

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕРТВОГО ЧАСУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Ковбаса С.М., к.т.н., доцент, Кузнецов Г.А., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Однією із основних складових частин сучасних регульованих електроприводів змінного струму є автономні інвертори напруги (АІН), які здійснюють перетворення напруги ланки постійного струму перетворювача частоти у вихідну напругу з регульованою частотою та амплітудою. Керування ключами АІН здійснюється з використанням векторної широтно-імпульсної модуляції (ВШІМ) так, щоб вектор першої гармоніки вихідної напруги інвертора з максимальною точністю відтворював заданий вектор напруги, що формується алгоритмом керування двигуном [1]. На практиці досягти ідентичності заданої і вихідної напруг інвертора неможливо через введення «мертвого» часу (МЧ) при комутації ключів в стійці інвертора для виключення інтервалу часу, протягом якого два ключа знаходяться в стані провідності (коротке замикання в стійці); кінцевого часу включення-виключення ключів; падіння напруги на ключах в режимі провідності; наявності перехідних процесів в імпульсах вихідної напруги в моменти комутації.

В результаті ряду досліджень, наприклад [2], встановлено, що неідеальності інвертора призводять до таких негативних наслідків як: зменшення амплітуди першої гармоніки по відношенню до її заданого значення (через це в частотно-регульованому електроприводі знижується електромагнітний момент, особливо при низьких швидкостях обертання); вихідна напруга і струм статора двигуна містять низькочастотні гармоніки, які призводять до пульсацій моменту, додаткових втрат в електричній машині (ЕМ) і небажаного акустичного шуму; при регулюванні частоти ВШІМ в функції навантаження можливі сплески електромагнітного моменту ЕМ.

Проблемі компенсації мертвого часу в АІН присвячено значну кількість досліджень, однак певного її загально визнаного рішення не знайдено.

Мета роботи. Дослідження впливу мертвого часу на показники якості частотного керування та дослідження стандартного методу його компенсації [3].

Матеріали і результати досліджень. Відомо, що при ВШІМ [1] існує вісім можливих станів інвертора, рис. 1, які включають шість активних та два неактивних стану. Для використання комплексної форми подання вектора напруги $u = u_a + ju_b$ вісь а системи координат (a-b) будемо вважати дійсною віссю комплексної площини. Таким чином, кожному стану інвертора може бути поставлений у відповідність просторовий вектор $u_k, k = 0, 1, \dots, 8$. Просторове положення векторів u_k представлено на рис. 1. Шість активних векторів $u_k, k = 1, 2, \dots, 6$ мають однакову амплітуду і зсунуті один відносно одного на кут

$\pi/3$. Узагальнений вираз для восьми просторових векторів напруги може бути представлений у наступному вигляді:

$$\mathbf{u}_k = \begin{cases} \frac{2}{3} V_d e^{j((k-1)\frac{\pi}{3})}, & k = 1, 2, \dots, 6 \\ 0 & , k = 0, 8 \end{cases} \quad (1)$$

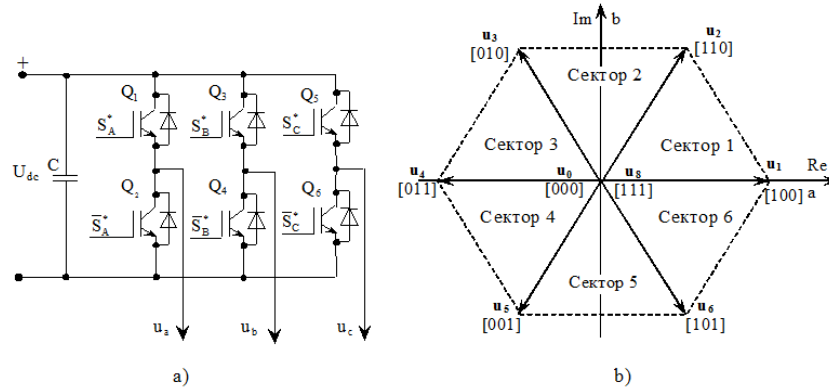


Рисунок 1 – Схема автономного інвертора напруги (а) і реалізовані просторові вектори (б)

