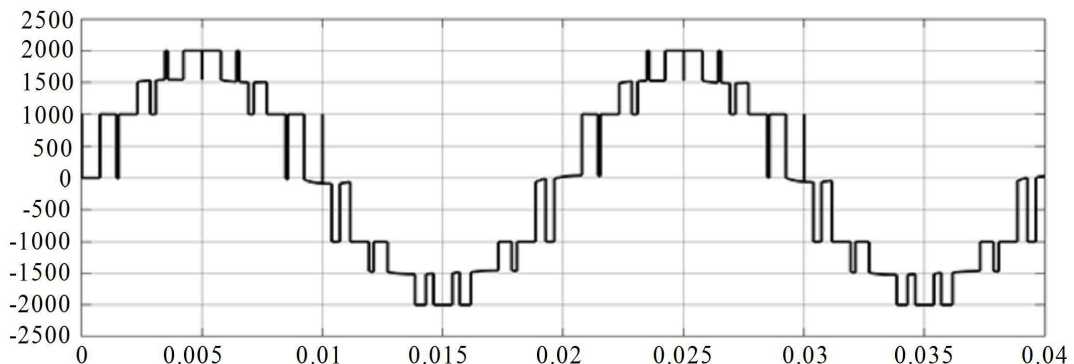


Рис. 3. ШІМ в режимі перемодуляції при $k = 2$



a



б

Рис. 4. Форма вихідної напруги АІН: *a* – $k = 1$; *б* – $k = 2$

Залежність амплітуди першої гармоніки вихідного струму АІН від значення коефіцієнта модуляції наведено на рис. 5. При цьому зі зростанням значення коефіцієнта модуляції k амплітуди перших гармонік вихідної напруги та вихідного струму будуть експоненціально спрямовані до тих же значень при 180-градусному керуванні [11, 12].

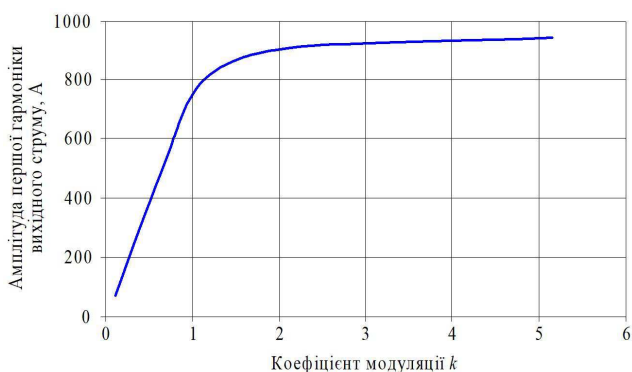


Рис. 5. Залежність амплітуди першої гармоніки вихідного струму від коефіцієнта модуляції

Залежність вихідної потужності АІН від коефіцієнта модуляції наведено на рис. 6.

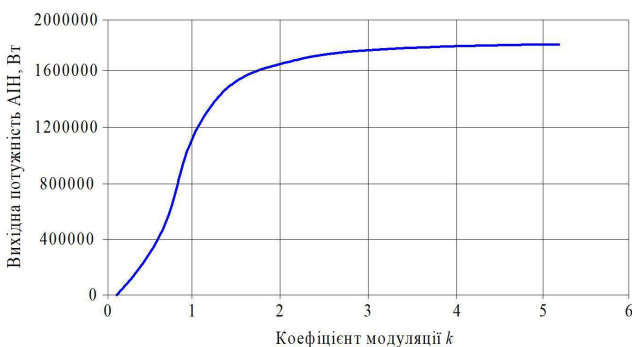


Рис. 6. Залежність вихідної потужності АІН від коефіцієнта модуляції

У режимі перемодуляції також підвищується синусоїдальність вихідної напруги [13, 14]. Отримані залежності коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги від коефіцієнта модуляції наведено на рис. 7. Зі зростанням значення коефіцієнта модуляції k значення коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги буде експоненціально спадати до значення при режимі однократної модуляції, тобто до значення 32,15 %.

Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень вихідного струму від коефіцієнта модуляції наведено на рис. 8.

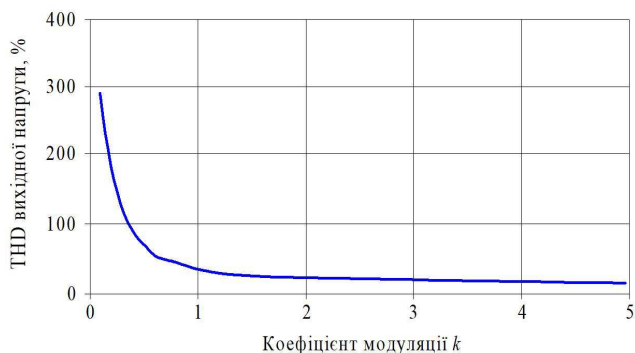


Рис. 7. Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги від коефіцієнта модуляції

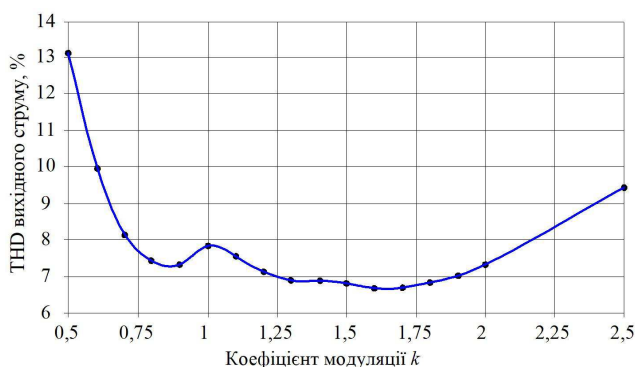


Рис. 8. Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень вихідного струму від коефіцієнта модуляції

Як видно з рис. 8, коефіцієнт гармонічних спотворень вихідного струму знижується до значення 6,7 % при значенні коефіцієнта модуляції 1,6. Це пояснюється тим, що при підвищенні коефіцієнта модуляції форма вихідної напруги АІН наближається до форми вихідної напруги в режимі однократної модуляції [15].

Таким чином, можна зробити висновок про те, що використання режиму перемодуляції доцільно до значення коефіцієнта модуляції $k < 1,85$, після якого спостерігається погіршення синусоїдальності вихідного струму.

Фур'є-аналіз вихідної напруги та вихідного струму АІН при $k = 1$ і в режимі перемодуляції при $k = 2$ наведено на рис. 9.

