

УДК 621.314

НЕРУБАЦЬКИЙ В. П., к.т.н., доцент;

ПЛАХТІЙ О. А., к.т.н., доцент;

ЦИБУЛЬНИК В. Р., аспірант;

ГОРДІЄНКО Д. А., аспірант;

ХОРУЖЕВСЬКИЙ Г. А., аспірант

(Український державний університет залізничного транспорту)

Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з імпедансною і квазіімпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції

У статті розглянуто застосування автономних інверторів напруги з імпедансною та квазіімпедансною ланками у вхідному колі. Досліджено енергетичні характеристики та показники електромагнітної сумісності вказаного типу інверторів з різними алгоритмами модуляції. Наведено порівняльний аналіз реалізованих показників пульсації вхідного струму, синусоїдальності вихідного струму і напруги та розраховано значення статичних і динамічних втрат у перетворювачі. Визначено переваги та недоліки кожної зі схем. Дані отримано шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink і розрахунку в спеціалізованій програмі MelcoSim від компанії Mitsubishi.

Ключові слова: автономний інвертор напруги, імпедансна ланка, квазіімпедансна ланка, модуляція, енергоефективність, керування, перетворювач.

Вступ

На сьогодні спостерігається стрімкий розвиток і популяризація технології Smart Grid [1, 2]. Дана концепція є повністю інтегрованою, самовідновлювальною електроенергетичною системою, що містить генеруючі джерела, магістральні, розподільчі мережі і споживачів електричної енергії, що керуються єдиною інформаційною системою в режимі реального часу. Широке розповсюдження альтернативних джерел енергії призвело до створення напівпровідникових пристроїв, а це у свою чергу обумовлює необхідність вдосконалення алгоритмів керування, здатних забезпечити високу енергоефективність і максимальне використання енергії джерела [3, 4].

Зазначені фактори дозволяють зменшити масогабаритні показники та собівартість перетворювачів, при цьому підвищується енергоефективність систем енергоживлення з використанням альтернативних джерел енергії [5, 6].

Мета роботи

Метою роботи є дослідження показників енергетичної ефективності автономного інвертора напруги АІН з імпедансною та квазіімпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції.

Викладення основного матеріалу

Відомі топології автономних інверторів напруги (АІН), що знаходять своє застосування в системах електроживлення з використанням альтернативних джерел енергії, можуть бути поділені на однорівневі та багаторівневі схемотехнічні варіації [7, 8]. У свою чергу багаторівневі топології можна класифікувати за схемотехнікою силової частини окремого модуля (комірки) – модуль з використанням імпедансної та квазіімпедансної ланки у вхідному колі перетворювача [9]. Особливістю таких інверторів є можливість роботи

в додатковому режимі, так званому «режимі пробою» [10, 11]. Це дає змогу підвищити вхідний струм і напругу інвертора та дозволяє передати максимальну потужність від джерела альтернативної напруги (сонячна батарея, вітрогенератор, біопаливний елемент) до навантаження. Сучасними алгоритмами керування перетворювачем є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) та одноразова модуляція [12, 13]. Слід зазначити, що різні системи модуляції обумовлюють досить різні показники синусоїдальності

вихідної напруги і струму та різний коефіцієнт пульсацій вхідного струму [14–16].

При побудові систем електроживлення з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) як джерело постійного струму особливої уваги заслуговують перетворювачі з імпедансною ланкою у вхідному колі [17, 18]. Даний тип інверторів являє собою дворівневий перетворювач напруги з колом постійного струму на вході, що складається зі з'єднаної *x*-конфігурації двох конденсаторів і дроселів. На рис. 1 наведено структурну схему *z*-інвертора.

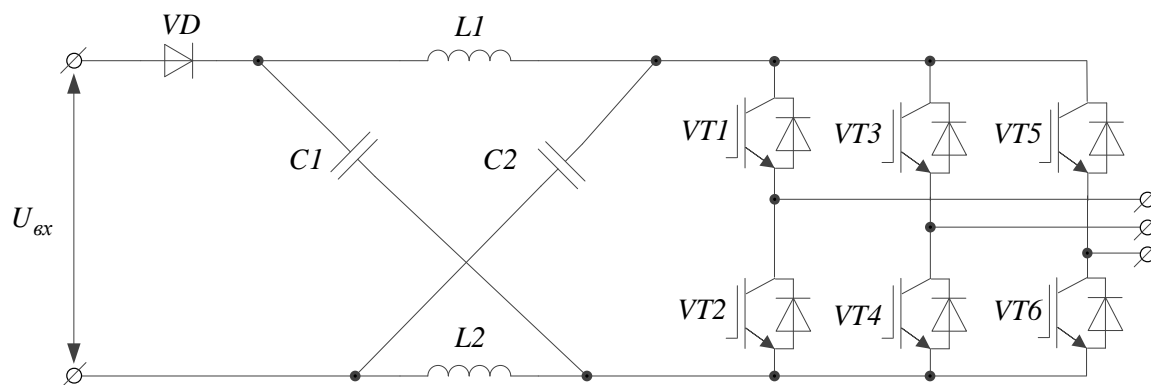


Рис. 1. Структурна схема *z*-інвертора

Ланка накопичення енергії складається з двох послідовно включених індуктивностей (*L1* та *L2*) і двох паралельних один одному конденсаторів (*C1* та *C2*). Як джерело живлення постійного струму може бути використано діодний випрямляч, сонячну панель або паливний елемент. Дана топологія містить шість напівпровідникових силових ключів (IGBT або MOSFET) [19, 20]. Особливістю такого перетворювача є те, що імпедансна ланка дає змогу використовувати режим роботи силових ключів – режим «пробою». Перевагою такого режиму є збільшення вхідного струму і напруги інвертора, що відбирається від джерела сталого струму без установаження додаткових перетворювачів на вхід схеми. Він дає змогу передавати максимальну потужність сонячної батареї до навантаження, що у свою чергу дозволяє раціонально використовувати площу сонячної панелі [21, 22].

