

УДК 621.314

**АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ
НАПРУГИ З РІЗНИМИ ТИПАМИ МОДУЛЯЦІЇ**

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
аспіранти В. Є. Кавун (УкрДУЗТ), А. В. Машура (НТУ «ХП»),
інж. Д. А. Гордієнко (ПрАТ «ЕЛАКС»), магістрант В. Р. Цибульник

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ
ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ МОДУЛЯЦИИ**

Кандидаты техн. наук В. П. Нерубацкий, А. А. Плахтий,
аспиранты В. Е. Кавун (УкрГУЖТ), А. В. Машура (НТУ «ХПИ»),
инж. Д. А. Гордиенко (ЧАО «ЭЛАКС»), магистрант В. Р. Цыбульник

**ANALYSIS OF INDICES OF ENERGY EFFICIENCY OF AUTONOMOUS VOLTAGE
INVERTERS WITH VARIOUS MODULATION TYPES**

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, O. A. Plakhtiy, postgraduate students V. E. Kavun,
A. V. Mashura, engineer D. A. Hordiienko, master V. R. Tsybulnyk

У статті наведено аналіз енергетичних характеристик та показників електромагнітної сумісності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції. Розглянуто режими однократної модуляції зі 120-, 150- і 180-градусним керуванням, одностороння та двостороння ШІМ, а також перемодуляція в ШІМ. Подано порівняльний

аналіз реалізованих показників пульсації вхідного струму, синусоїдальності вихідного струму, значень статичних та динамічних втрат в силових ключах. Дані отримано шляхом імітаційного моделювання, а також розрахунку в спеціалізованій програмі MelcoSim від компанії Mitsubishi. Визначено, що режим перемодуляції дозволяє отримати найкращі показники якості вихідного струму інвертора.

Ключові слова: алгоритм, гармоніки, енергоефективність, інвертор напруги, керування, моделювання, модуляція, перетворювач.

В статье представлен сравнительный анализ энергетических показателей и показателей электромагнитной совместимости автономных инверторов напряжения с различными типами модуляции. Рассмотрены режимы однократной модуляции с 120-, 150- и 180-градусным управлением, односторонняя и двусторонняя ШИМ, а также режим перемодуляции в ШИМ. Приведен сравнительный анализ реализуемых показателей пульсации входного тока, синусоидальности выходного тока, величин статических и динамических потерь. Данные получены путём имитационного моделирования, а также расчёта в специализированной программе MelcoSim от компании Mitsubishi. Установлено, что режим перемодуляции позволяет получить наилучшие показатели качества выходного тока инвертора.

Ключевые слова: алгоритм, гармоніки, енергоефективність, інвертор напруги, управління, моделювання, модуляція, преобразователь.

In the article an analysis of energy characteristics and indices of electromagnetic compatibility of autonomous inverters of voltage with different types of modulation is given. Modes of single modulation with 120-, 150- and 180-degree control, one-way and two-way pulse-width modulation, as well as re-modulation mode are considered. The comparative analysis of the implemented parameters of the incoming current pulsation, sinusoidality of the output current, and the values of static and dynamic losses in power switches is presented. The data is obtained through simulation simulation, as well as calculation in the specialized program of MelcoSim from the company Mitsubishi. The obtained analytical expressions allow to determine the values of the amplitudes of higher harmonics in the forms of the output voltage and the output current of the autonomous voltage inverter under different algorithms of single modulation. It is established that the classical diagrams of the output voltage of the autonomous inverter voltage at 120- and 180-degree control are valid only for the resistive load and in the case of an RL load will have a distorted form. The dependencies of the output current THD, the THD of the output voltage, as well as the amplitude of the first harmonic of the output voltage on the value of the modulation coefficient are established. With the growth of the re-modulation coefficient, the amplitude of the output voltage increases, but with this there is an increase in the content of higher harmonics with frequencies lower than the frequency of pulse-width modulation. From the considered modulation algorithms in the autonomous voltage inverter, the smallest losses in the keys and the highest output power causes the mode of 180-degree control, and the best quality of the output voltage and current causes the mode of 150-degree control.

Keywords: algorithm, harmonics, energy efficiency, voltage inverter, control, simulation, modulation, converter.

Вступ. Автономний інвертор напруги (АІН) (рис. 1) є одним з найбільш поширених видів силових перетворювачів, які використовуються в різних галузях промисловості, що пов'язано з широким

впровадженням асинхронних двигунів (АД).

Найважливішим показником роботи АІН є енергоефективність, яка визначається такими показниками [3, 4, 6]:

- коефіцієнт корисної дії (ККД), що залежить від статичних і динамічних втрат в ключах, а також додаткових втрат, пов'язаних з опором провідників і живленням кіл керування;

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

- синусоїдальність вихідної напруги і

вихідного струму, від яких залежать додаткові втрати від вищих гармонік в навантаженні, яким найчастіше є асинхронний електродвигун.

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

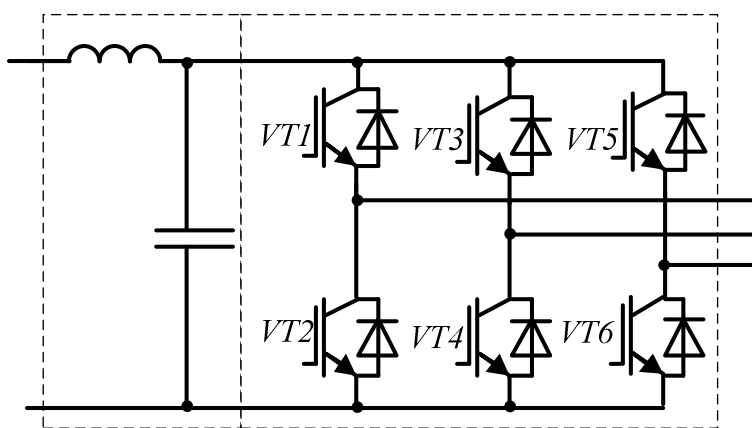


Рис. 1. Автономний інвертор напруги з вхідним LC фільтром

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі аналогові алгоритми модуляції стратегічно можна класифікувати на алгоритми, що використовують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), і алгоритми, що реалізують одноразову модуляцію. У свою чергу в широтно-імпульсній модуляції як опорні сигнали, так і сигнали завдання можуть бути різними. Існують односторонні і двосторонні опорні пилкоподібні сигнали в ШІМ [1, 2, 5]. Сигнал задання ШІМ може бути синусоїдальним, трапецеїдальним або реалізований в режимі предмодуляції або перемодуляції [7-11]. При цьому різні алгоритми модуляції обумовлюють досить різні динамічні втрати в ключах, різні показники синусоїдальності вихідної напруги і струму та різний коефіцієнт пульсації вхідного струму.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження

