

## АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦІЇ ЕФЕКТУ «МЕРТВОГО ЧАСУ» В ТРЬОХРІВНЕВИХ ІНВЕРТОРАХ НАПРУГИ

Осадчук Ю.Г., к.т.н., доцент, Козакевич І.А., аспірант  
Криворізький технічний університет

вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50000, Україна

E-mail: [Igor\\_AEP@mail.ru](mailto:Igor_AEP@mail.ru)

Сінчук І.О., к.т.н., доцент

Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна

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

У статті розглянуто та запропоновано для реалізації підхід наближення до синусоїдальних форм кривих струму та напруги електротехнічних комплексів та систем з контурами імпульсного перетворення напруги живлення асинхронних двигунів. Представлено алгоритм компенсації ефекту “мертвого часу” для тривірневих інверторів.

**Ключові слова:** інвертування, асинхронний двигун, алгоритм.

**Вступ.** Проблема наближення до синусоїдальних форм кривих струму та напруги в електротехнічних комплексах та системах з імпульсними контурами перетворення електричної енергії являє собою багатовекторну задачу, яку потрібно вирішувати в контексті необхідності підвищення якісних показників енергоефективності вищезгаданих систем.

**Актуальність теми досліджень.** Більш ніж 50% споживання електричної енергії, яка виробляється в світі, припадає на електротехнічні комплекси та системи на основі асинхронних двигунів з контурами імпульсного перетворення енергії [1]. Однією з проблем даних систем є необхідність покращення форм кривих струму та напруг як на вході, так і на виході імпульсних перетворювачів [2]. З цією метою в регульованих приводах високої потужності все частіше застосовуються тривірневі інвертори замість двірвневих. При цьому покращення енергетичних показників відбувається не лише за рахунок більшого наближення кривої вихідного струму до синусоїдальної, а й завдяки тому, що використання тривірневого інвертора дозволяє відмовитися від необхідності встановлення різних типів електричних фільтрів [3-6].

**Мета роботи.** Дослідження впливу ефекту «мертвого часу» тривірневого інвертора на форму кривої вихідної напруги та розробка методу його компенсації.

**Матеріал та результати дослідження.** Типовий трифазний двірвневий інвертор містить у собі шість силових ключів, які переключають кожну з фаз між двома напругами: позитивною та негативною ланками постійного струму. Тривірневий інвертор (рис. 1) здатний генерувати фазну напругу, що має три рівні: позитивний «+», негативний «-» та нульовий «0». Оскільки вихідна напруга такого інвертора має більше рівнів, інвертор краще наближає її до синусоїдальної форми. Краща апроксимація синусоїдальної вихідної напруги для однакових частот комутації силових ключів інвертора призводить до зменшення гармонік струму в навантаженні. Якщо інвертор підключений до асинхронного двигуна, то гармоніки струму викликають збільшення втрат у міді та сталі машини, пульсації в електромагнітному моменті та

швидкості. Отже, використання тривірневого інвертора дозволяє знизити втрати в асинхронному двигуні та підвищити енергетичну ефективність всієї системи. Використання тривірневих інверторів має також багато інших переваг, таких, як зниження значення  $du/dt$  при перемиканні силових

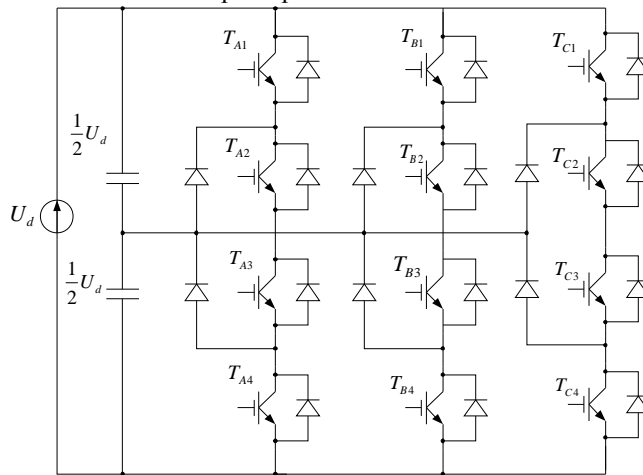


Рисунок 1 – Структура тривірневого інвертора напруги

ключів та ін. Суттєвим недоліком тривірневих інверторів є висока вартість, що викликана складністю їх структури. У порівнянні з двірвневим інвертором тривірневий містить удвічі більше силових ключів, кожен з яких вимагає окремого драйвера та кіл захисту. Система керування також стає більш складною, оскільки необхідно керувати кожним ключем окремо.

