

## АЛГОРИТМИ ФОРМУВАННЯ ВИХІДНОЇ ШІМ НАПРУГИ ІНВЕРТОРА ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

*Чорний О.П., д.т.н., проф., Остапенко А.В., магістр.*

*Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського  
39600, г. Кременчуг, Полтавская обл., ул. Первомайская, 20*

*E-mail: [apch@polytech.poltava.ua](mailto:apch@polytech.poltava.ua)*

*Воробейчик О.С., Урдин І.В., Топчиенко Ю.А.*

*50000, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. Тбилиская, 11, ТОВ "Семіол"*

*E-mail: [igor@semiol.dp.ua](mailto:igor@semiol.dp.ua)*

Предложен алгоритм формирования выходного ШИМ напряжения автономного инвертора. Расчетным и экспериментальным путем показана идентичность формируемого напряжения его реальной форме на выходе инвертора.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, автономный инвертор, модель, регулируемый электропривод.

The forming algorithm of output PWM voltage of self-commutated inverter is offered. Identity of formed voltage to real-life output inverter voltage is shown by rated and observed research.

**Key words:** frequency converter, self-commutated inverter, model, active electric drive.

**Вступ.** Численне сучасне устаткування промислових і комерційних технологій, використовуване в широкому діапазоні потужностей, вимагає трифазного живлення змінного струму з необхідною амплітудою і частотою. При використанні, як основне джерело, енергії змінного струму промислової мережі, перетворювачі забезпечують: стабілізацію вихідної напруги при постійності частоти 50 Гц в системах безперебійного живлення [1, 2]; регулювання амплітуди і частоти вихідної напруги в електроприводах змінного струму [3], системах електротермічної технології і т.п. В системах частотно-регульованих електроприводів (ЕП) з АД необхідно змінювати напругу в широкому діапазоні як по амплітуді, так і по частоті. Для вирішення питань оптимального керування необхідно забезпечувати певне співвідношення між напругою і частотою. Ця обставина накладає особливі вимоги на перетворювачі для забезпечення стабільного або регульованого електроживлення різного типу навантажень. І якщо для напруги, по формі близької до синусоїди, вказані питання здебільшого досліджені, то врахування реальної форми ШІМ напруги дозволить більш повно досліджувати процеси перетворення енергії в частотно-регульованих електроприводах.

**Аналіз попередніх досліджень.** В системах з подвійним перетворенням енергії (ППЕ) відбувається перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму, а потім навпаки. Однополярний ШІМ - перетворювач, що формує напругу у вигляді напівхвиль синусоїдальної форми, і низькочастотний комутатор НЧК, що інвертує ці напівхвилі в напругу змінного струму, знаходить своє застосування у ряді систем частотно-регульованого ЕП [4]. Найширше застосування отримали ШІ - інвертування, що формує в поєднанні з вихідними фільтрами синусоїдальну напругу основної частоти. Останніми

роками у зв'язку із значним прогресом в створенні швидкодіючих силових напівпровідникових приладів намітилася тенденція до створення більш досконалих топологій перетворювачів змінного струму. До таких топологій, передусім, відносяться матричні і гібридні структури. Це пояснюється прагненням вирішити наступні основні задачі: поліпшення енергетичних показників системи (коефіцієнта потужності і ККД); мінімізація вищих гармонік вхідного і вихідного струмів для забезпечення вимог ЕМС по входу і виходу перетворювача; поліпшення малогабаритних показників перетворювачів за рахунок зниження величин використовуваних реактивних елементів; розширення діапазону потужності перетворювачів. В даний час наймасовішим і перспективним типом електроприводу є ЕП «перетворювач частоти з ланкою постійного струму - асинхронний двигун» (ПЧ-АД), в якому частіше за всього використовується автономний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). В загальному випадку всі види ШІМ використовують зміну тривалості імпульсів рівної амплітуди, що слідує через рівні інтервали часу відповідно до ухваленого закону формування напруги. Закони формування, загальні, для будь-якого методу модуляції визначаються функцією побудови (модуючим сигналом). Слід зазначити, що у зв'язку з розвитком методів формування синусоїдальної напруги, трапецеїдальна ШІМ вже майже витіснена синусоїдальною. Двополярна ШІМ характеризується постійним діючим значенням вихідної напруги, тому регулювання значення основної гармоніки супроводжується перерозподілом енергії в спектрі. Однополярна ШІМ дає кращий гармонійний склад, діючі значення напруги при цьому менші, ніж в двополярному варіанті. Форми вихідної модульованої напруги наведені на рис. 1.