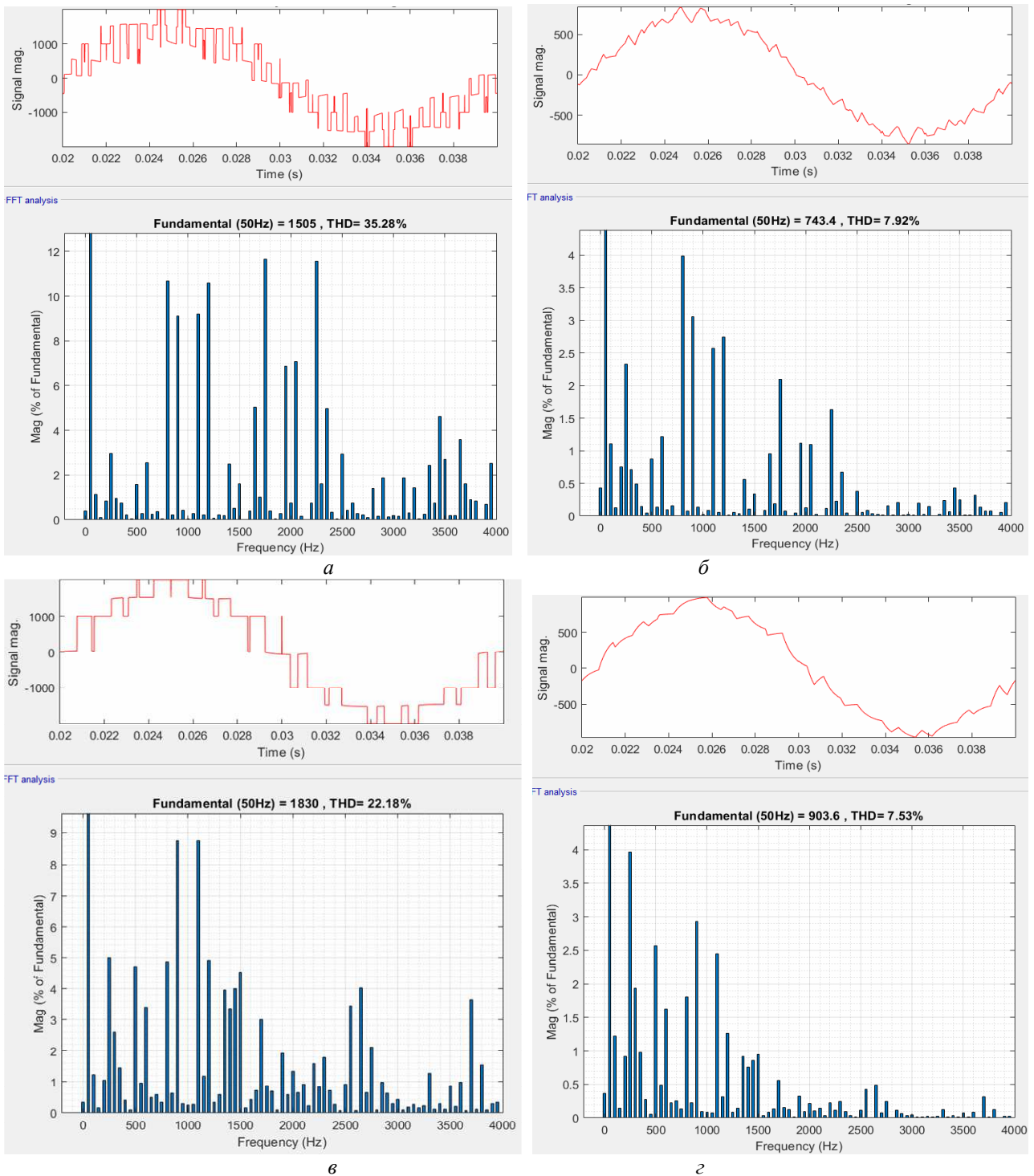


Рис. 9. Фур'є-аналіз АІН:
a – $U_{вух}$ при $k = 1$; *б* – $I_{вух}$ при $k = 1$; *в* – $U_{вух}$ при $k = 2$; *г* – $I_{вух}$ при $k = 2$

Ще однією перевагою режиму перемодуляції є зниження пульсації вхідного струму та поліпшення електромагнітної сумісності з мережею живлення [16, 17]. Результати проведених Фур'є-аналізів форм

вхідного струму АІН при коефіцієнті модуляції $k = 1$ і при $k = 2$ наведено на рис. 10.