Як і у випадку з двірвневим, основним способом керування тривірневим інвертором є просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція, яка передбачає синтез необхідної напруги інвертора переключенням між векторами (рис. 2) для забезпечення рівності середньої напруги за певний цикл комутації заданій напрузі. При миттєвому переключенні силових ключів плеча інвертора від одного стану до іншого можливе виникнення короткого замикання, що пов'язано з кінцевим часом комутації транзисторів. З метою запобігання таких ситуацій між переключенням вводиться «мертвий час», коли усі транзистори одного плеча

вимкнені. При роботі привода в невеликому діапазоні керування наявність

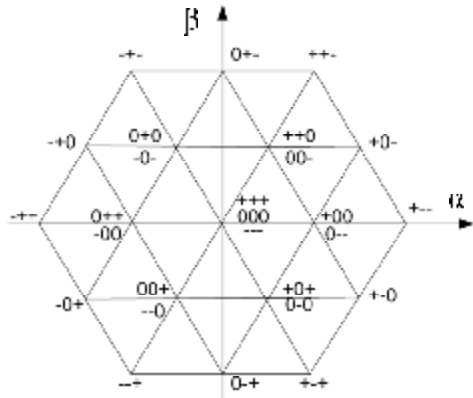
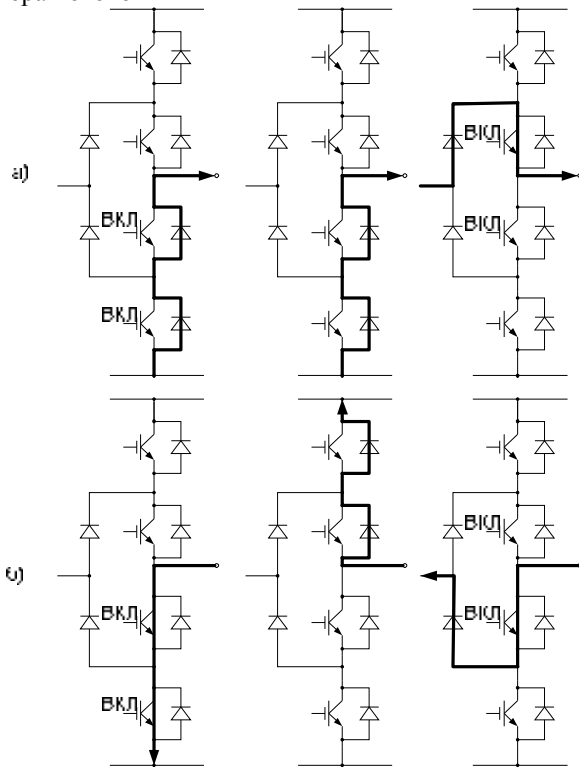


Рисунок 2 – Векторний простір вихідних напруг тривіневого інвертора

«мертвого часу» не викликає помітних ефектів, але при роботі в області низьких швидкостей це створює суттєві проблеми, оскільки при малих напругах час включення активного вектору є сумарним з тривалістю «мертвого часу».

Все більшу популярність у системах керування асинхронними двигунами отримують системи векторного бездатчикового керування. Для функціонування такої системи необхідна інформація про напругу статора для розрахунку складових вектора потокозчеплення та швидкості. При цьому майже не застосовуються датчики фазної напруги, а інформація щодо неї отримується з напруги в ланці постійного струму та поточного стану ключів інвертора. Неврахування ефекту «мертвого часу» призводить до помилки в визначенні складових вектора потоко-



зчеплення та швидкості, що є причиною значного погіршення функціонування системи, втрати нею стабільності.