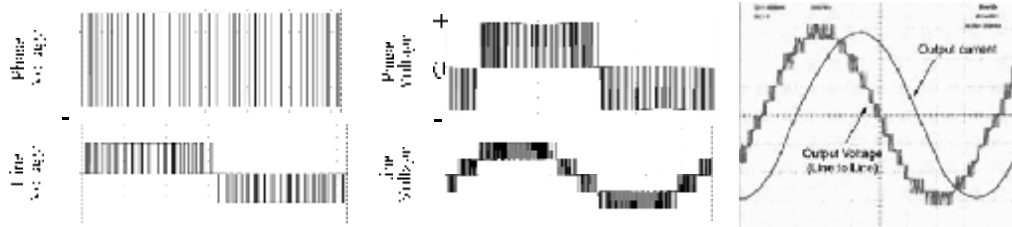


Рисунок 1 – Форма вихідної напруги 2-х рівневого, 3-х рівневого та багаторівневого інвертора

**Мета роботи.** Формування алгоритмів побудови реальної форми ШІМ напруги інвертора для задач моделювання частотно-регульованих електроприводів.

**Матеріал і результати досліджень.** Динамічні властивості імпульсних перетворювачів частоти з ШІМ при моделюванні за середніми значеннями вихідного параметру – спрощені моделі – описуються за допомогою аперіодичних ланок із урахуванням або без урахування сталої часу СІК [5]. Застосування в системах ЕП таких перетворювачів потребує не аналітичного, а скоріше алгоритмічного опису із застосуванням логічних рівнянь, бо саме урахування форми напруги на АД дозволяє в повній мірі дослідити енергетичні та динамічні показники ЕП. Аналіз спрощених моделей дозволяє зробити наступні висновки: спрощені моделі на основі аперіодичних ланок дозволяють врахувати власну інерційність перетворювачів, однак забезпечують

живлення ЕП лише за середніми значеннями, не враховуючи реальну форму вихідних координат; запис рівняння для електромагнітного кола перетворювача дозволяє врахувати струм електричного двигуна, однак система залишається, по суті, розімкненою з мережею живлення всієї ЕМС; моделі не враховують зміну роботи перетворювача від струму в інтервалах комутації ключів; виникає необхідність введення нелінійних функцій для реалізації не прямо пропорційних законів керування для ПЧ, хоча це можна врахувати через відношення приросту вихідної частоти до приросту керуючого сигналу.

Модель ШІМ побудуємо на основі формування вибірок з використанням синусоїдального сигналу і частоти модуляції. При цьому вмикання і вимкання ключів здійснюється в моменти перетину синусоїдального сигналу завдання і сигналу трикутної форми – рис. 2.

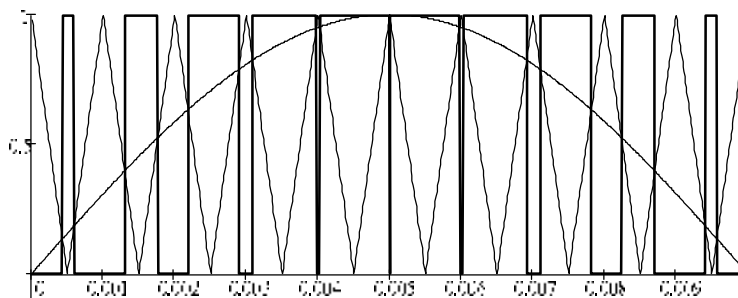


Рисунок 2 – Формування модульованого однополярного сигналу трикутноподібною напругою (фрагмент)