До недоліків слід віднести перенавантаження силових ключів, бо струм через них може бути вдвічі більшим за амплітудні значення [23, 24].

Коефіцієнт підвищення вихідної напруги *M* визначається як

$$M = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}, \quad (1)$$

де $U_{вих}$ – бажане значення вихідної напруги імпедансного кола;

$U_{вх}$ – значення вхідної напруги.

Співвідношення (1) відповідає опису роботи підвищувального перетворювача. Для перевірки правильності вибору коефіцієнта скористаємося таким виразом:

$$M = \frac{T}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1 - \frac{2 \cdot T_0}{T}} \geq 1, \quad (2)$$

де T_1 – період роботи схеми в режимі стандартної комутації ключів;

T_0 – період роботи схеми в режимі пробою.

$$T_0 = \frac{\left(1 - \frac{1}{M}\right) \cdot T}{2} \quad (3)$$

Напруга на конденсаторах $C1$ та $C2$ визначається як

$$U_{C1} = U_{C2} = U_C = U_L = \frac{M+1}{2} \cdot U_{ex}, \quad (4)$$

де M – коефіцієнт підвищення напруги.

У режимі «пробою» конденсатор розряджається. Це призводить до появи напруги на індуктивності, рівної за величиною і полярністю напрузі конденсатора. Перехід до режиму стандартної комутації ключів спонукає струм індуктивності лінійно спадати, а напруга складатиме різницю вхідної напруги та напруги конденсатора.

Струм конденсаторів $C1$ та $C2$ описується таким виразом:

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C = I_L = \frac{P}{U_{ex}} \quad (5)$$

Слід зазначити, що важливою умовою коректності роботи імпедансного кола є виконання умови безперервності струму дроселя. Величину ємності конденсатора у схемі на рис. 1 може бути визначено за умов тривалості перехідного процесу T_0 та розраховано зі співвідношення

$$C = \frac{I_L \cdot T_0}{\Delta U_C} \quad (6)$$

де ΔU_C – напруга пульсацій на конденсаторі.

У той же час ємність конденсаторів може визначатися з вимог наявності необхідної енергії заряду конденсатора:

$$C = \frac{E_C \cdot 2}{U^2} \quad (7)$$

Аналогічно до вимог тривалості перехідного процесу може бути визначена і величина індуктивності

$$L = \frac{U_L \cdot T_0}{\Delta I} \quad (8)$$

де ΔI – різниця між максимальним і мінімальним значеннями струму індуктивності.

$$I_{Lmax} = I_L + 30 \% ; \quad (9)$$

$$I_{Lmin} = I_L - 30 \% . \quad (10)$$

Принцип роботи квазіімпедансного інвертора схожий з імпедансним перетворювачем. Метою створення цієї топології є підвищення амплітуди максимальної вихідної напруги при застосуванні режиму «пробою», зменшення навантаження на конденсаторах і підтримка сталого струму джерела, зменшення кількості етапів перетворення та підвищення завадостійкості. z -інвертори використовуються для інтеграції фотоелектричних перетворювачів з мережею MicroGrid і як інтерфейсні перетворювачі для паливних елементів [25–27]. На рис. 2 наведено загальну структуру інвертора з квазіімпедансним джерелом.

Імпедансна ланка інвертора складається з двох індуктивностей $L1$ і $L2$ та двох конденсаторів $C1$ і $C2$. Індуктивність $L1$, присутня в інверторі квазіімпедансного джерела, зменшує вхідний струм. Напруга конденсатора $C1$ нижча, ніж у випадку з z -інвертором.

Основними перевагами квазіімпедансного інвертора перед імпедансним інвертором є:

- можливість зменшення масогабаритних параметрів результуючого пристрою, підвищення надійності і зменшення вартості системи;
- здатність неперервної передачі енергії від вхідного джерела напруги до інвертора;
- стабільність роботи інвертора в точці відбору максимальної потужності сонячної батареї, що є важливою перевагою при застосуванні інвертора в системах з використанням даного альтернативного джерела електроенергії, додатково підвищуючи ефективність на габаритні параметри результуючої системи.

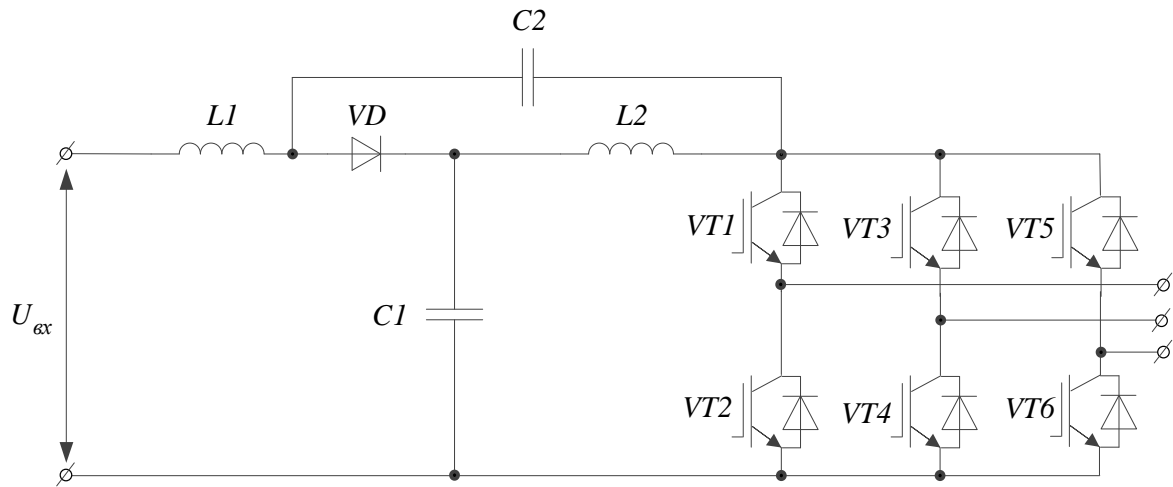


Рис. 2. Квазіімпедансний інвертор

Аналогічно до імпедансного кола величина напруги на конденсаторах:

$$C_2 = \frac{I_{C2} \cdot T_0}{\Delta U_{C2}} \quad (15)$$

$$U_{C1} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} \cdot U_{вх}; \quad (11)$$

$$U_{C2} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} \cdot U_{вх}. \quad (12)$$

Для дослідження енергетичних показників автономного інвертора напруги (АІН) з імпедансною та квазіімпедансною ланками у вхідному колі з різними алгоритмами керування було розроблено імітаційні моделі в програмному середовищі Matlab (рис. 3).

