

УДК 621.313

АДАПТИВНИЙ СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ ДЛЯ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ НА НИЗЬКИХ ЧАСТОТАХ ОБЕРТІВ**І. А. Козакевич**Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»
вул. XXII партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: aepigor@gmail.com

Надано аналіз основних нелінійних властивостей інвертора напруги, що є основою сучасного низьковольтного частотно-керованого електроприводу. Доведено негативний вплив нелінійностей інвертора на форму його вихідного струму, а також ускладнення роботи системи бездатчикового векторного керування асинхронним двигуном, що призводить до необхідності зменшення діапазону керування частоти обертання. Розглянуто існуючі способи компенсації нелінійних властивостей інвертора, а також запропоновано адаптивний спосіб компенсації, що відрізняється від існуючих відсутністю необхідності в попередньому визначенні параметрів інвертора, а також більшою стійкістю до електромагнітних перешкод у каналах вимірювання вихідних струмів інвертора. Досліджуваний спосіб базується на адаптивному спостереганні струму, який дозволяє зменшити запізнення в роботі системи компенсації, що пов'язане з транспортними запізненнями в каналах виміру струму. Величина вектора напруги, що використовується для компенсації нелінійностей, підлаштовується під час роботи адаптивним алгоритмом. Шляхом математичного моделювання підтверджено переваги запропонованого способу над існуючими.

Ключові слова: інвертор напруги, реактивний струм, нелінійність.**АДАПТИВНИЙ СПОСОБ КОМПЕНСАЦІЇ НЕЛІНІЙНИХ СВОЙСТВ ІНВЕРТОРА НАПРЯЖЕННЯ ДЛЯ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕННЯ НА НИЗЬКИХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕННЯ****І. А. Козакевич**Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»
ул. XXII партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: aepigor@gmail.com

Представлен анализ основных нелинейных свойств инвертора напряжения, являющийся основой современного низковольтного частотно-регулируемого электропривода. Доказано отрицательное влияние нелинейностей инвертора на форму его выходного тока, а также усложнение работы системы бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем, что приводит к необходимости уменьшения диапазона управления частоты вращения. Рассмотрены существующие способы компенсации нелинейных свойств инвертора и предложен адаптивный способ компенсации, который отличается от существующих отсутствием необходимости в предварительном определении параметров инвертора и большей устойчивостью к электромагнитным помехам в каналах измерения выходных токов инвертора. Исследуемый способ основан на адаптивном наблюдателе тока, позволяющим уменьшить запаздывание в работе системы компенсации, что связано с транспортными запаздываниями в каналах измерения тока. Величина вектора напряжения, который используется для компенсации нелинейностей, подстраивается во время работы адаптивным алгоритмом. Путем математического моделирования подтверждены преимущества предложенного способа перед существующими.

Ключевые слова: инвертор напряжения, реактивный ток, нелинейность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. У системах бездатчикового полеорієнтованого керування асинхронним двигуном поточозчеплення оцінюється на основі фазних струмів машини, що вимірюються, та напруг завдання інвертора. При цьому оцінка поточозчеплення базується на інтегруванні електрорушійної сили двигуна. Нелінійні властивості інвертора («мертвий» час, падіння напруги на відкритих ключах схеми та ін.) вносять спотворення в оцінку напруги, що зменшує точність визначення поточозчеплення. Цей вплив стає особливо відчутним при роботі на низьких частотах обертів.

Інша група способів бездатчикового керування ґрунтується на наявних у асинхронної машини анізотропіях, аналізуючи струмовий відгук високочастотного тестового сигналу. У цьому випадку нелінійні властивості інвертора здатні спотворювати високочастотну напругу, що додається до основної, а також викликати додаткові частотні складові у струмовому відгуку.

Існуючі способи компенсації нелінійностей інвертора, що надаються в [1–5], вимагають попереднього визначення параметрів інвертора. Оскільки вони здатні змінюватися під час роботи інвертора (залежно від температурних та інших факторів), то якість такої компенсації не завжди є задовільною, що негативно впливає на показники якості керування приводу. Найбільш вагомою нелінійною властивістю інвертора, яка спотворює його вихідний струм, є наявність «мертвого» часу. Але й інші нелінійні властивості (вплив паразитних ємностей, затримки включення та виключення силових ключів, затримка сигналу у каналах керування ключами, падіння напруги на відкритих ключах) створюють суттєві завади для реалізації якісного керування приводом на низьких частотах обертів.