Формування однополярної ШІМ напруги здійснюється за виразом:

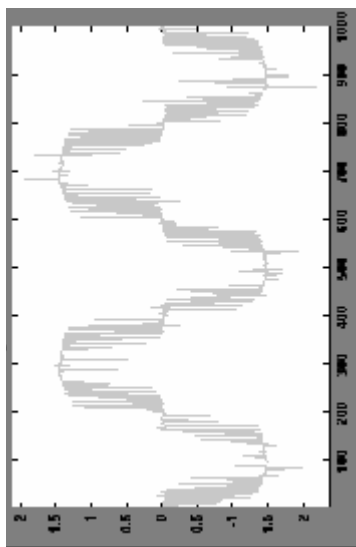
$$U_{\text{шум}}(t) = U_k (1 - [M(t) + 1 - g U_z(t, j_k, f_{\text{вих}})]), \quad (1)$$

формування двополярної ШІМ напруги здійснюється за виразом:

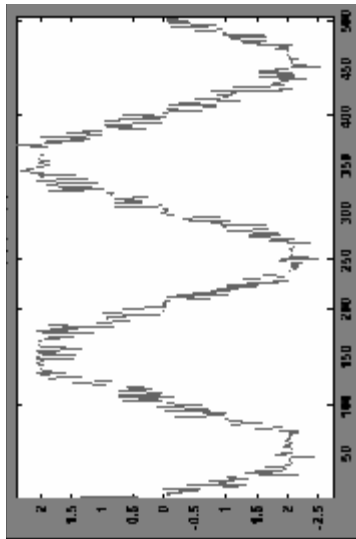
$$U_{\text{шум}}(t) = U_k (0,5 - [M(t) + 1 - g |U_z(0,5t, j_k, f_{\text{вих}})|]), \quad (2)$$

де  $U_{\text{шум}}$  – напруга, формована на виході інвертора;  $M(t) = |2 \text{mantissa}(f_m t) - 1|$ ,  $M(t) = \text{mantissa}(f_m t)$  – при формуванні ШІМ трикутноподібною, пилоподібною напругою;  $U_k$ ,  $\varphi_k$  – амплітуда і фаза  $k$ -й гармоніки по фазам А, В, С;  $U_z(t, f_{\text{вих}}, j_k)$  – сигнал завдання;  $f_m$ ,  $f_{\text{вих}}$  – частота модуляції і частота на виході інвертора;  $\gamma$  – коефіцієнт шпаруватості; [...] – вирахування цілої частини.

Для порівняння тотожності формованих сигналів реальній формі вихідної напруги інвертора виконані експериментальні дослідження перетворювачів частоти Mitsubishi. Сигнали на виході перетворювача, що отримані експериментальним шляхом показані на рис. 3-5. Аналіз вихідної напруги ускладнений, оскільки при живленні асинхронного двигуна спостерігаються викиди, обумовлені явищем комутації, а також добре видно завади, що вносяться АЦП і вимірювальним каналом. Для виділення форми сигналу використаємо вейвлет-перетворення, яке володіє добрими фільтруючими властивостями. Результати виділення вихідної напруги перетворювача з сигналу та сигнали напруги, синтезовані за допомогою алгоритмів (1) і (2), показані на рис. 3-5. Розглянемо, як приклад, вигляд динамічних режимів при пуску АД і накиді навантаження при живленні від перетворювача частоти з реальною та ідеальною формою вихідної напруги (рис. 4).