З наведених виразів можна визначити, що напруга на конденсаторі $C1$ буде меншою, ніж напруга на конденсаторі $C2$, оскільки знаходиться в прямій пропорційній залежності від часу знаходження схеми в режимі «пробою», що є значно меншим за протяжність порівняно з режимом стандартної комутації ключів, величина якого знаходиться в аналогічній залежності від величини напруги на конденсаторі $C2$.

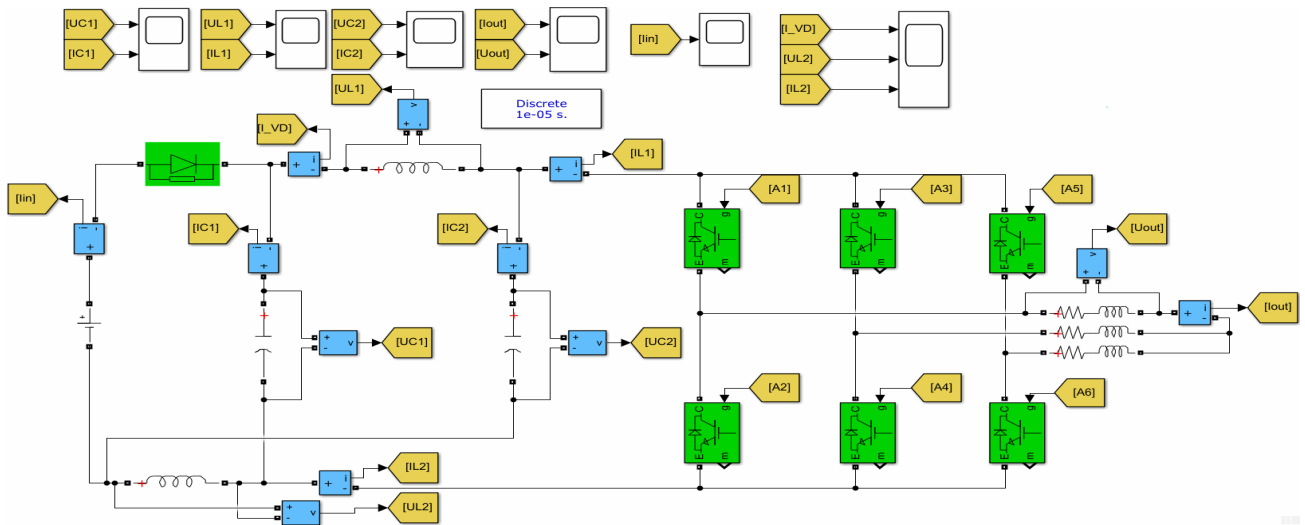
Струм конденсаторів визначається як

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C = I_{вх} - I_{L1}, \quad (13)$$

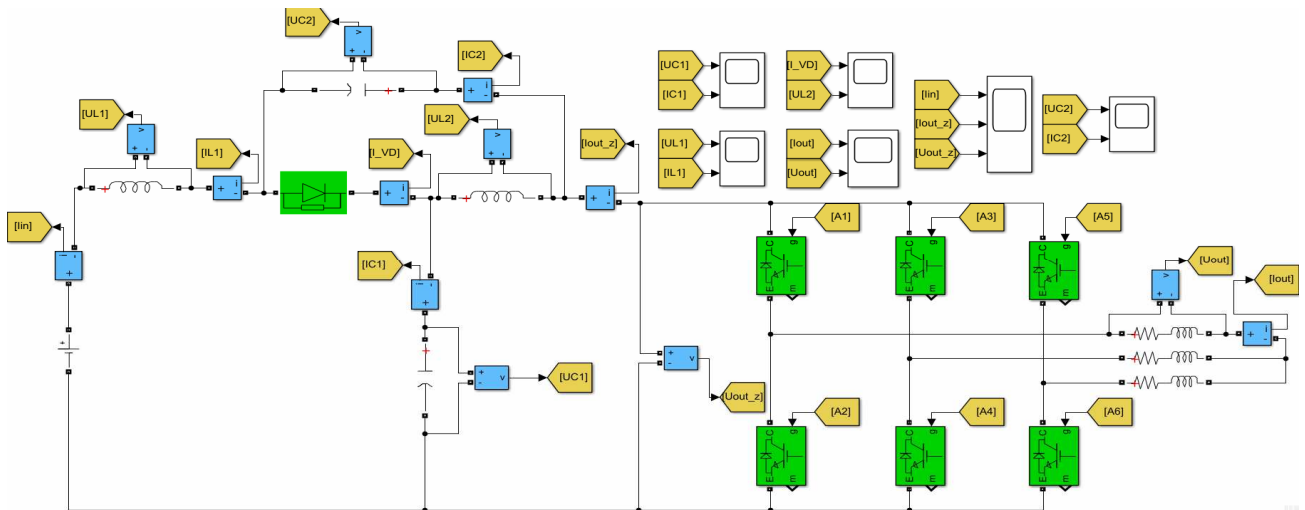
де $I_{вх}$ – вихідний струм квазіімпедансної ланки.

Ємність конденсаторів $C1$ та $C2$ визначається як

$$C_1 = \frac{I_{C1} \cdot T_0}{\Delta U_{C1}}; \quad (14)$$



a



b

Рис. 3. Імітаційні моделі інвертора:

a – з імпедансною ланкою; б – з квазіімпедансною ланкою у вхідному колі

На рис. 4 наведено осцилограми АІН з імпедансною ланкою.