Оскільки реальний напівпровідниковий ключ має кінцевий час включення t_{ON} і виключення t_{OFF} , при цьому $t_{OFF} > t_{ON}$, то миттєвий перехід інвертора із одного стану в інший фізично неможливий. При одночасній зміні станів імпульсів керування верхнім і нижнім ключем відбудеться коротке замикання, що призведе до виходу інвертора з ладу. Для запобігання цій ситуації, між вимкненням одного ключа і включенням іншого витримується пауза, яка і називається мертвим часом, t_{DT} . Час паузи показано на рис. 2 штриховкою, а результуючі імпульси керування – суцільною лінією.

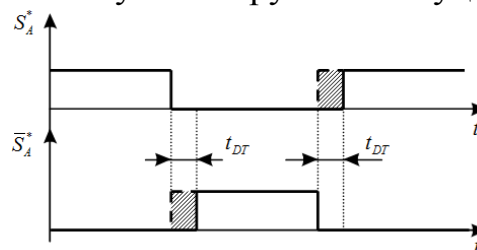


Рисунок 2 – Імпульси керування ключами фази А

При дослідженні впливу мертвого часу на характеристику вхід-вихід перетворювача при різних частотах ШІМ від перетворювача було потрібно відпрацювати напругу заданої амплітуди з частотою основної гармоніки 50 Гц.

На рис. 3 - 4 показані характеристики вхід-вихід при значеннях частоти ШІМ 5, 10 кГц відповідно. Величина мертвого часу інвертора встановлена на рівні 4.2 мкс. З наведених рисунків видно, що при малих завданнях, напруга на виході інвертора відпрацьовується зі значною похибкою, що досягає 15 В. Зі збільшенням амплітуди, ширина імпульсу вихідної напруги стає суттєво більше інтервалу мертвого часу, тому помилка зменшується. З тієї ж причини, ефект мертвого часу має більший вплив при великих частотах ШІМ.

Алгоритм компенсації мертвого часу (АКМЧ) [3], який полягає у збільшенні тривалості включення ключів інвертора в залежності від знаків вихідних фазних струмів, дозволяє суттєво наблизити характеристику інвертора до ідеальної. Помилка відпрацювання заданої напруги зменшується до 3 – 4 В в найгіршому випадку (при $f_{PWM} = 10 \text{ кГц}$).

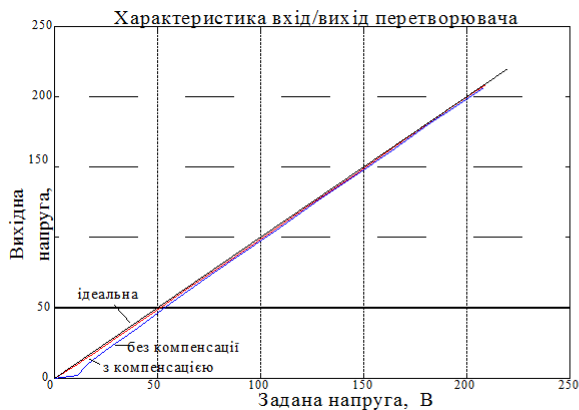


Рисунок 3 – Характеристика вхід/вихід перетворювача при $f_{PWM} = 5 \text{ кГц}$