показників енергетичної ефективності АІН при реалізації різних алгоритмів модуляції. Завдання дослідження полягає у формуванні рекомендацій щодо використання різних алгоритмів модуляції в різних режимах роботи.

Основна частина дослідження. Для дослідження енергетичних показників АІН з досліджуваними алгоритмами модуляції в програмі Matlab була розроблена модель АІН, в якому реалізовані різні алгоритми модуляції. Моделювання проводилося з такими параметрами: напруга в ланці постійного струму 3 кВ; індуктивність навантаження 1 мГн, опір навантаження 2 Ом, частота першої гармоніки вихідної напруги 50 Гц. Імітаційну модель автономного інвертора напруги з досліджуваними системами керування наведено рис. 2.

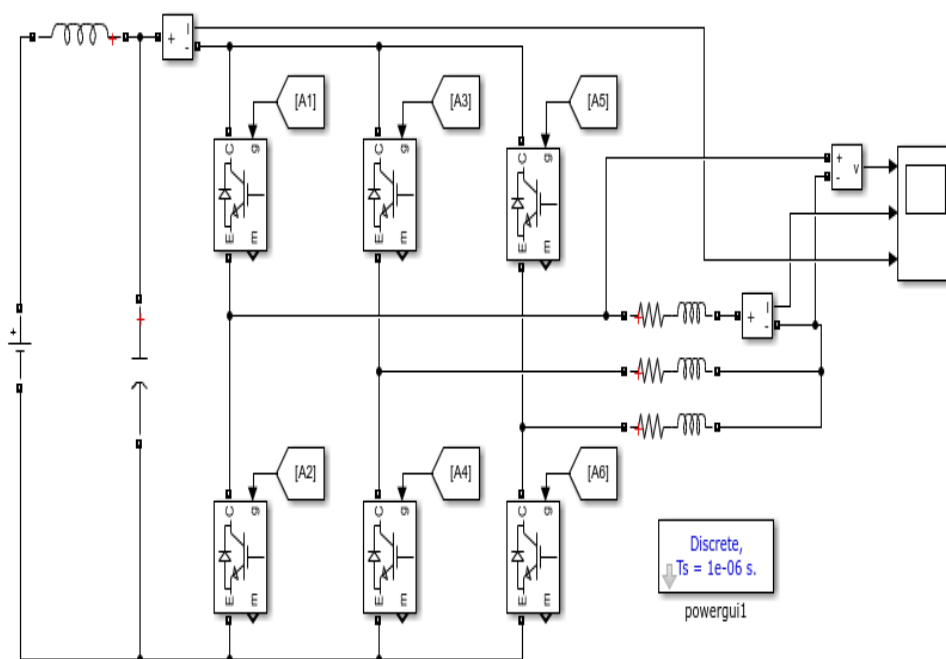


Рис. 2. Імітаційна модель АИН

Режими однократної модуляції є одними з історично перших алгоритмів модуляції в системах керування АИН, а саме 120-, 150- та 180-градусних алгоритмів керування [1, 2]. Перевагою даних алгоритмів керування АИН є низька частота комутації силових ключів, рівна частоті вихідної напруги, що відповідно веде до низьких динамічних втрат у силових ключах та, як результат, реалізації достатньо високого ККД. Проте не варто забувати і про супутні недоліки режимів однократної модуляції: відносно високий вміст вищих низькочастотних гармонічних компонентів у вихідній напрузі та струмі, а також відсутність можливості регулювання амплітуд вихідної напруги та струму. Таким

чином, можна зробити висновок про оптимальність використання режимів однократної модуляції при переході на номінальний режим роботи перетворювача.

У режимі 120-градусного керування АИН в кожний момент часу одночасно у провідному стані розташовані два силові ключі АИН, при цьому кожен силовий ключ знаходиться в провідному стані протягом однієї третини періоду модульованої вихідної напруги. Сигнали керування силовими ключами АИН в режимі 120-градусного керування наведено на рис. 3.

При розкладанні форми вихідної фазної напруги u_ϕ АИН в режимі 120-градусного керування в ряд Фур'є отримуємо таку функцію:

$$u_\phi = U_1 \cdot \sin(\omega t) + \sum_{n=5}^{\infty} U_n \cdot \sin(n \cdot \omega t), \quad (1)$$

де U_1 – амплітуда першої гармоніки вихідної напруги;

n – порядок вищих гармонік в спектрі вихідної напруги.

При цьому амплітуда n -ї гармоніки вихідної фазної напруги в режимі 120-градусного керування може бути визначена згідно з виразом

$$U_n = \frac{U_d}{1,814 \cdot n}. \quad (2)$$

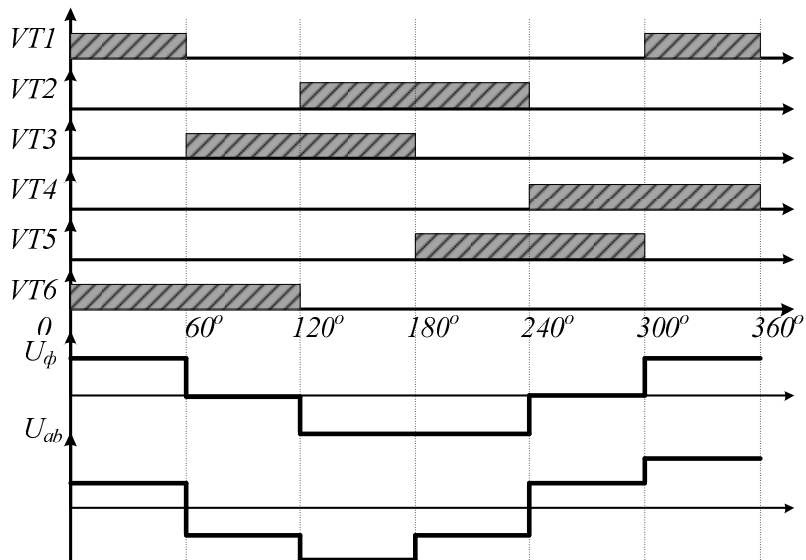


Рис. 3. Сигнали керування ключами АІН і форма вихідної напруги в режимі 120-градусного керування