На рис. 5 наведено Фур'є-аналіз АІН з імпедансною ланкою.

На рис. 6 наведено осцилограми АІН з квазіімпедансною ланкою.

На рис. 7 наведено Фур'є-аналіз АІН з квазіімпедансною ланкою.

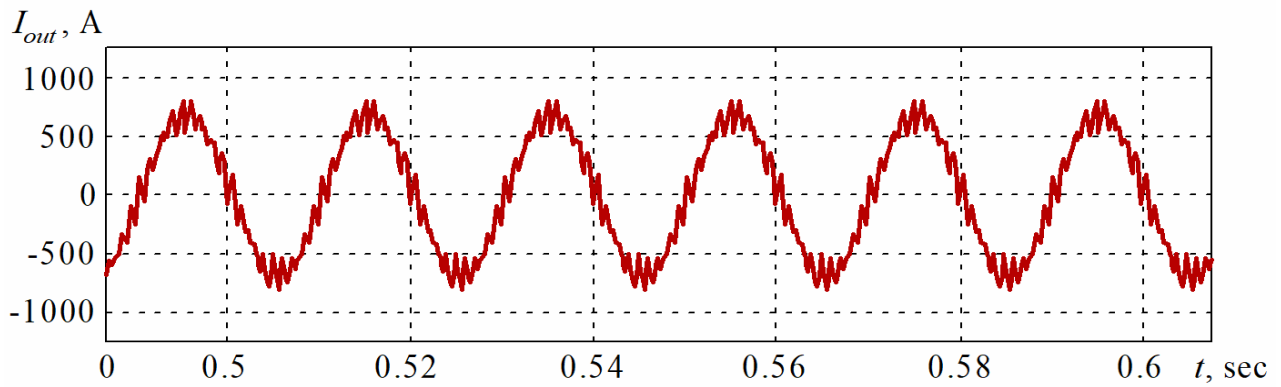
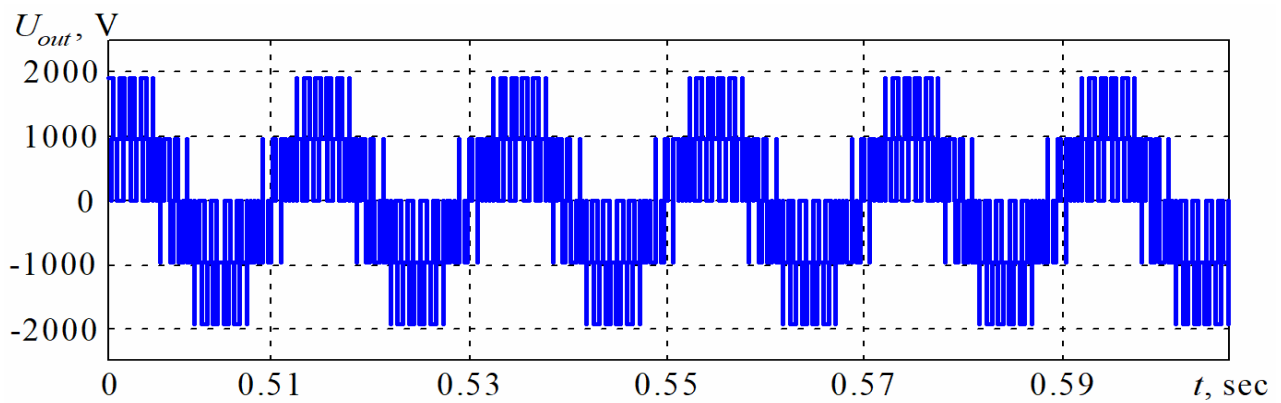
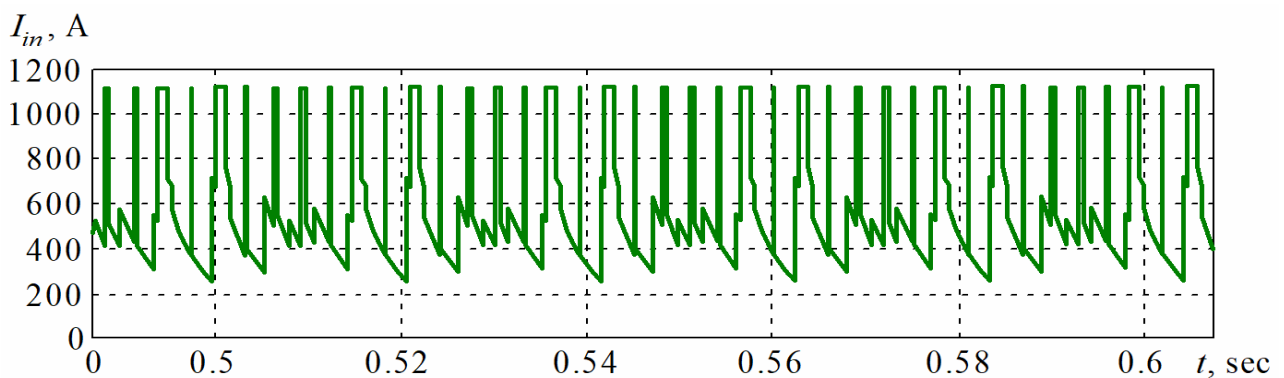
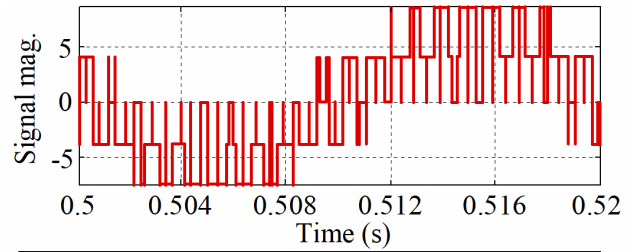
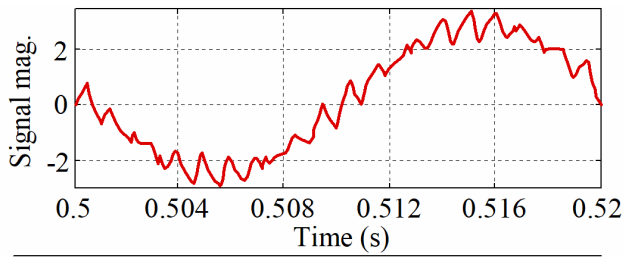
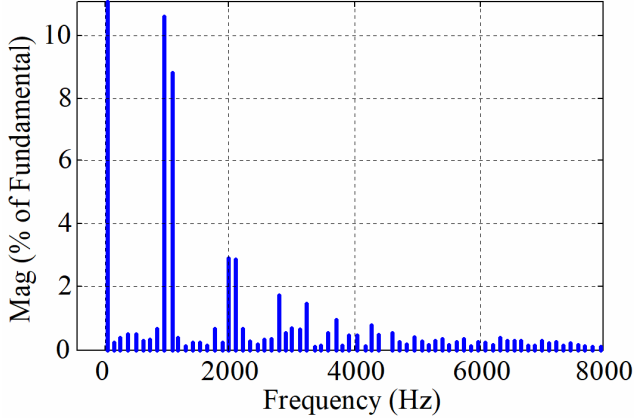
*a**b**c*