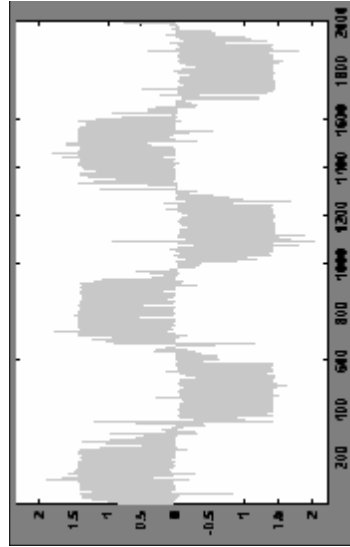


а)

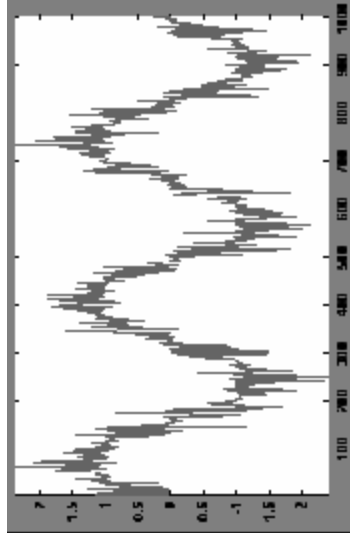


б)

Рисунок 3 – Вихідна напруга перетворювача Mitsubishi F500 частотою 50 Гц (закон регулювання квадратичний) – а), сигнал на першому рівні перетворення, отриманий з використанням вейвлету Добеши (db4) – б), сигнал, отриманий з використанням синтезованого алгоритму в Mathcad – в)

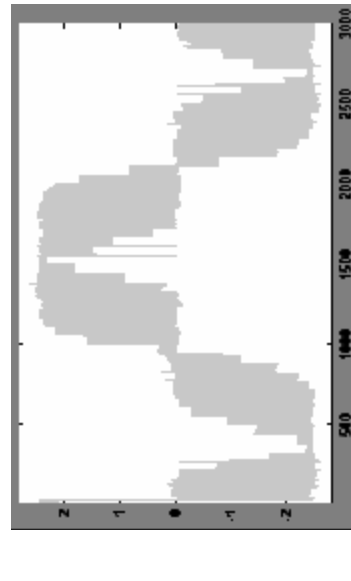


а)

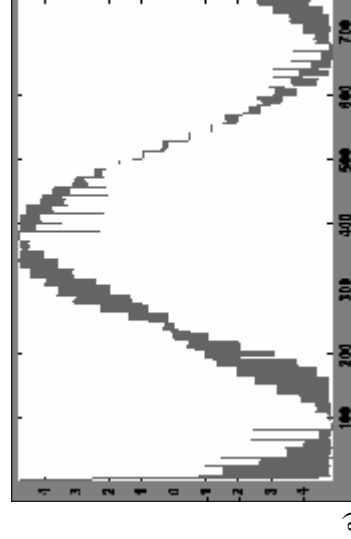


б)

Рисунок 4 – Вихідна напруга перетворювача Mitsubishi F500 частотою 30 Гц (закон регулювання квадратичний) – а), сигнал на першому рівні перетворення, отриманий з використанням вейвлету Добеши (db4) – б), сигнал, отриманий з використанням синтезованого алгоритму в Mathcad – в)



а)



б)

Рисунок 5 – Вихідна напруга перетворювача Mitsubishi S500 частотою 30 Гц (закон регулювання пропорційний) – а), сигнал на першому рівні перетворення, отриманий з використанням вейвлету Хаара – б), сигнал, отриманий з використанням синтезованого алгоритму в Mathcad – в)

Паспортні дані АД наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Паспортні дані АД

Параметр	Значення
----------	----------

**Висновки.** Отримане комплексне рішення задачі, що полягає у можливості формування реальної форми ШІМ напруги перетворювача частоти для задач моделювання частотно-

Номинальна напруга, В	380
Номинальний струм, А	7,5
Номинальна кутова частота, рад/с	150
Активний опір фази статора, Ом	1,35
Активний опір фази ротора, Ом	1,39
Індуктивний опір розсіювання фази статора, Ом	2,13
Індуктивний опір розсіювання фази ротора, Ом	2,3
Індуктивний опір контуру намагнічення, Ом	84,7
Момент інерції, кгм <sup>2</sup>	0,02

регульованих електроприводів з АД.

Реальна форма вихідної напруги перетворювача частоти з ШІМ може бути задана в моделі простим алгебраїчним рівнянням.