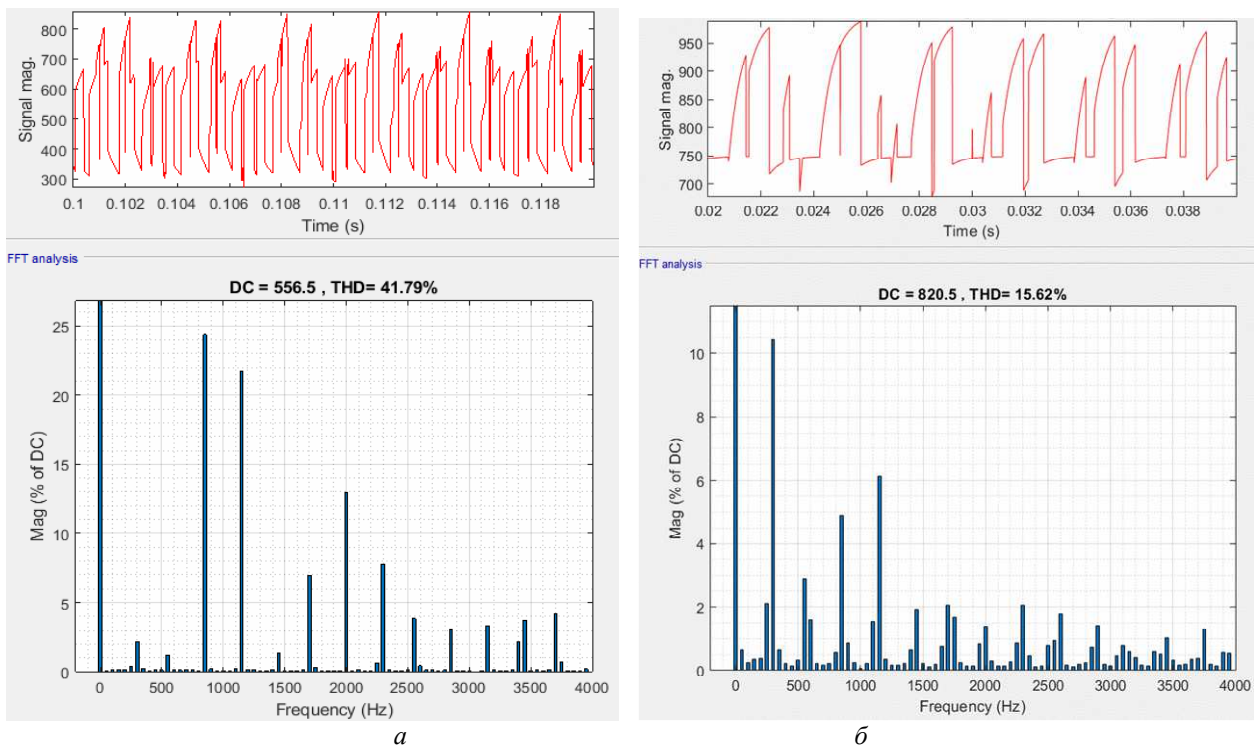


Рис. 10. Фур'є-аналіз АІН:
а – при $k = 1$; б – при $k = 2$

Розрахунок статичних і динамічних втрат напівпровідникових силових ключів для розглянутого алгоритму модуляції було проведено для IGBT-модулів типу CM800HC-66H2 виробництва компанії Mitsubishi Electric з номінальною напругою 3,3 кВ і струмом 800 А [18, 19].

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].

$$P = P_{DC} + P_{SW}, \quad (2)$$

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. 11.

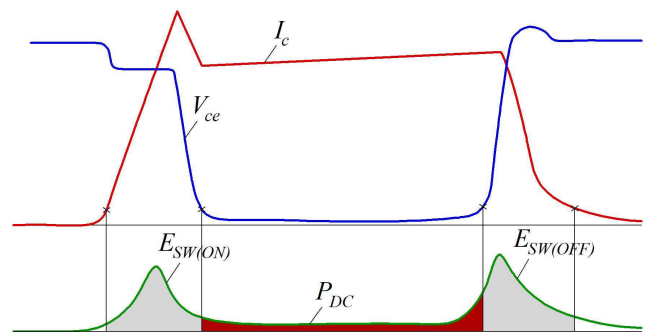


Рис. 11. Процес комутації струму та напруги в IGBT-ключі

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

$$P_{DC} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} (I_c \cdot V_{ce}(I_c) \cdot D_{on}) \cdot dt, \quad (3)$$

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

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

$$P_{SW} = \frac{1}{2\pi_0} \int_0^\pi [(E_{ON}(I_c) + E_{OFF}(I_c) \cdot f)] dt, \quad (4)$$

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 тривірневої топології активного випрямляча дозволяє застосовувати ключі меншого

класу для реалізації тієї ж напруги в колі постійного струму. При цьому характерною особливістю ключів меншого класу є менше падіння між колектором та емітером, а також менша енергія перемикання.