Отже, для створення систем бездатчикового векторного керування з широким діапазоном зміни частоти обертання необхідно застосовувати точні способи компенсації нелінійностей інвертора.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Бездатчикове векторне керування є досить привабливим для реалізації в системах промислового частотно-керованого електроприводу через відсутність будь-яких датчиків на валу та в середині електричної машини. Але діапазон керування частоти обертання систем бездатчикового векторного керування, що присутні зараз на світовому ринку, суттєво обмежений порівняно із системами датчиковими (1:80 для бездатчикових; 1:1000 і вище – для датчикових).

Схема з некерованим випрямлячем та автономним інвертором напруги (рис. 1) стала своєрідним промисловим стандартом для перетворювачів частоти низької напруги. І таке суттєве скорочення діапазону не в останню чергу пов'язане зі складнощами створення якісної форми вихідного струму при роботі на низькій вихідній частоті, що викликані наявністю нелінійних властивостей інвертора напруги.

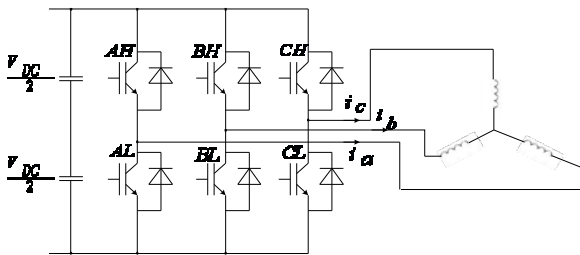


Рисунок 1 – Схема автономного інвертора напруги

Завдяки внутрішнім властивостям силових ключів існує часова затримка між надходженням та самим переключенням. Затримка включення t_{on} – це час між фронтом імпульсу відкриття транзистора, що поступає від керуючого драйвера, до стану остаточного переходу до повної провідності транзистора, нехтуючи наявністю падіння напруги на відкритому ключі. Затримка виключення t_{off} – це час між фронтом імпульсу закривання транзистора, що поступає від керуючого драйвера, до стану остаточного переходу до повної непровідності транзистора, нехтуючи наявністю струмового витоку через закритий транзистор. Як правило, час затримки включення та виключення сягає декілька сотень наносекунд, але при цьому час виключення не є постійною величиною й залежить від паразитних ємностей силового ключа та величини струму двигуна.

Окрім затримки, що викликана безпосередньо переходом транзисторів від одного стану до іншого, існує затримка керуючих ними сигналів, особливо на елементах оптичної розв'язки, що також є складовою загальної затримки комутації ключів. Отже, не існує необхідності окремо розглядати транспортне запізнення в ланцюгах керуючих драйверів, а достатньо розглянути лише сумарну затримку включення та виключення.

Виходячи з наявності затримки комутації транзисторів, а також компліментарної логіки керування

транзисторами одного плеча інвертора, існує необхідність застосування «мертвого» часу для уникнення коротких замикань. Коли відбувається переключення двох силових ключів одного плеча, «мертвий» час необхідно застосовувати для того, щоб ключ, який виключається з роботи, гарантовано набув свого виключеного стану до того моменту, коли почне відкриватися компліментарний ключ. Невиконання цієї вимоги створить умови протікання струму через обидва ключі, що призведе до короткого замикання ланки постійного струму перетворювача. Наявність «мертвого» часу може суттєво змінити тривалість малих імпульсів, що, у свою чергу, змінить величину напруги, яка прикладена до статорної обмотки двигуна. Особливо значного впливу це створює при роботі на низькій частоті, суттєво спотворюючи статорний струм двигуна, оскільки в такому режимі роботи співвідношення між вихідною напругою інвертора та напругою ланки постійного струму є досить малим (рис. 2, 3).

Протягом періоду «мертвого» часу вихідна напруга визначається напрямком вихідного струму інвертора, як зображено на рис. 4, 5. Як видно з рис. 4, при такому напрямі струму протягом «мертвого» часу навантаження через зворотній діод підключено до від'ємної шини ланки постійного струму. Це призводить до зменшення тривалості імпульсу активного включення. При зворотному напрямі струму (рис. 5) наявність «мертвого» часу призводить до збільшення тривалості активного вектора. Отже, похибка за напругою, що вноситься наявністю «мертвого» часу, залежить від напрямку струму відповідного плеча інвертора.

Напівпровідникові ключі не є ідеальними, і у провідному стані на них виникає падіння напруги. При цьому падіння напруги на ключі та його зворотному діоді можна записати як

$$\begin{cases} V_{sw} = V_{sw0} + R_{sw}i_s; \\ V_d = V_{d0} + R_d i_s, \end{cases} \quad (1)$$

де V_{sw0} , V_{d0} – падіння напруги на відкритому ключі та його зворотному діоді; R_{sw} , R_d – еквівалентний активний опір силового ключа та його зворотного діода.