Навантаженням АІН у більшості випадків є АД. Подавши АД у вигляді еквівалентного RL -навантаження з комплексним опором $\overline{Z_n}$, можна отримати вираз, що дозволяє визначити амплітуду будь-якої з вищих гармонік:

$$I_n = \frac{U_n}{Z_n}, \quad (3)$$

де I_n – амплітуда n -ї гармоніки вихідного струму;

U_n – амплітуда n -ї гармоніки вихідної фазної напруги.

Результати моделювання АІН при реалізації 120-градусного керування з R і RL -навантаженням наведено на рис. 4.

У режимі 180-градусного керування у провідному стані одночасно знаходяться три ключі інвертора, при цьому кожен з

ключів знаходиться у провідному стані протягом половини інтервалу провідного стану. Сигнали керування силовими ключами АІН в режимі 180-градусного керування і форма вихідної фазної напруги АІН наведені на рис. 5.

Частоти вищих гармонік вихідної напруги АІН в режимі 120- і 180-градусного керування будуть ті ж, а саме кратні $6 \cdot f_1 \pm 1$, де f_1 – частота першої гармоніки вихідної напруги. Однак амплітуди вищих гармонік будуть відрізнятися. Амплітуда n -ї гармоніки вихідної фазної напруги в режимі 180-градусного керування може бути отримана виходячи з виразу

$$U_n = \frac{2 \cdot U_d}{\pi \cdot n}, \quad (4)$$

де U_d – напруга в ланці постійного струму.

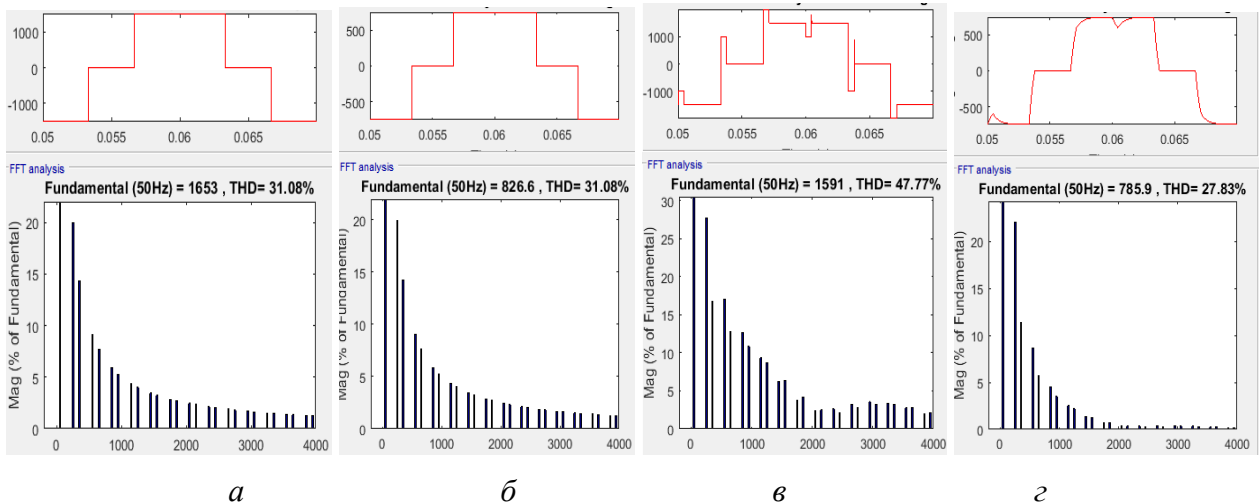


Рис. 4. Результати Фур'є-аналізу за результатами моделювання АІН при реалізації 120-градусного керування:

a – u_ϕ АІН при *R*-навантаженні; *б* – i_ϕ АІН при *R*-навантаженні;
в – u_ϕ при *RL*-навантаженні; *г* – i_ϕ при *RL*-навантаженні

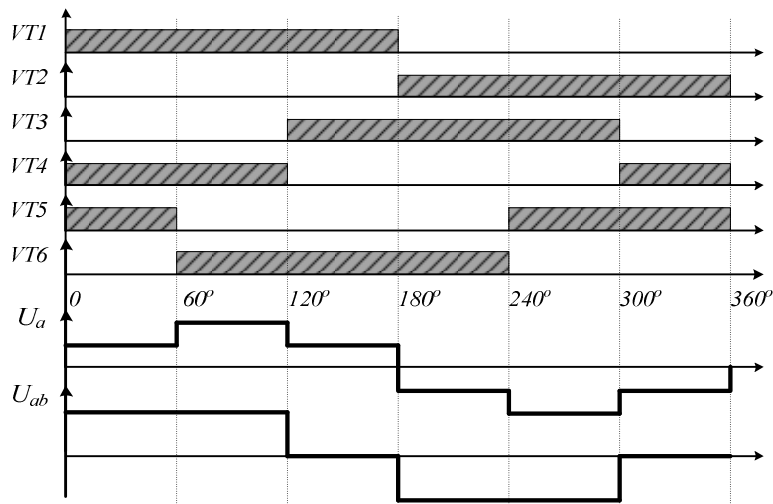


Рис. 5. Сигнали керування ключами АІН і форма вихідної напруги фази *A* в режимі 180-градусного керування

Таким чином, в режимі 180-градусного керування при тих же параметрах напруги живлення і при тому ж навантаженні амплітуда першої гармоніки вихідної напруги буде значно вище (рис. 6).