Залежність втрат в силових ключах типу SM800HC-66H2 від коефіцієнта модуляції наведено на рис. 12.

Розрахунок було виконано в спеціалізованій програмі MelcoSim від компанії Mitsubishi [20].

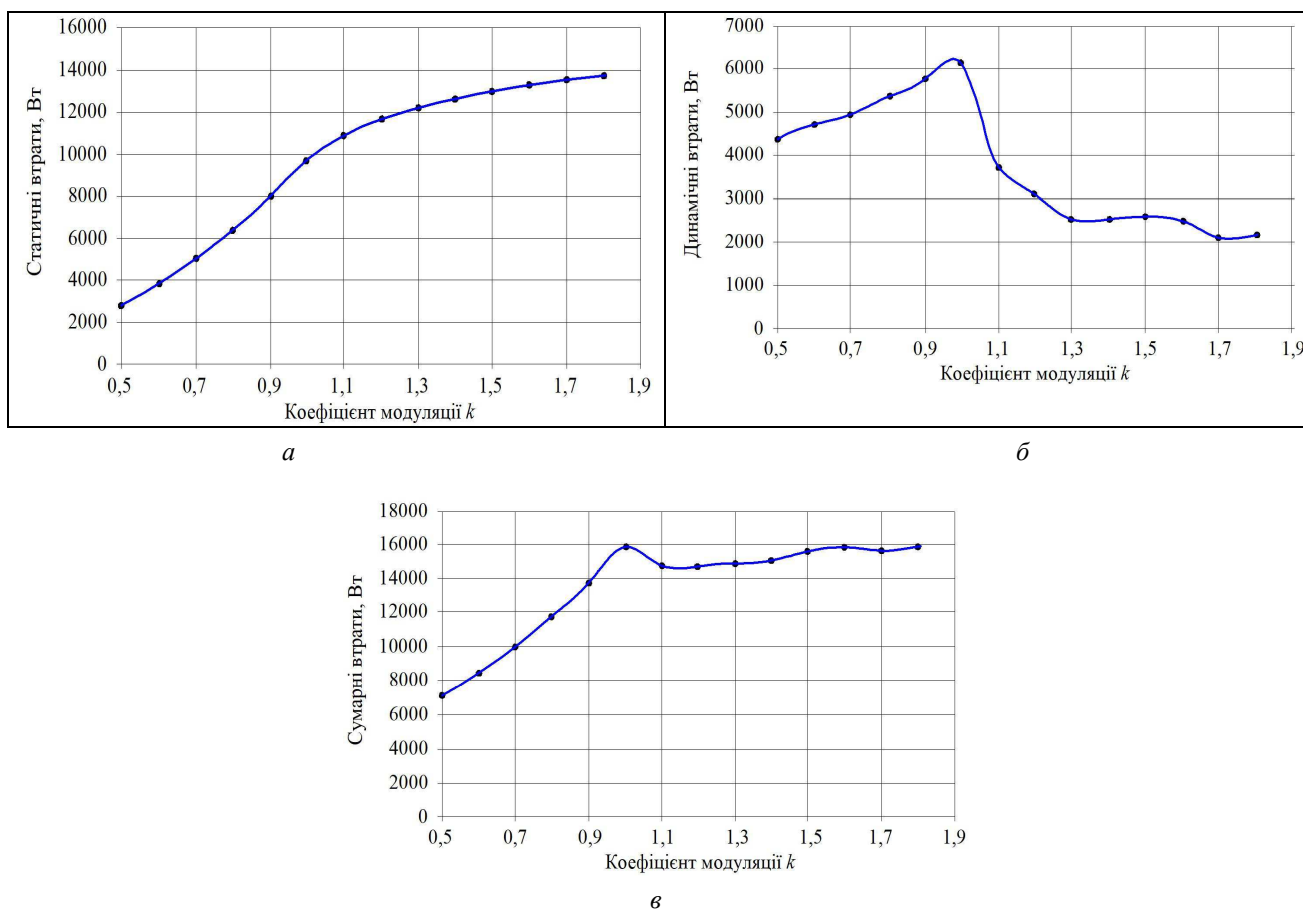


Рис. 12. Залежність втрат в ключі SM800HC-66H2 від коефіцієнта модуляції:

a – залежність статичних втрат від коефіцієнта модуляції; $б$ – залежність динамічних втрат від коефіцієнта модуляції; $в$ – залежність сумарних втрат від коефіцієнта модуляції

Згідно з проведеними розрахунками та імітаційним моделюванням було проведено розрахунки ККД тривірневого автономного інвертора напруги за виразом

$$ККД = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{(P_{вх} - P_{втрат})}{P_{вх}}, \quad (5)$$

де $P_{вх}$ – вхідна потужність перетворювача; $P_{вих}$ – вихідна потужність перетворювача; $P_{втрат}$ – сумарні втрати в ключах перетворювача.

Результати розрахунку енергетичних показників АІН з різними типами модуляції наведено в табл. 1.

Параметри енергоефективності алгоритмів модуляції в трирівневому АІН

| Показники | Синусоїдальна ШІМ | | |
|---|-------------------|---------------|-------------|
| | при $k = 1$ | при $k = 1,5$ | при $k = 2$ |
| Частота опорного сигналу, Гц | 1000 | 1000 | 1000 |
| Середня на періоді частота комутації, Гц | 1000 | 450 | 350 |
| Середньоквадратичне значення вхідного струму, А | 580,8 | 766,9 | 824,9 |
| Перша гармоніка вихідної напруги, RMS, В | 1062,07 | 1243,8 | 1294 |