Таким чином, середнє значення падіння напруги на ключах можна записати так:

$$V_{on} = \text{sign}(i_s) \frac{V_{sw0} + V_{d0}}{2} + \frac{R_{sw} + R_d}{2} i_s. \quad (2)$$

З вищенаведеного рівняння можна зробити висновок, що падіння напруги на напівпровідникових ключах складається з двох складових, одна з яких веде себе подібно до впливу «мертвого часу», тобто є постійною за абсолютною величиною та залежить від напрямку вихідного струму інвертора, а друга частина – подібно до активного опору статора машини. При визначенні сумарного статорного опору засобами частотного приводу ця складова сходиться до сумарного значення активного опору.

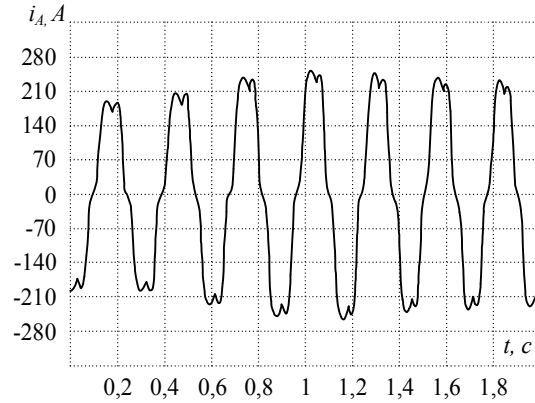


Рисунок 2 – Графік реального струму асинхронного двигуна, що живиться від частотного перетворювача з номінальним струмом 800 А, при роботі на низьких частотах обертів

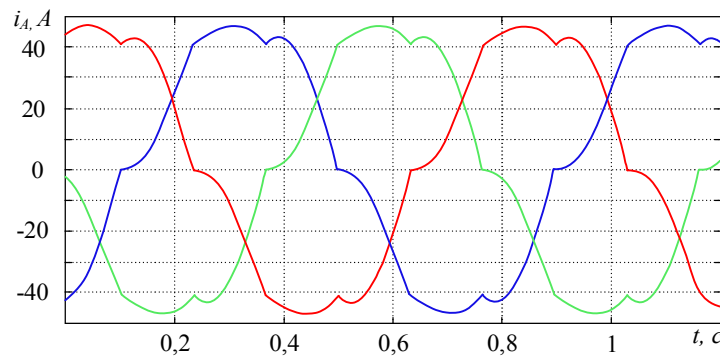


Рисунок 3 – Графік струму, отриманий шляхом математичного моделювання роботи автономного інвертора напруги з урахуванням впливу «мертвого» часу при роботі з коефіцієнтом модуляції 0,067

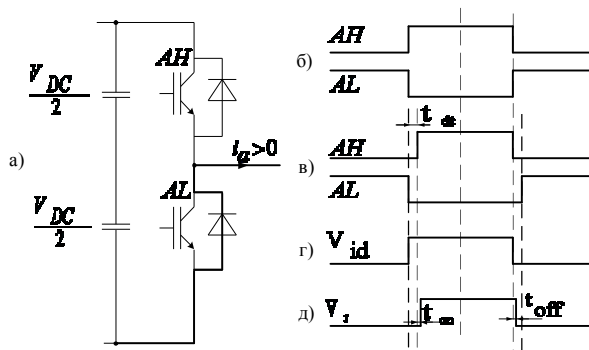


Рисунок 4 – Вплив «мертвого» часу на вихідну напругу інвертора при додатному напрямі струму:
 а) схема протікання струму під час «мертвого» часу;
 б) ідеальна комутація верхнього й нижнього ключів плеча інвертора;
 в) комутація ключів із введенням «мертвого» часу;
 г) вихідна напруга при ідеальній комутації ключів;
 д) вихідна напруги при введенні «мертвого» часу

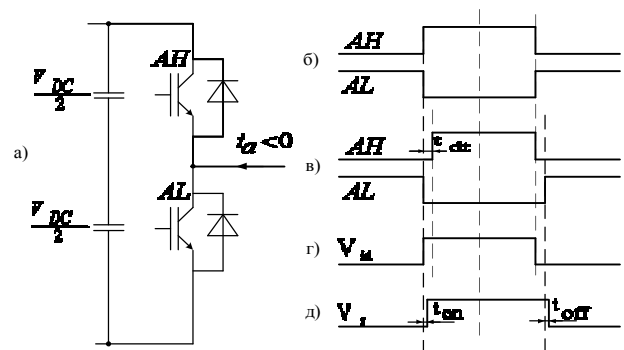


Рисунок 5 – Вплив «мертвого» часу на вихідну напругу інвертора при від'ємному напрямі струму

З урахуванням часу включення та виключення транзисторів, еквівалентний «мертвий» час можна записати у наступному вигляді:

$$t_{err} = \text{sign}(i)(t_{dt} + t_{on} - t_{off} + t_{on1}), \quad (3)$$

де t_{dt} – тривалість «мертвого» часу; t_{on} , t_{off} – час включення та виключення транзистора; t_{on1} – еквівалентний час, що враховує падіння напруги на відкритих ключах схеми.