У режимі 150-градусного керування ключі знаходяться у провідному стані протягом 150 градусів, тобто 5/12 від періоду вихідної напруги. Сигнали керування силовими ключами АІН в режимі 150-градусного керування наведено на рис. 7.

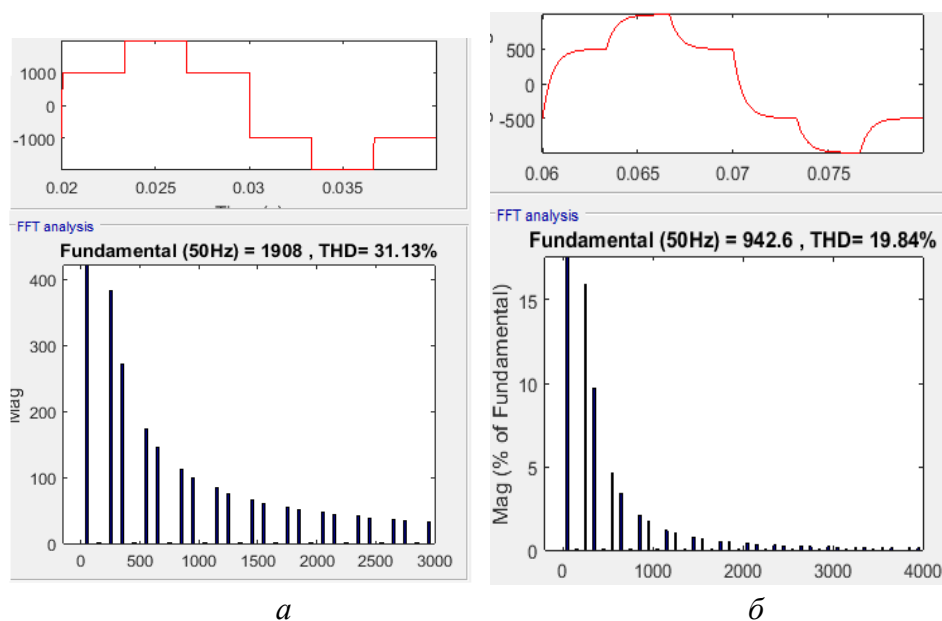


Рис. 6. Результати Фур'є-аналізу за результатами моделювання АІН при реалізації 180-градусного керування: *a* – u_{ϕ} АІН; *б* – i_{ϕ} АІН

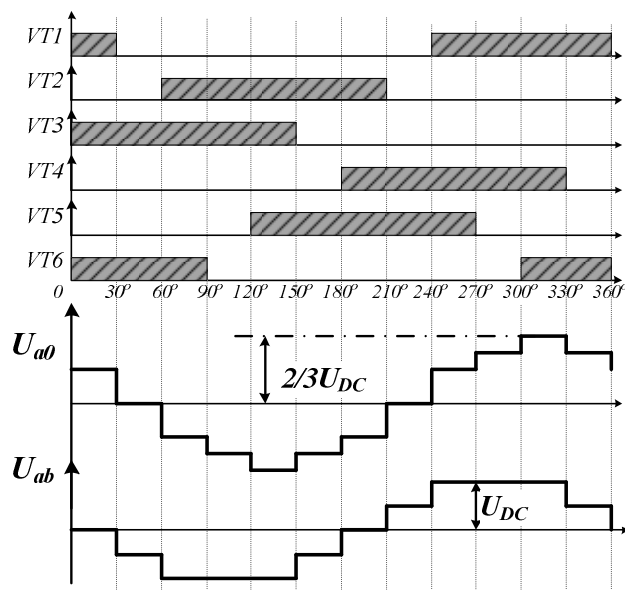


Рис. 7. Сигнали керування ключами АІН і форма вихідної напруги фази *A* в режимі 150-градусного керування

Відмінною особливістю режиму 150-градусного керування є те, що у вихідній напрузі амплітуди гармонік, непарних частотам $6 \cdot f_1 \pm 1$ (тобто для ряду гармонік

$m = 5, 7, 17, 19$), і амплітуди гармонік, парних частотам $6 \cdot f_1 \pm 1$ (тобто для ряду гармонік $n = 11, 13, 23, 25$), описуються різними виразами:

$$U_{mч} = \frac{0,1645 \cdot U_d}{m}; \quad U_{nч} = \frac{0,614 \cdot U_d}{n}, \quad (5)$$

де U_{nc} – амплітуди вищих гармонік вихідної напруги, непарних частотам $6 \cdot f_1 \pm 1$;

U_{nc} – амплітуди вищих гармонік вихідної напруги, парних частотам $6 \cdot f_1 \pm 1$.

Фур'є-аналіз вихідної напруги і струму за результатами імітаційного моделювання АІН при реалізації 150-градусного керування наведено на рис. 8.

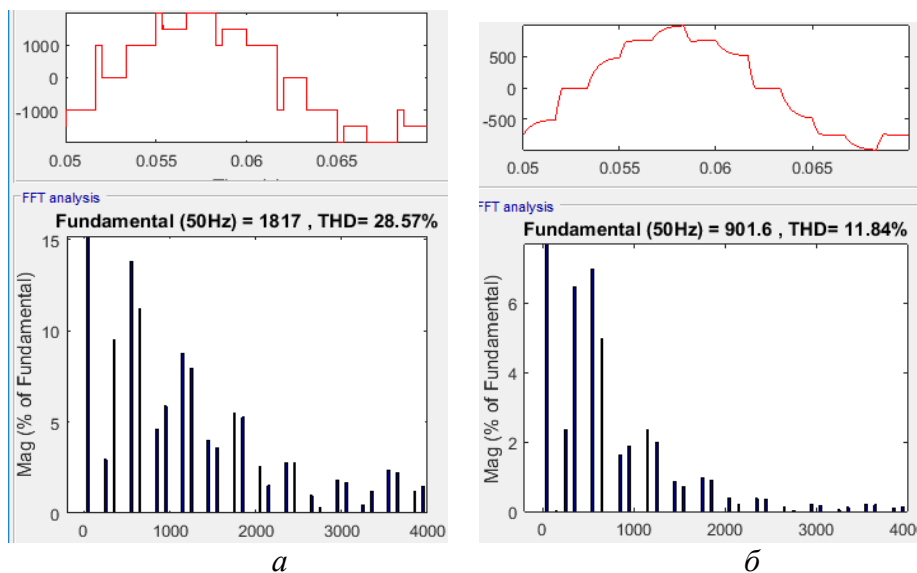


Рис. 8. Результати Фур'є-аналізу за результатами моделювання АІН при реалізації 150-градусного керування: *a* – u_{ϕ} АІН; *б* – i_{ϕ} АІН