| Перша гармоніка вихідного струму, RMS, А | 525,03 | 614,12 | 638,94 |
| Повна вихідна потужність АІН, кВА | 1672,85 | 2291,52 | 2480,38 |
| ТНД вихідної фазної напруги, % | 35,28 | 22,77 | 22,18 |
| ТНД вихідного струму, % | 7,92 | 6,94 | 7,53 |
| Коефіцієнт пульсацій вхідного струму, % | 41,79 | 19,59 | 15,62 |
| Статичні втрати в ключах трирівневого АІН, Вт | 9706,1 | 12970,6 | 13908,7 |
| Динамічні втрати в ключах трирівневого АІН, Вт | 6165,5 | 2594,4 | 1470,8 |
| Сумарні втрати в ключах АІН, Вт | 15871,6 | 15565 | 15379,5 |
| ККД, % | 99,05 | 99,32 | 99,38 |

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання

Порівняльний аналіз класичної синусоїдальної ШІМ з $k = 1$ і ШІМ в режимі перемодуляції ($k = 3$) показав наступне.

1. Режим перемодуляції в ШІМ в трирівневому АІН дозволяє збільшити діапазон регулювання вихідної потужності АІН.

2. У режимі перемодуляції значно покращуються параметри якості електроенергії, а саме знижуються коефіцієнти гармонічних спотворень вихідної напруги та вихідного струму АІН.

3. У режимі перемодуляції значно знижуються динамічні втрати в IGBT-транзисторах, що підвищує ККД перетворювача.

4. Режим перемодуляції доцільно використовувати для значення коефіцієнта модуляції $k < 1,6$, після якого спостерігається погіршення синусоїдальності вихідного струму.

5. У режимі перемодуляції покращується емісія вищих гармонік в мережу живлення і знижується коефіцієнт пульсацій вхідного струму.