Розглянемо процеси, що відбуваються в тривіневному інверторі під час «мертвого часу». Протягом цього періоду всі IGBT-транзистори в одному плечі інвертора вимкнені, а струм продовжує протікати через діоди інвертора. На рис. 3 показано перемикання однієї фази зі стану «-» у стан «0» з проміжним періодом «мертвого часу». У випадку а) струм протікає від інвертора до навантаження (додатній напрям), у випадку б) від навантаження до інвертора (від'ємний напрям).

Розглянемо випадок а). У початковому стані включені два нижні транзистори, але струм протікає через зворотні діоди. Під час «мертвого часу» транзистори вимикаються, але струм продовжує протікати через діоди. Після закінчення періоду «мертвого часу» включаються два середні транзистори, і струм протікає через один з них та його зворотній діод. З цього видно, що під час «мертвого часу» при такому напрямі струму до навантаження прикладено від'ємну напругу.

У випадку б) у початковому стані відкриті два нижні транзистори та струм протікає через них. Під час «мертвого часу» усі транзистори вимикаються, а струм продовжує протікати через два верхні діоди. Після закінчення періоду «мертвого часу» включаються два середні транзистори, і струм протікає через один з них та його зворотній діод. З цього видно, що під час «мертвого часу» при такому напрямі струму до навантаження прикладено додатню напругу.

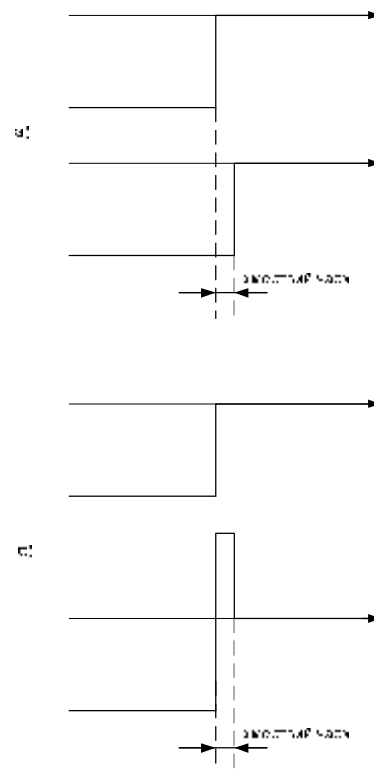


Рисунок 3 – Переключення одного плеча інвертора зі стану «-» у стан «0» з проміжним періодом «мертвого часу»: а) струм іде від інвертора до навантаження ( $i > 0$ );

б) струм іде від навантаження до інвертора ( $i < 0$ )

Отже, при протіканні струму в додатньому напрямі напруга на навантаженні під час періоду «мертвого часу» від'ємна, а при протіканні струму в від'ємному напрямі – додатня.

У випадку дворівневого інвертора напруга на навантаженні під час «мертвого часу» завжди відповідає або напрузі, що передувала цьому періоду, або напрузі, яка буде прикладена по закінченні цього періоду. Тому вплив «мертвого часу» заключається лише в зміні тривалості включення відповідних напруг. На рис. 3, б) бачимо, що при переключенні від негативної напруги до нульової може виникнути й позитивна напруга на період «мертвого часу».

Для дослідження процесів, що відбуваються у трифазному інверторі, була розроблена математична модель системи «перетворювач частоти з тривірневим інвертором – асинхронний двигун». На рис. 4 зображені годографи вектору реальної напруги без компенсації ефекту «мертвого часу».

Як видно, їх форма є значно спотвореною, що свідчить про необхідність застосування спеціального алгоритму для усунення цього явища. Саме тому є доцільною спроба впливати безпосередньо на сигнали завдання вектора напруги, враховуючи ефект «мертвого часу» в якості вектора,

тривалість включення якого буде дорівнювати двом періодам «мертвого часу». Маємо:

$$U'_\infty = U_\infty + \left( \frac{2}{3} \text{sign}(i_a) - \frac{1}{3} \text{sign}(i_b) - \frac{1}{3} \text{sign}(i_c) \right) \times$$

$$\times U_d \frac{t_{dtime}}{T_{PWM}};$$

$$U'_\beta = U_\beta + \frac{\text{sign}(i_b) - \text{sign}(i_c)}{\sqrt{3}} U_d \frac{t_{dtime}}{T_{PWM}},$$

де  $U_\infty$ ,  $U_\beta$  – складові вектора напруги завдання, отримані із системи керування;

$U'_\infty$ ,  $U'_\beta$  – складові вектора напруги завдання, скореговані для компенсації ефекту «мертвого часу»;

$\text{sign}(x)$  – знакова функція;

$U_d$  – напруга в ланці постійного струму;

$t_{dtime}$  – тривалість «мертвого часу»;

$T_{PWM}$  – тривалість періоду широтно-імпульсної модуляції;

$i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  – фазні вихідні струми інвертора.