Проведене моделювання показало, що класичні епюри вихідної напруги АІН в режимах 120- і 150-градусного керування, наведені в літературі [2, 3, 4], відрізняються від отриманих при моделюванні, що обумовлено тим, що в літературі наведено форми вихідної напруги виключно для резистивного навантаження. При цьому індуктивна складова навантаження спотворює форму вихідної напруги і погіршує показники її синусоїдальності, тим самим впливаючи і на показники синусоїдальності вихідної напруги.

Результати розрахунків статичних і динамічних втрат АІН в режимах однократної модуляції, а також результати моделювання енергетичних показників наведено в табл. 1.

Широтно-імпульсна модуляція в класичному аналоговому виконанні реалізується шляхом порівняння

високочастотного пилкоподібного сигналу і низькочастотного синусоїдального сигналу. Перевагою ШІМ перед однократною модуляцією є можливість регулювання амплітуди першої гармоніки вихідної напруги, і відповідно струму, що є необхідним як при скалярному, так і при векторному керуванні асинхронного електропривода.

Одностороння і двостороння ШІМ з синусоїдальним сигналом задання (рис. 9) є найбільш поширеними аналоговими видами модуляції і засновані вони на порівнянні пилкоподібного сигналу і синуса. Очевидним фактом є відмінність енергетичних показників АІН з односторонньою і двосторонньою ШІМ. Фур'є-аналізи форми вихідної напруги і вихідного струму АІН з односторонньою і двосторонньою ШІМ при частоті 1 кГц наведено на рис. 10.

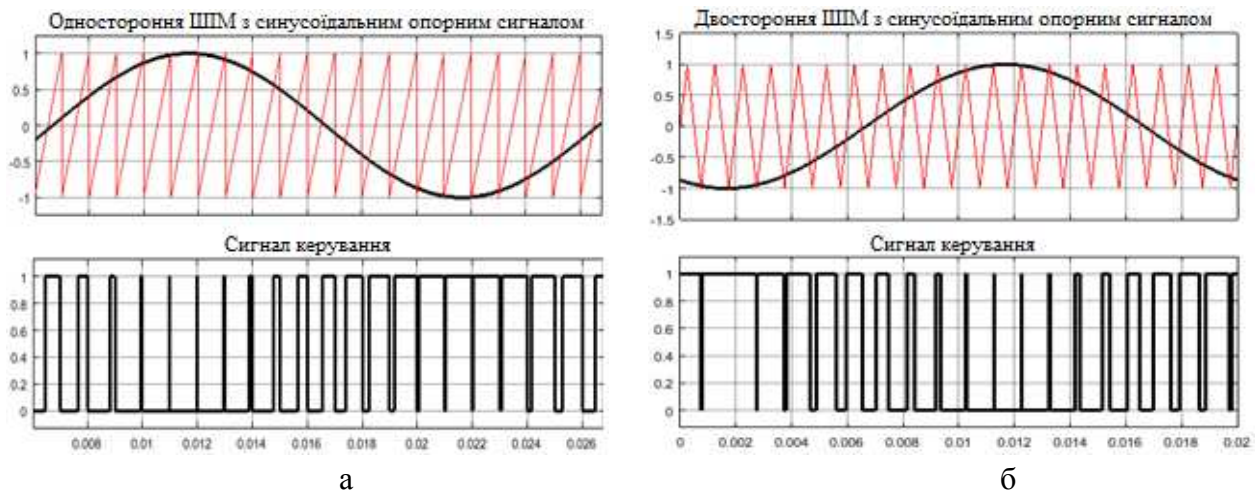


Рис. 9. Широтно-імпульсна модуляція:
a – з одностороннім опорним сигналом; *б* – з двостороннім опорним сигналом