Список використаних джерел

- Arcega F. J., Pardina A. Study of harmonics thermal effect in conductors produced by skin effect. *IEEE Latin America Transactions*. 2014. Vol. 12, Issue 8. P. 1488–1495. DOI: 10.1109/TLA.2014.7014518.
- Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Кавун В. Є., Машура А. В., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 180. С. 106–120.
- Lazzarin T., Bauer G., Barbi I. A control strategy for parallel operation of single-phase voltage source

inverters: analysis, design and experimental results. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013. Vol. 60, No. 6. P. 2194–2204.

- Kostic D. J., Avramovic Z. Z., Ciric N. T. A new approach to theoretical analysis of harmonic content of PWM waveforms of single- and multiple-frequency modulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013. Vol. 28, Issue 10. P. 4557–4567. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2232309.
- Naderi R., Rahmati A. Phase-shifted carrier PWM technique for general cascaded inverters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2008. Vol. 23, No. 3. P. 1257–1269.
- Gervasio F., Mastromauro R., Liserre M. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2015. P. 1123–1128. DOI: 10.1109/icit.2015.7125248.
- Михальський В. М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частот із широтно-імпульсною модуляцією. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. 340 с.
- Zhao G. I., Wang L., Li Q., Chen G. Analyze and compare the efficiency of two-level and three-level inverter in SVPWM. *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2014. P. 1954–1958. DOI: 10.1109/iciea.2014.6931488.
- Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Сушко Д. Л., Кавун В. Є. Зниження динамічних втрат в активному однофазному чотириквадрантному перетворювачі з покращеним алгоритмом гістерезисної модуляції. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.088>.
- Wu R., Wen J., Wu J., Chen Z., Peng C., Wang Y. Analysis of power losses in voltage source converter

- with new generation IGBTs. *2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*. 2012. P. 674–678. DOI: 10.1109/csae.2012.6272683.
11. Plakhtii O., Nerubatskyi V. Analyses of energy efficiency of interleaving in active voltage-source rectifier. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. P. 253–258. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559514>.
 12. Zhuang X., Rui L., Hui Z., Dianguo X., Zhang C. Control of parallel multiple converters for direct-drive permanent-magnet wind power generation systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2012. Vol. 27, No. 3. P. 1259–1270.
 13. Плахтий А. А., Нерубацкий В. П., Силантьев А. С. Анализ энергоэффективности активного выпрямителя с улучшенной гистерезисной системой управления. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 3. С. 10–16.
 14. Васильев Б. Ю., Добуш В. С. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электродвигателях / *Электричество*. 2014. № 4. С. 54–61.
 15. Rashid M. H. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook 3rd. ed / Elsevier Inc. 2011. 1389 p.
 16. Плахтий А. А., Нерубацкий В. П., Кавун В. Е., Машура А. В. Компенсация высших гармоник входных токов в системах с параллельным включением автономных инверторов. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2018. № 27 (103). С. 65–74. DOI: <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07>
 17. Borrega M., Marroyo L., Gonzalez R., Balda J., Agorreta J. Modeling and control of a master-slave PV inverter with n-paralleled inverters and three-phase three-limb inductors. *IEEE Trans. Power Electron.* 2013. Vol. 28, No. 6. P. 2842–2855.
 18. Винтрих А., Ульрих Н., Колпаков А. И., Мысак Т. В, Полищук С. И. Анализ динамических потерь мощных IGBT. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. 2017. № 27. С. 191–196.
 19. Нерубацкий В. П., Плахтий О. А., Гладка А. В. Покращення електромагнітної сумісності тягового електропривода змінного струму шляхом застосування 4QS-випрямлячів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 178. С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.138906>.
 20. Dias R. A., Lira G. R., Costa E. G., Ferreira R. S., Andrade A. F. Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395687.
- Плахтий А. А., Нерубацкий В. П., Гордиенко Д. А., Цыбульник В. Р. Анализ энергоэффективности трёхуровневых автономных инверторов напряжения в режиме перемодуляции.**
Аннотация. В статье предложено использование алгоритма перемодуляции в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для трёхуровневого автономного инвертора напряжения (АИН), который относительно классической ШИМ с коэффициентом модуляции, равным единице, оправдан и позволяет увеличить диапазон регулирования выходной мощности АИН, снизить динамические потери в силовых ключах, улучшить синусоидальность выходного тока, а также снизить коэффициент пульсации входного тока. Приведены зависимости энергетических показателей АИН от коэффициента модуляции в режиме перемодуляции. В специализированной программе MelcoSim от компании Mitsubishi выполнен расчет статических и динамических потерь в силовых ключах автономного инвертора напряжения в режиме перемодуляции. Получены зависимости потерь в силовых ключах от значения коэффициента модуляции.
Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, коэффициент модуляции, режим перемодуляции, гармоники, потери, сеть, мощность, амплитуда, имитационная модель.
-
- Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Tsybulnyk V. R. Analysis of energy efficiency of three-level autonomous voltage inverters in the mode of reimodulation.**
Abstract. Voltage source inverter (VSI) is one of the most common types of power converters, which is used in various industries. The energy efficiency indicators of the AVI depend not only on the IGBT or MOSFET-based transistors used in the AVI element, but also on the chosen modulation algorithm.
 The most commonly used in VSI is pulse width modulation (PWM) and single modulation. The advantage of PWM prior to single modulation is the ability to control the amplitude of the first harmonic of the output voltage and, accordingly, the current required both for scalar and vector control of an asynchronous electric drive.
 At the same time, the disadvantage of PWM is the need for a higher switching frequency of power switches, which results in higher dynamic losses. In addition, in the PWM mode, VSI at the same load parameters has a