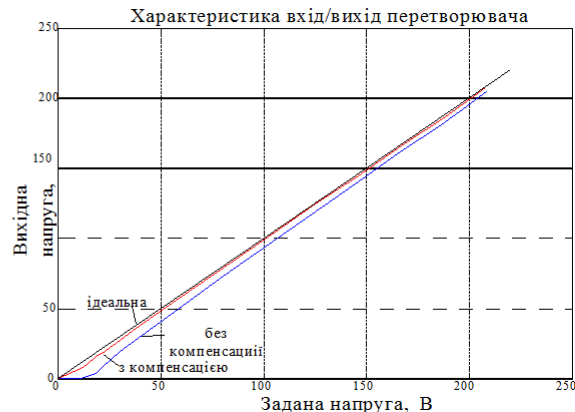


Рисунок 4 – Характеристика вхід/вихід перетворювача при $f_{PWM} = 10 \text{ кГц}$

Дослідження впливу мертвого часу інвертора на процеси частотного керування координатами асинхронного двигуна (АД) виконано з використанням АД, потужністю 5.5 кВт. На рис. 5 показані задані фазні напруги при тестуванні АКМЧ [3]. Послідовність операцій керування наступна: на інтервалі часу (0 ÷ 1) с двигун збуджується за допомогою постійної напруги величиною 9 В, що має забезпечити струм збудження на рівні 7.8 А, після чого розганяється до заданої швидкості, що відповідає вихідній частоті напруги 5 і 10 Гц.

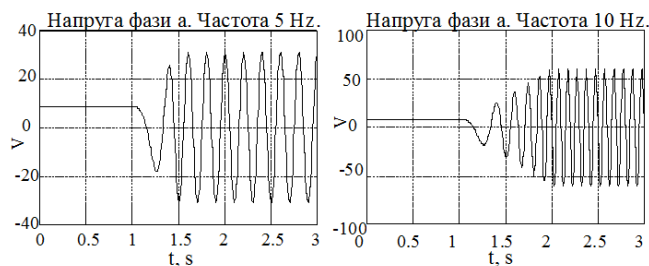


Рисунок 5 – Розрахункові напруги

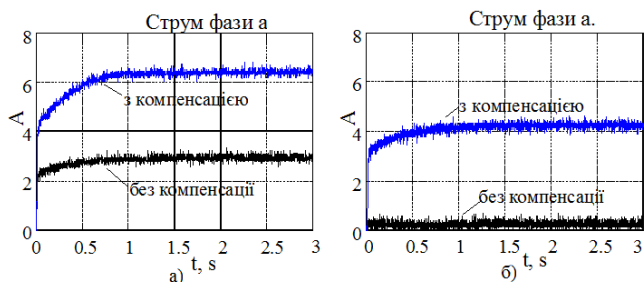


Рисунок 6 – Струми двигуна:
а) $f_{PWM} = 2.5 \text{ кГц}$, б) $f_{PWM} = 5 \text{ кГц}$

На рис. 6 показані передні процеси фазного струму двигуна при його збудженні. При виконанні цього тесту завдання на швидкість не подавалося, тобто до статора прикладається розрахункове постійне значення напруги збудження величиною 9 В на всьому інтервалі тестування. На представлених графіках видно, що наявність мертвого часу призводить до суттєвого зниження струму збудження (до 3 А при $f_{PWM} = 2.5 \text{ кГц}$,

до 0.3 А при $f_{PWM} = 5 \text{ кГц}$), що в свою чергу призводить до деградації показників якості регулювання координат АД при низьких швидкостях. Застосування АКМЧ дозволяє частково усунути зазначені ефекти. Зокрема при $f_{PWM} = 2.5 \text{ кГц}$ використання АКМЧ дозволяє досягти значення струму збудження на рівні 6.5 А, а при $f_{PWM} = 5 \text{ кГц}$ - 4.2 А.

На рис. 7, 8 показані струми двигуна при частоті завдання $f^* = 5 \text{ Гц}$ для випадків $f_{PWM} = 2.5 \text{ кГц}$ і $f_{PWM} = 5 \text{ кГц}$ відповідно.