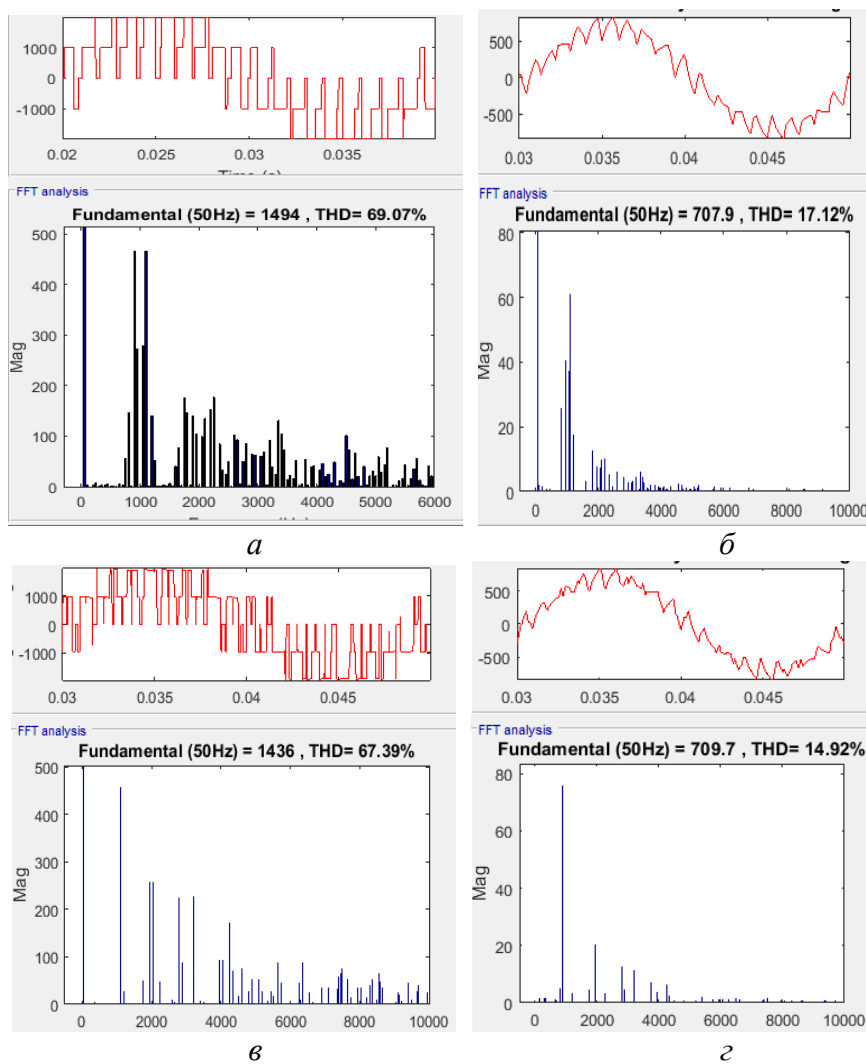


Рис. 10. Результати Фур'є-аналізу за результатами моделювання АІН:
a – $U_{вих}$ АІН при односторонній ШІМ; *б* – $I_{вих}$ при односторонній ШІМ;
в – $U_{вих}$ при двосторонній ШІМ; *г* – $I_{вих}$ при двосторонній ШІМ

Слід зауважити, що двостороння ШІМ забезпечує покращені, в порівнянні з однократною модуляцією і односторонньою ШІМ, коефіцієнт гармонічних спотворень вихідної напруги, рівний 67,39 %, і коефіцієнт гармонічних спотворень (він же total harmonic distortion – THD), рівний 14,92 %.

У режимі ШІМ-перемодуляції амплітуда синусоїдального сигналу задання навмисно задається вище амплітуди несучого пилкоподібного сигналу, тобто коефіцієнт модуляції $k > 1$.

$$k = \frac{A_{\sin}}{A_{\text{пил}}}, \quad (6)$$

де A_{\sin} – амплітуда синусоїдального сигналу задання;

$A_{\text{пил}}$ – амплітуда пилкоподібного несучого сигналу.

Режим ШІМ перемодуляції є більш енергоефективним, ніж класична синусоїдальна ШІМ. Це пов'язано з тим, що амплітуда першої гармоніки вихідної напруги в режимі перемодуляції прагне до значення при 180-градусному керуванні. При цьому поліпшується також і синусоїдальність вихідної напруги. Крім цього в режимі перемодуляції формуються інтервали часу, в які не відбувається комутація силових ключів, що веде до зниження числа перемикань силових ключів, а відповідно і зниження динамічних втрат.

Результати моделювання АІН в режимі перемодуляції при $k = 2$ наведено на рис. 11.

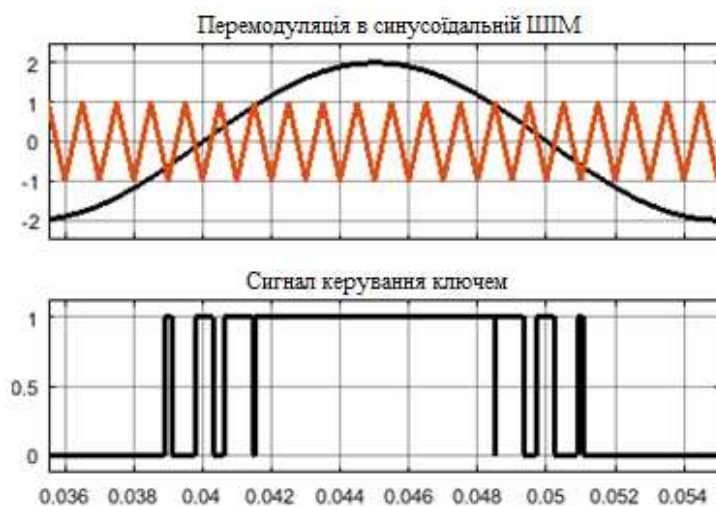


Рис. 11. Синусоїдальна ШІМ в режимі перемодуляції

Фур'є-аналіз вихідної фазної напруги та струму АІН в режимі перемодуляції при $k = 2$ наведено на рис. 12. Зі зростанням значення коефіцієнта модуляції k амплітуди перших гармонік вихідної напруги і вихідного струму будуть експоненціально прагнути до тих же значень при 180-градусному керуванні.

Залежність амплітуди першої гармоніки вихідного струму від значення коефіцієнта модуляції наведено на рис. 13.

Зі зростанням значення коефіцієнта модуляції k значення коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги буде експоненціально спадати до значення при режимі однократної модуляції. Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги АІН від коефіцієнта модуляції наведено на рис. 14.