Рис. 4. Осцилограми АІН з імпедансною ланкою:
a – вихідний струм; *b* – вихідна напруга; *c* – вхідний струм



FFT analysis

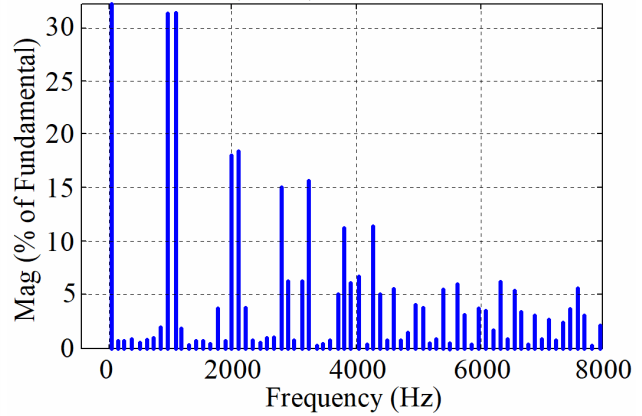
Fundamental (50 Hz) = 740.3, THD = 14.86 %



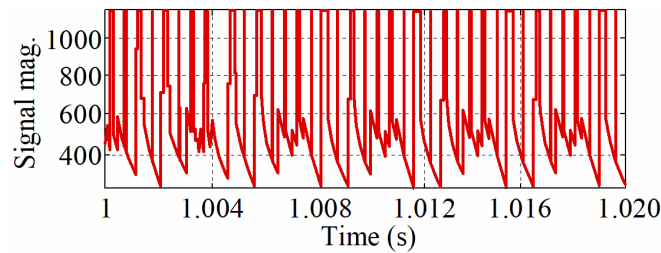
a

FFT analysis

Fundamental (50 Hz) = 1499, THD = 68.39 %

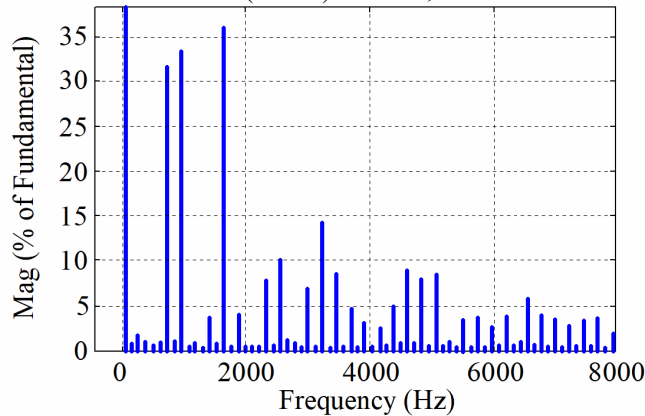


б



FFT analysis

Fundamental (50 Hz) = 555.1, THD = 70.88 %



в

Рис. 5. Фур'є-аналіз АІН з імпедансною ланкою:
a – вихідний струм; *б* – вихідна напруга; *в* – вхідний струм