Синтезований закон дозволяє відтворити напругу двох-, трьох- та багаторівневих інверторів лише за рахунок зміни коефіцієнтів.

Використання синтезованого закону при моделюванні частотно регульованих електроприводів дозволяє значно прискорити розрахунки моделі.

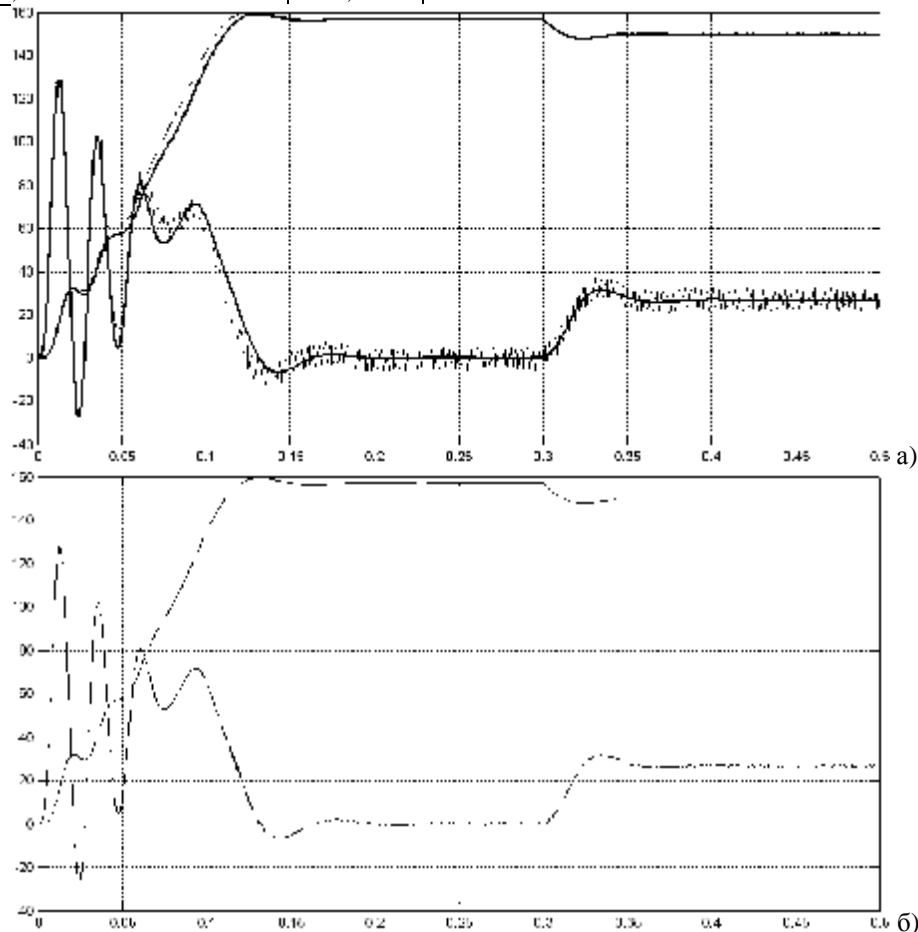


Рисунок 6 – Діаграми моменту і кугової частоти АД при прямому пускові при живленні від ідеального перетворювача і дворівневого –а), багаторівневого – б) інвертора з реальною формою вихідної напруги

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Климов В.П. Источники бесперебойного питания серии ДПК средней мощности // Электрическое питание, 2006. – №2.
2. Климов В., Москалев А. Трёхфазные источники бесперебойного питания: схемотехника и технические характеристики // Электронные компоненты, 2005. – №8.
3. Разработка и производство силовой электроники. Каталог продукции и применений. Корпорация Триол, 2002.

4. Switch Mode Inverter. The Smart AC Power Solution, CE+T, [WWW.CET.BE](http://WWW.CET.BE)

5. Моделювання електромеханічних систем / Чорний О.П., Родькін Д.Й., Луговой А.В. та інш. Підручник для вузів. – Кременчук, 2001. – 374 с.

Стаття надійшла 14.04.2009 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.