smaller amplitude of the first harmonic of the output voltage, and hence less output power.

The article proposes the use the mode of overmodulation algorithm in the pulse-width modulation (PWM) mode for a three-level autonomous voltage inverter, which is relatively classical PWM with a modulation factor equal to one, justified and allows to increase the control range of the output power of the VSI, to reduce the dynamic losses in the power switches, to improve the sinusoidal output current, as well as reduce the ripple factor of the input current. Given the dependence of the energy indicators of the VSI on the modulation factor in the mode of overmodulation.

In the specialized MelcoSim program from Mitsubishi, the calculation of static and dynamic losses in the power switches of an autonomous voltage inverter in the mode of overmodulation was performed. The dependences of the output power on the modulation coefficient, the dependence of the amplitude of the first harmonic of the output current on the modulation coefficient, the dependence of the coefficient of harmonic distortion of the output voltage on the modulation coefficient, the dependence of the harmonic distortion factor of the output current on the modulation coefficient, and the dependence of the losses in the power switches on the modulation coefficient.

Key words: autonomous voltage inverter, pulse width modulation, modulation coefficient, mode of overmodulation, harmonics, losses, network, power, amplitude, simulation model.

Plakhtii Olexandr Andrievych, PhD, associate professor, department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. ORCID:

<http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD, associate professor, department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. ORCID:

<http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>

E-mail: NVP9@i.ua.

Hordiienko Denys Anatolievych, engineer. Private JSC «ELAKS». ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>

E-mail: D.Hordiienko@i.ua.

Tsybulnyk Vladyslav Romanovych, master's degree, department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-9895-6662>

E-mail: vladtsybulnyk@gmail.com.

Надійшла 30.05.2019 р.

Плахтій Олександр Андрійович, к.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний університет залізничного транспорту. ORCID:

<http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Нерубацький Володимир Павлович, к.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний університет залізничного транспорту. ORCID:

<http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>

E-mail: NVP9@i.ua.

Гордієнко Денис Анатолійович, інженер. ПрАТ «ЕЛАКС». ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>

E-mail: D.Hordiienko@i.ua.

Цибульник Владислав Романович, магістрант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний університет залізничного транспорту. ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-9895-6662>

E-mail: vladtsybulnyk@gmail.com.