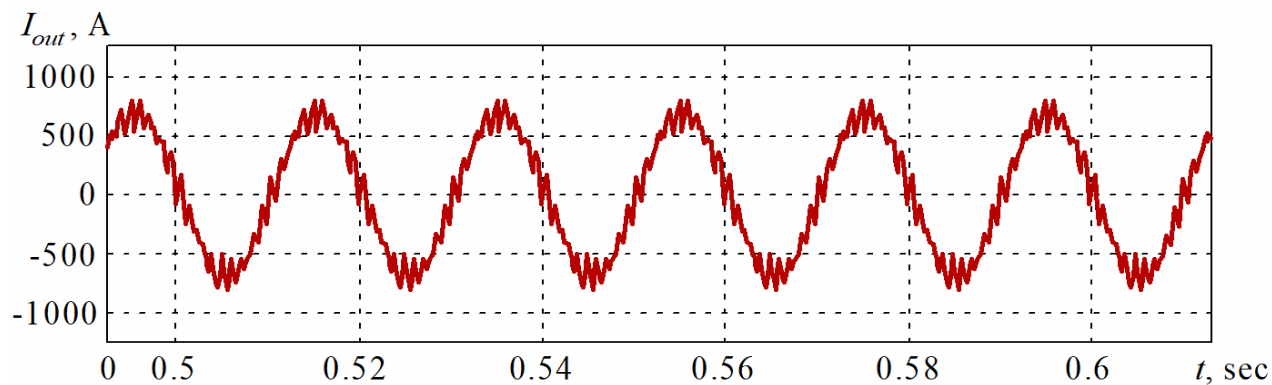
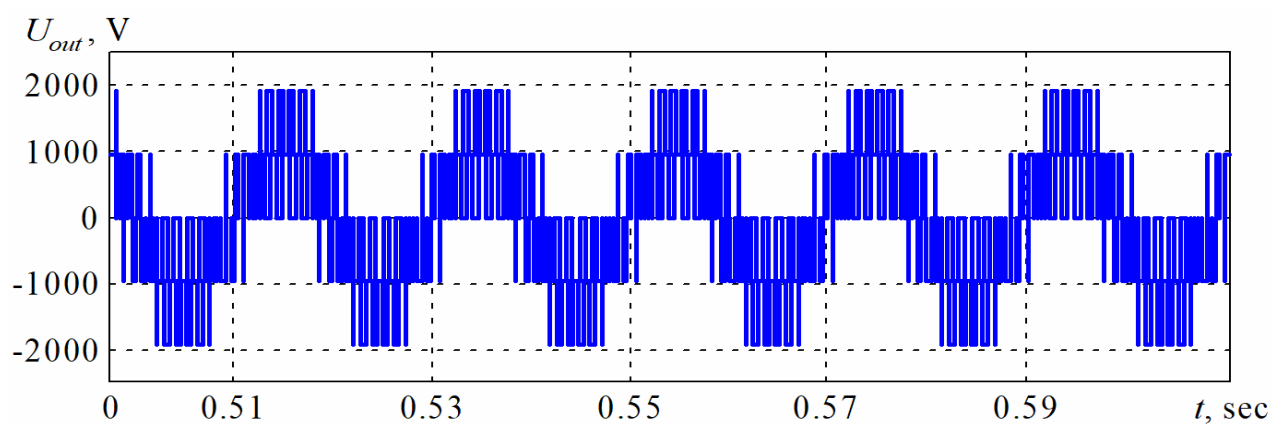
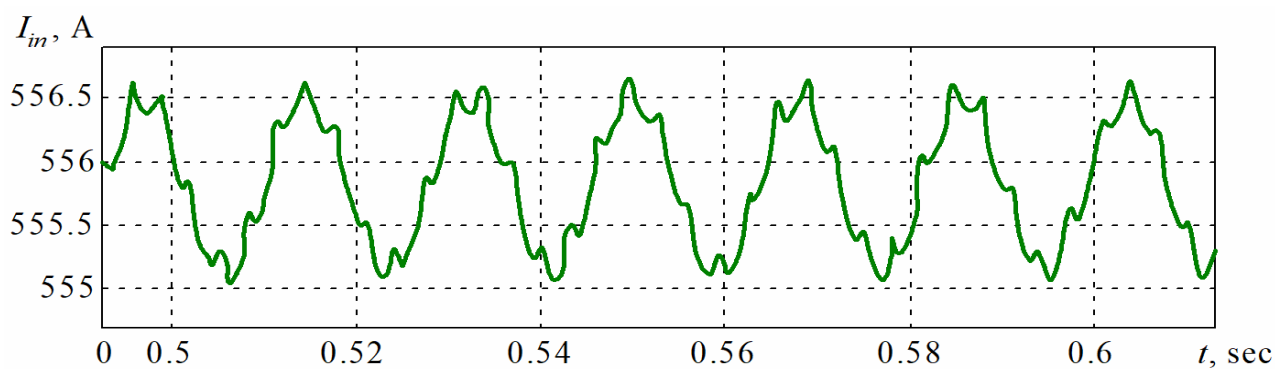
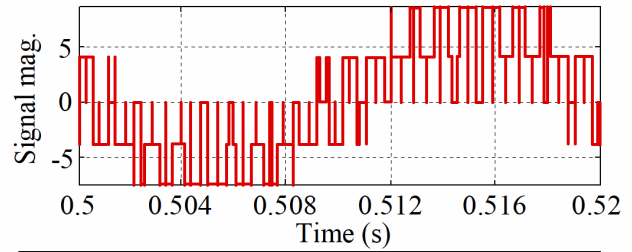
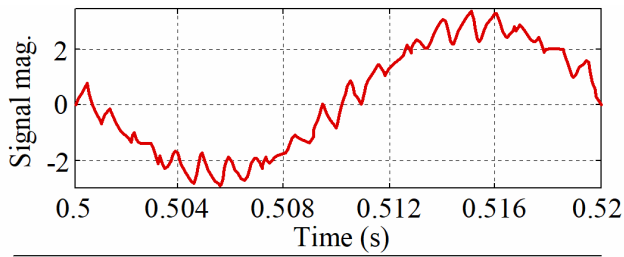
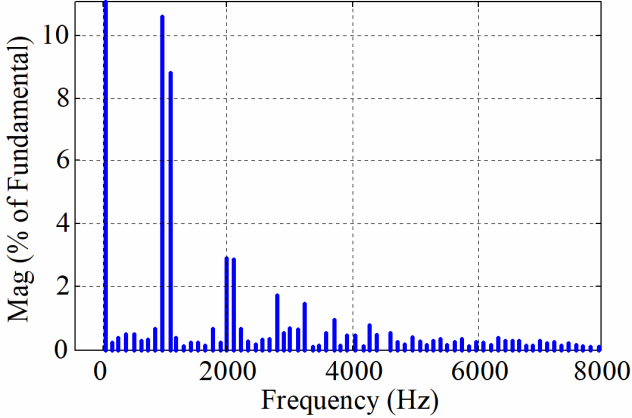
*a**б**в*

Рис. 6. Осцилограми АІН з квазіімпедансною ланкою:
a – вихідний струм; *б* – вихідна напруга; *в* – вхідний струм