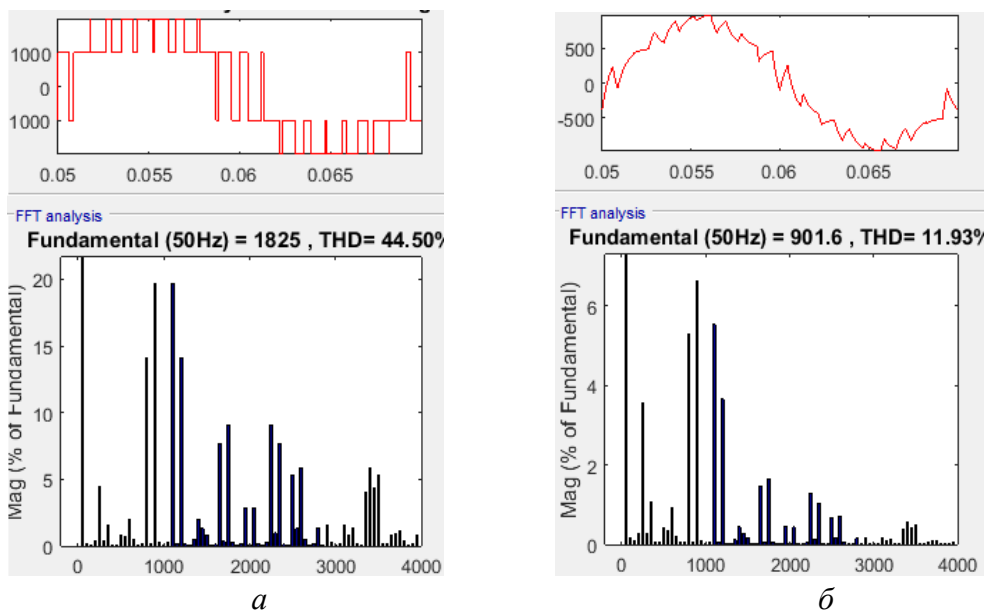


Рис. 12. Фур'є-аналіз АІН в режимі перемодуляції при $k = 2$: $a - U_{вих}$ АІН; $б - I_{вих}$ АІН

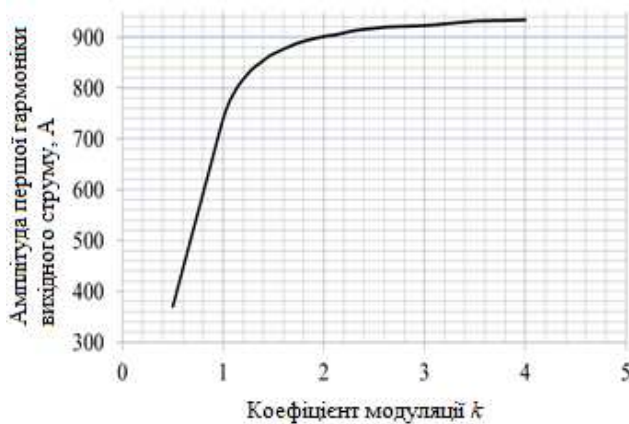


Рис. 13. Залежність амплітуди першої гармоніки вихідного струму від значення коефіцієнта модуляції

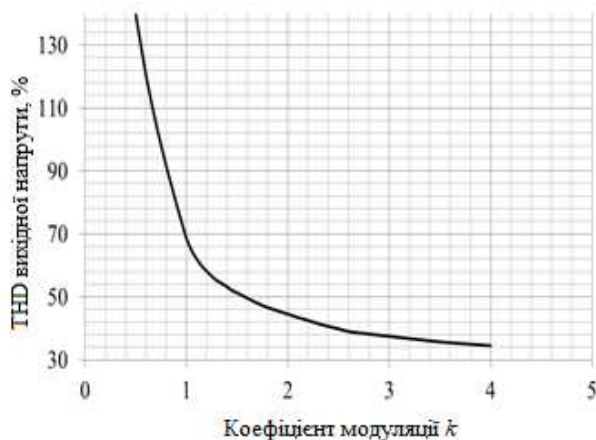


Рис. 14. Залежність THD вихідної напруги від коефіцієнта модуляції

Режим перемодуляції викликає зростання низькочастотних гармонічних складових. У свою чергу навантаження є фільтром низьких частот і гармоніки з меншими частотами пригнічує в меншій

мірі. У зв'язку з цим після певного значення k якість вихідної напруги почне погіршуватися. Залежність ТНД $I_{вих}$ від коефіцієнта модуляції наведено на рис. 15.



Рис. 15. Залежність ТНД вихідного струму від коефіцієнта модуляції

Таблиця

Параметри енергоефективності алгоритмів модуляції в дворівневому АІН

Показники	Однократна модуляція			Широтно-імпульсна модуляція		
	120°	180°	150°	1-стор. $k = 1$	2-стор. $k = 1$	2-стор. $k = 2$
Частота опорного сигналу, Гц	50	50	50	1000	1000	1000
Середня на періоді частота комутації, Гц	50	50	50	1000	1000	350
Амплітуда першої гармоніки вихідної напруги, В	1597	1909	1825	1500	1502	1825
Амплітуда першої гармоніки вихідного струму, А	785,9	942,6	901,6	741,4	742,5	901,6
Повна вихідна потужність АІН, кВА	1882,6	2699	2468,13	1668,1	1672,85	2468,1
ТНД вихідної фазної напруги, %	31,06* 47,64**	31,06	16,8* 28,56**	69,07	67,39	44,5
ТНД вихідного струму, %	27,71	19,77	11,84	17,12	14,92	11,93
Коефіцієнт пульсацій вхідного струму, %	31,08	17,61	20,59	70,23	68,79	21,47
Статичні втрати одного ключа (IGBT + діод), Вт	766	988	771	700	702	924,44
Динамічні втрати одного ключа (IGBT + діод), Вт	161	184	178	3087	3091	1241
Сумарні втрати в одному ключі АІН ΔP , Вт	927	1172	949	3787	3793	2165,4

Примітки: * для R-навантаження; ** для RL-навантаження.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що використання режиму перемодуляції доцільно до значення коефіцієнта перемодуляції $k < 2,1$, після якого спостерігається погіршення синусоїдальності вихідного струму.

Розрахунок статичних і динамічних втрат для розглянутих алгоритмів модуляції було проведено для IGBT-модулів типу CM1200HG-90R виробництва компанії Mitsubishi Electric з номінальною напругою 3,3 кВ і струмом 1200 А. Розрахунок було виконано у спеціалізованій програмі MelcoSim виробництва тієї ж компанії. Результати розрахунку наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, найменші показники втрат в IGBT ключах і найбільшу амплітуду вихідної напруги і струму має алгоритм 180-градусного керування, а найкращі показники якості вихідної напруги і вихідного струму АІН обумовлює режим 150-градусного керування.