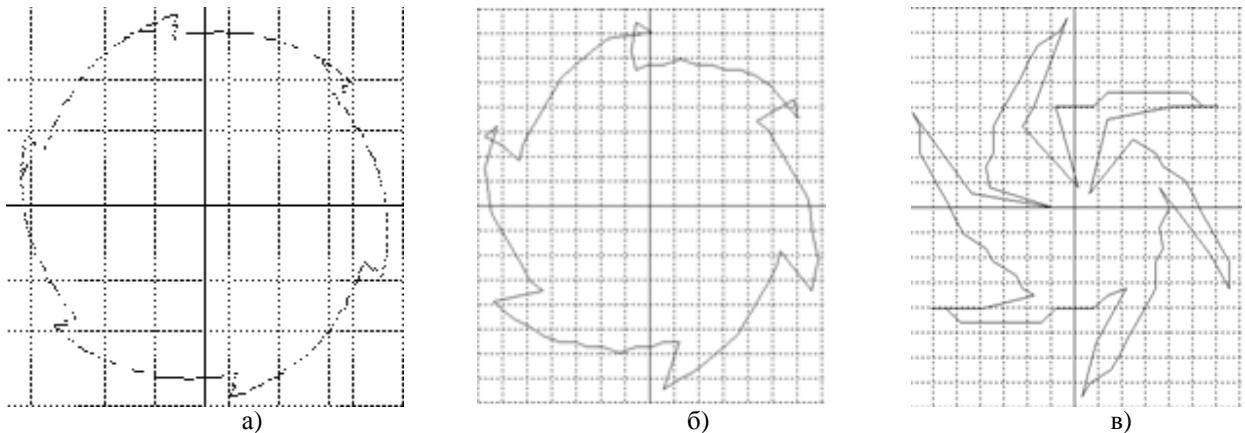


Рисунок 4 – Годограф вектора реальної вихідної напруги тривірневого інвертора при відсутності компенсації «мертвого часу»: а)  $U_{\max}=20$  В (масштаб 2.5 В/діл.); б)  $U_{\max}=10$  В (масштаб 1.25 В/діл.); в)  $U_{\max}=5$  В (масштаб 0.5 В/діл.)

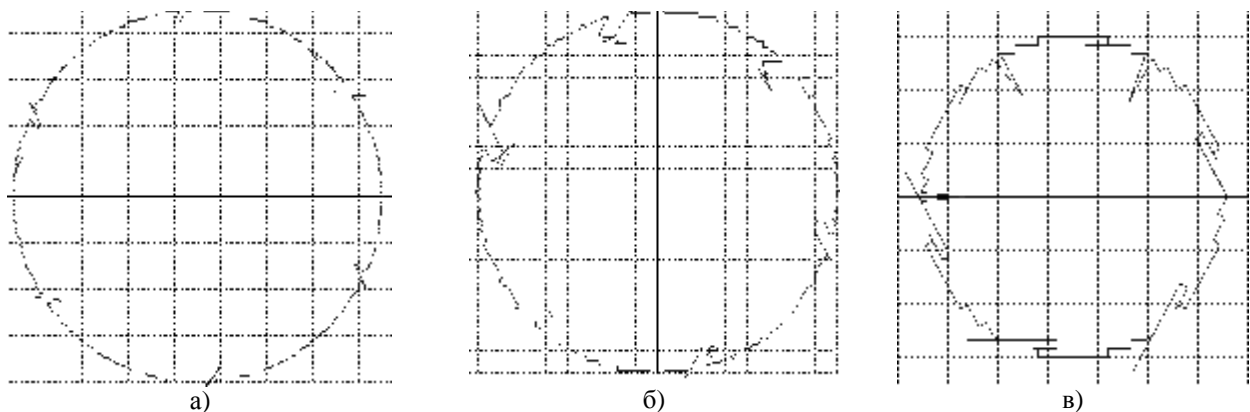


Рисунок 5 – Годограф вектора реальної вихідної напруги тривірневого інвертора при роботі запропонованого алгоритму компенсації «мертвого часу»:

- а)  $U_{\max}=20$  В (масштаб 2.5 В/діл.); б)  $U_{\max}=5$  В (масштаб 0.625 В/діл.);  
в)  $U_{\max}=10$  В (масштаб 1.25 В/діл.)

Результати моделювання цього алгоритму компенсації ефекту «мертвого часу» представлені на рис. 5. Моделювання здійснювалося для тих же умов, що й у попередньому випадку. З порівняння рис. 4, 5 можна зробити висновок, що застосування цього алгоритму значно покращує форму вихідної напруги.

**Висновки.** Розроблений алгоритм компенсації ефекту «мертвого часу» для трирівневих інверторів дозволяє суттєво зменшити спотворення форми напруг і струмів при роботі частотного приводу в зоні низьких частот.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Энергетичні ресурси та потоки / [Шидловський А. К., Віхорев Ю. О., Гінайло В. О. та ін.]; під ред. А. К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2003. – 472 с.
2. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления. Учебное пособие. – Кременчук : Вид. ПП Щербатих О. В., 2008. – 88 с.
3. Trounce J.e., Round S.D. and Duke R.M., Comparison by Simulation of Three-Level Induction Motor Torque Control Schemes for Electric Vehicle Applications, Proc. of International Power Engineering Conference, Singapore, May 2001, vol. 1, pp. 294-299.
4. Trounce J.C., Round S.D. and Duke R.M., Evaluation of direct torque control using space vector modulation for electric vehicle applications, Proc. Of Australasian University Power Engineering Conference, Perth, Australia, Sept. 2001, vol. 1, pp. 292-297.
5. Xiaoming Li, Richard Duke, Simon Round, Development of a three-phase three-level inverter for an electric vehicle, Department of Electrical and Electronic Engineering University of Canterbury, New Zealand, 1999.
6. Pandian G., Rama Reddy S., Srinivasarao K.N. Performance of three level neutral clamped PWM inverter fed induction motor drive, International Journal of Electrical and Power Engineering, 2007, pp. 108 — 113.

## АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ЭФФЕКТА «МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ» В ТРЕХУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ

*Осадчук Ю.Г., к.т.н., доцент, Козакевич И.А., аспирант*

*Криворожский технический университет*

*ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50000, Украина*

*E-mail: [Igor.AEP@mail.ru](mailto:Igor.AEP@mail.ru)*

*Синчук И.О., к.т.н., доцент*

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина*

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

В статье рассмотрен и предложен для реализации подход приближения к синусоидальным формам кривых тока и напряжения электротехнических комплексов и систем с контурами импульсного преобразования напряжения питания асинхронных двигателей. Представлен алгоритм компенсации эффекта “мертвого времени” для трехуровневых инверторов.

**Ключевые слова:** инвертирование, асинхронный двигатель, алгоритм.

## AN ALGORITHM OF INDEMNIFICATION OF EFFECT OF «DEAD TIME» IS IN TREKHUROVNEVYKH INVERTING OF TENSION

*Osadchuk Y.G., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. Kozakevuch I.A., post-grad.*

*Kryvyi Rih Technical University*

*vul. XXII Partzyizdy, 11, Kryvyi Rih, 50000, Ukraine*

*E-mail: [Igor.AEP@mail.ru](mailto:Igor.AEP@mail.ru)*

*Sinchuk I.O., prof. dr. hub. Ing.*

*Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*

*vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine*

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

In the article considered and offered for realization approach of approaching to the sinusoid forms of curves of current and tension of electrical engineerings complexes and systems with the contours of impulsive transformation of tension of feed of asynchronous engines. The algorithm of indemnification of effect of “dead time” is presented for the inverting of three levels.

**Key words:** inverting, asynchronous engine, algorithm.