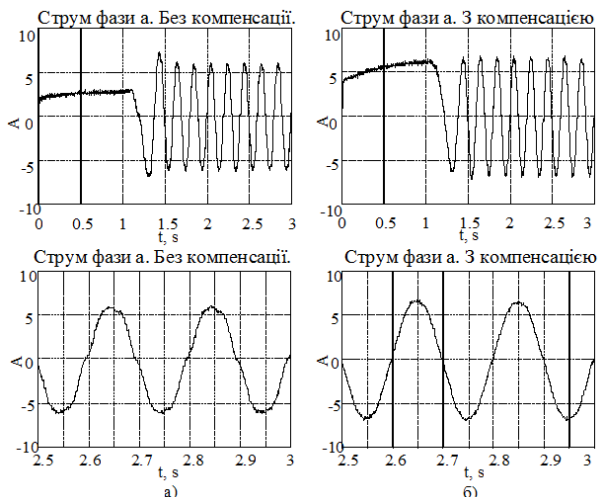


Рисунок 7 – Струми двигуна при частоті вихідної напруги 5 Гц, частота ШІМ 2.5 кГц: а) без компенсації, б) з компенсацією

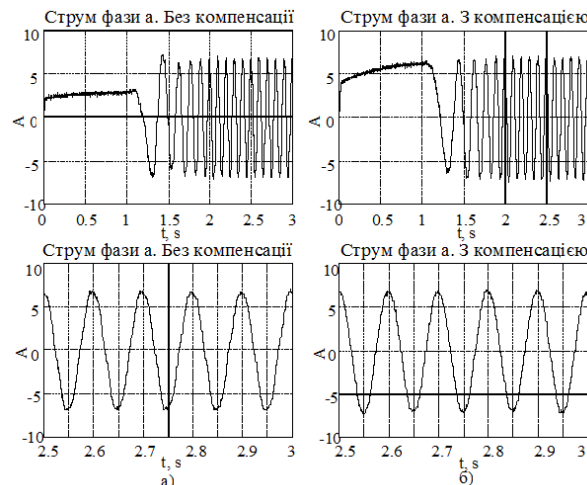


Рисунок 8 – Струми двигуна при частоті вихідної напруги 10 Гц, частота ШІМ 2.5 кГц: а) без компенсації, б) з компенсацією

З порівняння форми струмів на рис. 7а, 8а (без компенсації МЧ) і рис. 7б, 8б (з компенсацією МЧ) видно, що наявність мертвого часу вносить спотворення як в амплітуду, так і в форму вихідного струму інвертора. Застосування АКМЧ [3] дозволяє суттєво покращити гармонійний склад вихідного струму. З аналізу рис. 3, 4 випливає, що зі збільшенням амплітуди заданої напруги вплив МЧ на формування вихідної напруги зменшується.

Висновки. Виконано експериментальне дослідження впливу неідеальностей інвертора на показники якості регулювання координат асинхронного двигуна в системі частотного керування. Експериментально підтверджено, що наявність мертвого часу призводить до зниження напруги та струму статора при роботі на низьких швидкостях, а також спотворень форми вихідного струму. Стандартний метод компенсації мертвого часу забезпечує наближення характеристики вхід-вихід інвертора до ідеальної, але повна компенсація не досягається.

Перелік посилань

1. J.Holtz. Pulse-width modulation – A survey // IEEE Trans on Industrial Electronics. – 1992. – Vol.39. – no 5. – P.410-420
2. Михальский В.М., Полищук С.И., Соболев В.Н., Чехет Э.М., Чопик В.В., Шаповал И.А. Компенсация «мертвого времени» в преобразователях частоты с пространственной векторной модуляцией // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. – Тематичний випуск. – 2008. – Ч.1. – С.12-17.
3. Gabriele R. D. Compensation of voltage source inverter non-linearity by using TMS320F24x DSP [Електронний ресурс] / R. D. Gabriele, R. Petrella, M. Tursini – Режим доступу до ресурсу: <https://www.yumpu.com/en/document/view/16218216/a-dead-time-compensation-circuit-for-voltage-source-inverters>.