Висновки

1. Отримані аналітичні вирази дозволяють визначити значення амплітуд вищих гармонік в формах вихідної напруги і вихідного струму АІН при різних алгоритмах однократної модуляції.

2. Встановлено, що класичні епюри вихідної напруги АІН при 120- і 180-градусному керуванні справедливі виключно для резистивного навантаження і у разі RL-навантаження будуть мати спотворену форму.

3. Встановлено залежності THD Івих, THD Увих, а також амплітуди першої гармоніки вихідної напруги від значення коефіцієнта модуляції.

4. Визначено, що найкращі показники якості вихідного струму дозволяють отримати режими 150-градусного керування та режим перемодуляції.

5. Визначено, що найменші втрати в ключах, найбільший ККД та найбільшу вихідну потужність обумовлює режим 180-градусного керування.

Список використаних джерел

1. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст] : учеб. пособие / Г. С. Зиновьев. – 3-е изд. – Новосибирск : Изд. НГТУ, 2004. – 672 с.
2. Михальський, В. М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частот із широтно-імпульсною модуляцією [Текст] / В. М. Михальський. – К. : Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.
3. Нерубацький, В. П. Регульовальні характеристики активного чотириквadrантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації [Текст] / Я. В. Щербак, О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 6. – С. 26–31.
4. Нерубацький, В. П. Анализ энергетических характеристик активного четырехквadrантного выпрямителя с различными типами широтно-импульсной модуляции [Текст] / Я. В. Щербак, А. А. Плахтій, В. П. Нерубацький // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 27 (1249). – С. 221-225.
5. Borrega, M. Modeling and control of a master-slave PV inverter with n-paralleled inverters and three-phase three-limb inductors [Text] / M. Borrega, L. Marroyo, R. Gonzalez, J. Balda, J. Agorreta // IEEE Trans. Power Electron. Jun. 2013. Vol. 28. No. 6. P. 2842–2855.
6. Kostic, D. J. A new approach to theoretical analysis of harmonic content of PWM waveforms of single- and multiple-frequency modulators [Text] / Kostic D. J., Avramovic Z. Z., Ciric N. T. // IEEE Trans. Power Electron. – Oct. 2013. – Vol. 28. No. 10. – P. 4557–4567.
7. Lazzarin, T. A control strategy for parallel operation of single-phase voltage source inverters: analysis, design and experimental results [Text] / Lazzarin T., Bauer G., Barbi I. // IEEE Trans. Ind. Electron. – Jun. 2013. – Vol. 60. No. 6. – P. 2194–2204.

8. McGrath, B.P. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters [Text] / McGrath B.P., Holmes D.G. // IEEE Trans. Ind. Electron. – Aug. 2002. – Vol. 49. No. 4. – P. 858–867.
 9. Naderi, R. Phase-shifted carrier PWM technique for general cascaded inverters [Text] / Naderi R., Rahmati A. // IEEE Trans. Power Electron. – May, 2008. Vol. 23. No. 3. – P. 1257–1269.
 10. Rashid, M.H. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook 3rd [Text] / Naderi R., Rahmati A. // ed. Elsevier Inc, 2011. – 1389 p.
 11. Zheng, Jun. The Transient Current Control for Single Phase PWM Rectifiers [Text] / Zheng Jun, Feng Xiaoyun, Xie Wangyu, Zhang Junling // Power Electronics. – 2009. – Vol. 43. No. 12. – P. 2–4.
-

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76.
E-mail: NVP9@i.ua.

Плахтій Олександр Андрійович, канд. техн. наук, старш. викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76.
E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Кавун Віталій Євгенович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, інженер-електронік конструкторського бюро «ВО ОВЕН». Тел.: (050) 981-90-05. E-mail: vitaliykavun2014@gmail.com.

Машура Артем Вячеславович, аспірант кафедри промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», інженер-конструктор конструкторського бюро «ВО ОВЕН». Тел.: (099) 343-30-72. E-mail: artemmashura94@gmail.com.

Гордієнко Денис Анатолійович, інженер ПрАТ «ЕЛАКС» (м. Харків). Тел.: (099) 612-02-12.
E-mail: D.Hordiienko@i.ua.

Цибульник Владислав Романович, магістрант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (066) 945-95-75.
Email: vladtsybulnyk@gmail.com.

Нерубацький Владимир Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua.

Плахтий Александр Андреевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Кавун Виталий Евгеньевич, аспирант кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, инженер-электроник конструкторского бюро «ПО ОВЕН». Тел.: (050) 981-90-05. E-mail: vitaliykavun2014@gmail.com.

Машура Артем Вячеславович, аспирант кафедры промышленной и биомедицинской электроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», инженер-конструктор конструкторского бюро «ПО ОВЕН». Тел.: (099) 343-30-72. E-mail: artemmashura94@gmail.com.

Гордиенко Денис Анатольевич, инженер ЗАО «ЭЛАКС» (г. Харьков). Тел.: (099) 612-02-12.
E-mail: D.Hordiienko@i.ua.

Цыбульник Владислав Романович, магистрант кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (066) 945-95-75.
E-mail: vladtsybulnyk@gmail.com.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (057) 730-10-76.
E-mail: NVP9@i.ua.

Plakhtiy Alexandr Andreevich, PhD (Tech.), Sr. lecturer, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (057) 730-10-76.
E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Kavun Vitaliy Evgenyevich, postgraduate student, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, the electronic engineer of the design office of the company «VO OVEN». Ph.: (050) 981-90-05. E-mail: vitaliykavun2014@gmail.com.

Mashura Artem Vyacheslavovych, postgraduate student, Department of Industrial and Biomedical Electronics of the National Technical University «KhPI», the design engineer of the design office of the company «VO OWEN».

Ph.: (099) 343-30-72. E-mail: artemmashura94@gmail.com.

Hordiienko Denys Anatolievych, engineer of Private JSC «ELAKS» (Kharkiv). Ph.: (099) 612-02-12.

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

Tsybulnyk Vladislav Romanovych, master, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (066) 945-95-75.

Email: vladtsybulnyk@gmail.com.

Статтю прийнято 26.10.2018 р.