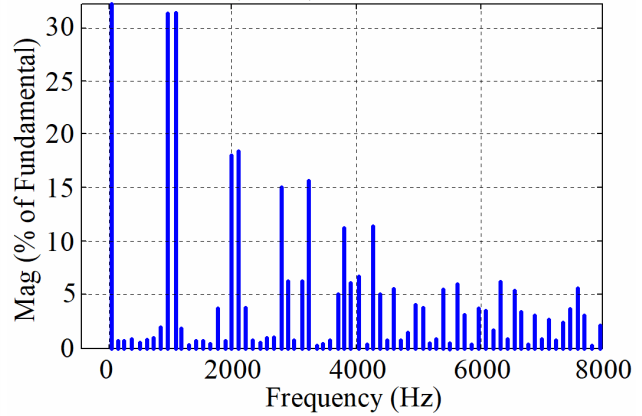
FFT analysis

Fundamental (50 Hz) = 740.3, THD = 14.86 %



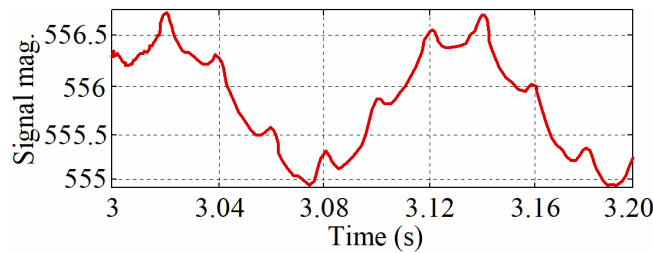
FFT analysis

Fundamental (50 Hz) = 1499, THD = 68.39 %



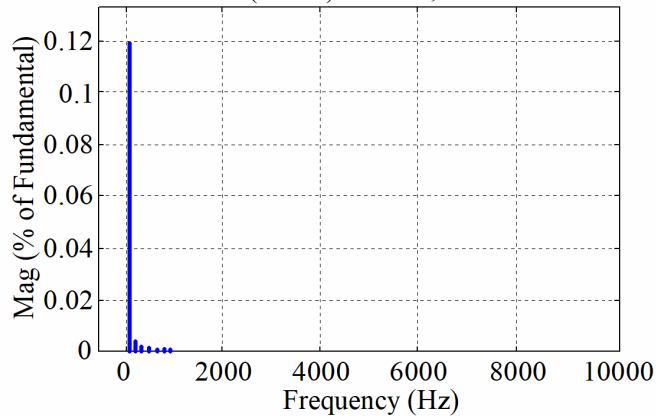
a

б



FFT analysis

Fundamental (50 Hz) = 555.8, THD = 0.13 %



в

Рис. 7. Фур'є-аналіз АІН з квазіімпедансною ланкою:
a – вихідний струм; *б* – вихідна напруга; *в* – вхідний струм

Як видно з рисунків, застосування z -інверторів з гармонік струмів до вхідної живильної мережі. У таблиці наведено параметри енергоефективності імпедансною та квазіімпедансною вхідною ланкою та алгоритмів модуляції у дворівневому АІН. значною мірою дозволяє знизити емісію вищих

Таблиця

Параметри енергоефективності алгоритмів модуляції

Показник	z -інвертор	qz -інвертор
Частота опорного сигналу, Гц	1000	1000
Амплітуда першої гармоніки вихідної напруги, В	1499	1499
Амплітуда першої гармоніки вихідного струму, А	740,3	740,3
Повна вихідна потужність АІН, кВА	3329,1	3329,1
ТНД вихідної фазної напруги, %	68,39	68,39
ТНД вихідного струму, %	14,86	14,86
Коефіцієнт пульсацій вхідного струму, %	70,88	0,13

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання

У роботі розглянуто застосування автономних інверторів напруги з імпедансною і квазіімпедансною ланками у вхідному колі. Досліджено енергетичні характеристики та показники електромагнітної сумісності вказаного типу інверторів з різними алгоритмами модуляції. Наведено порівняльний аналіз реалізованих показників пульсації вхідного струму, синусоїдальності вихідного струму і напруги та розраховано значення статичних та динамічних втрат в перетворювачі. Слід зазначити, що z -інвертори мають кращі показники електромагнітної сумісності з живильною мережею постійного струму, ніж qz -інвертори.

Список використаних джерел

- Nerubatskyi V., Plakhtii O., Ananieva O., Zinchenko O. Analysis of the Smart Grid concept for DC power supply systems. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2019. Vol. 4, Issue 4. P. 179–182.
- Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multi-level inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 118–121.
- 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.
- Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Сушко Д. Л., Кавун В. Є. Зниження динамічних втрат в активному однофазному чотириквadrантному перетворювачі з покращеним алгоритмом гістерезисної модуляції. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 88–94. DOI: [10.15407/publishing2018.51.088](https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.088).
- Xie L., Ruan X., Ye Z. Reducing common mode noise in phase-shifted full-bridge converter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018. Vol. 65. P. 7866–7877.
- Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, В. Є. Кавун та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 180. С. 106–120.
- Zhemerov G. G., Krylov D. S. Concept of construction of power circuits of a multilevel modular converter and its transistor modules. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No 6. P. 26–32. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.6.03.
- Аналіз енергетичних процесів у семирівневому автономному інверторі напруги при різних алгоритмах модуляції / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Н. П. Карпенко та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*.

2019. № 5. С. 8–18.
DOI: 10.18664/iksz.v24i5.181286.
9. Kim Y., Oh C., Sung W., Lee B. Topology and control scheme of OBC-LDC integrated power unit for electric vehicles. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017. Vol. 32. P. 1731–1743.
10. Кобзев А. В., Коновалов Б. И., Семенов В. Д. Энергетическая электроника: учеб. пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2010. 164 с.
11. Бруев А. А., Голота В. И., Завада Л. М., Таран Г. В. Источник высоковольтного питания генераторов озона на тлеющем разряде. *Вопросы атомной науки и техники.* 2000. № 1. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (2). С. 54–57.
12. Плахтий А. А., Нерубацкий В. П., Цыбульник В. Р. Стабилизация напряжений на конденсаторах ячеек в модульных многоуровневых инверторах путём применения улучшенной пространственно-векторной ШИМ. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.* 2019. № 20 (1345). С. 42–52. DOI: 10.20998/2409-9295.2019.20.06
13. Safaee A., Jain P., Bakhshai A. A ZVS pulsewidth modulation full-bridge converter with a low-RMS-current resonant auxiliary circuit. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016. Vol. 31. P. 4031–4047.
14. Mali S. M., Patil Dr. B. THD Minimization in Multilevel Inverter Using Optimization Approach. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).* 2018. Vol. 7, Issue 6. P. 97–100.
15. Vamanan N., John V. Dual-Comparison One-Cycle Control for Single-Phase Bidirectional Power Converters. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2018. Vol. 54, No. 5. P. 4621–4631. DOI: 10.1109/TIA.2018.2836359.
16. Нерубацкий В. П. Регулируемые характеристики 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування. Матеріали III всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (Маріуполь, 11–12 травня 2017 р.). Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 112–114.
17. Силкин Е. Применение нулевых схем инверторов тока с квазирезонансной коммутацией. *Силовая электроника.* 2005. № 3. С. 84–88.
18. Юрченко М. М., Гуцалюк В. Я., Герасименко П. Ю., Слесаревський І. О. Модель резонансного транзисторного інвертора напруги з низькочастотною імпульсною модуляцією. *Технічна електродинаміка.* 2011. № 1. С. 24–30.
19. Победаш К. К., Святненко В. А. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 244 с.
20. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.
21. Карпова Л. В., Гула І. В. Застосування IGBT транзисторів для задач керування у силовій електроніці. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 2015. № 2. С. 62–67.
22. Bashir S. B., Memon Z. A. An Improved Voltage Balancing Method for Grid Connected PV System Based on MMC Under Different Irradiance Conditions. *2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS).* 2018. P. 865–868. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623947.
23. 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: 10.15276/eltecs.27.103.2018.07.
24. 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. DOI: [10.1109/sbse.2018.8395687](https://doi.org/10.1109/sbse.2018.8395687).
25. Wang Q., Cheng M., Zhang B. An improved topology for the current fed parallel resonant half bridge circuits used in fluorescent lamp electronic ballasts. *J. Power Electron.* 2015. Vol. 15. P. 567–575.
26. Bharadwaj P., John V. Subcell Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Modules. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2019. Vol. 55, No. 3. P. 3046–3054. DOI: 10.1109/TIA.2019.2899813.
27. 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.

Нерубацкий В. П., Плахтий А. А., Цыбульник В.Р., Гордиенко Д. А., Хоружевский Г. А. Анализ показателей энергоэффективности автономных инверторов напряжения с импедансным и квазиимпедансным звеньями во входной цепи при применении различных алгоритмов модуляции.

Аннотация. В статье рассмотрено применение автономных инверторов напряжения с импедансным и квазиимпедансным звеньями во входной цепи. Исследованы энергетические характеристики и показатели электромагнитной совместимости указанного типа инверторов с различными алгоритмами модуляции. Приведен сравнительный анализ реализованных показателей пульсации входного тока, синусоидальности выходного тока и напряжения и рассчитано значение статических и динамических потерь в преобразователе. Определены преимущества и недостатки каждой из схем. Данные получены путём имитационного моделирования в программной среде Matlab / Simulink и расчёта в специализированной программе MelcoSim от компании Mitsubishi.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, импедансное звено, квазиимпедансное звено, модуляция, энергоэффективность, управление, преобразователь.

Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tsybulnyk V. R., Hordiienko D. A., Khoruzhevskiy H. A. Analysis of energy efficiency indicators of autonomous voltage inverters with impedance and quasi-impedance links in the input circuit using different modulation algorithms.

Abstract. Voltage Source Inverters (VSI), are widely used in asynchronous and synchronous electric drive systems, as well as power supply systems using alternative energy sources. Autonomous voltage inverters can be divided into single-level and multi-level variations by their circuit features. A promising topology of stand-alone voltage inverters is a converter using an impedance and quasi-impedance link in the input circuit. A feature of such inverters is the ability to work in additional modes, the so-called «breakdown modes». This makes it possible to adjust the input current and voltage of the inverter and allows you to transfer more of the original Power from the power source (overhead power grid or an alternative voltage source – solar battery, wind generator, biofuel cell) to the load. An additional advantage of stand-alone voltage inverters with quasi-impedance input circuit is improved

indicators of the quality of the input current, and the very lower values of the coefficient of harmonic distortion of the input current.

The purpose of this particular work is to study the indicators in the energy efficiency of an autonomous voltage inverter VSI with impedance and quasi-impedance circuit in the input circuit using different modulation algorithms. The modern control algorithms for the converter are vector pulse width modulation (PWM) and lump modulation. It should be noted that different modulation systems result in quite different indicators of sinusoidality of the input voltage and current and different ripple factor of the input current. Research consists in the formation of recommendations for the use of different modulation algorithms in different modes of operation. Investigated the energy characteristics and indicators of electromagnetic compatibility of the specified types of inverters with different modulation algorithms. A comparative analysis of the implemented indicators in the ripple of the input current, the sinusoidality of the initial current and voltage is given, and the value of static and dynamic losses in the converter is calculated. The advantages and disadvantages of each scheme have been identified. The data were obtained by simulation in the Matlab/Simulink software middle and calculation in the specialized program MelcoSim from Mitsubishi.

Key words: autonomous voltage inverter, impedance link, quasi-impedance link, modulation, energy efficiency, control, converter.

Надійшла 25.08.2020 р.

Нерубацький Володимир Павлович, к.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

Плахтій Олександр Андрійович, к.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>.

Цибульник Владислав Романович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний

університет залізничного транспорту. E-mail: vladtsybulnyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9895-6662>.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

Хоружевський Григорій Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: <mailto:khoruzhevskiy@gmail.com>. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2042-4938>.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD, associate professor department of electroenergy, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

Plakhtii Olexandr Andrievych, PhD, associate professor department of electroenergy, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>.

Tsybulnyk Vladyslav Romanovych, postgraduate department of electroenergy, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. E-mail: vladtsybulnyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9895-6662>.

Hordiienko Denys Anatolievych, postgraduate department of electroenergy, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

Khoruzhevskiy Hryhorii Anatolievych, postgraduate department of electroenergy, electrical engineering and electromechanics. Ukrainian state university of railway transport. E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2042-4938>.