Як вже було доведено, зміна напруги під впливом нелінійностей інвертора виконується залежно від напрямку вихідного струму інвертора. Отже, зміну напруги (рис. 6) можна записати так:

$$\begin{cases} \Delta V_a = \Delta V \text{sign}(i_a); \\ \Delta V_b = \Delta V \text{sign}(i_b); \\ \Delta V_c = \Delta V \text{sign}(i_c). \end{cases} \quad (4)$$

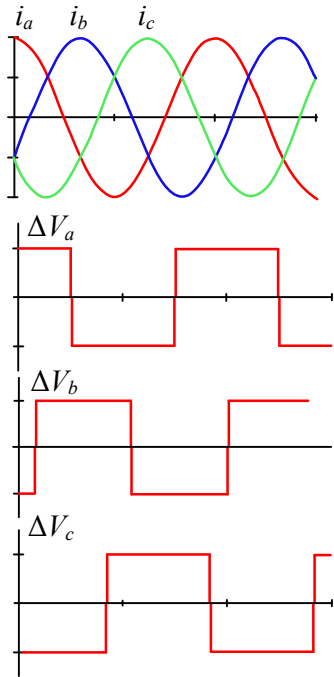


Рисунок 6 – Величина вихідної напруги інвертора, що створюється наявністю його нелінійних властивостей

Зміна напруги нульової точки двигуна буде дорівнювати:

$$\Delta V_n = \frac{1}{3}(\Delta V_a + \Delta V_b + \Delta V_c). \quad (5)$$

Тоді зміна фазних напруг інвертора:

$$\begin{cases} \Delta V_{an} = \Delta V_a - \Delta V_n; \\ \Delta V_{bn} = \Delta V_b - \Delta V_n; \\ \Delta V_{cn} = \Delta V_c - \Delta V_n. \end{cases} \quad (6)$$

Графіки величин зміни фазних напруг під впливом нелінійних властивостей інвертора зображено на рис. 7, а спектр цього сигналу – на рис. 8. Отже, відсутність компенсації призводить до появи у вихідній нарузі вищих гармонійних складових, що викликає спотворення форми струму й є небажаним з точки зору отримання високих показників якості керування на низьких частотах обертів.

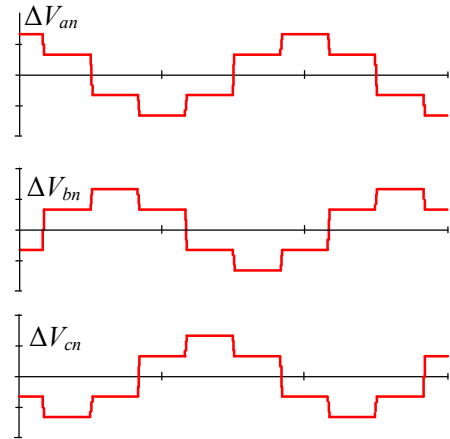


Рисунок 7 – Величина похибки за фазною напругою, що вноситься нелінійностями інвертора

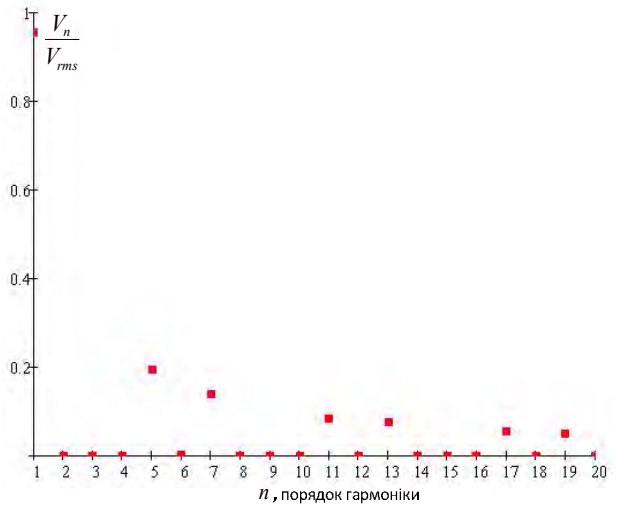


Рисунок 8 – Спектр сигналу похибки за напругою, що вводить наявність нелінійних властивостей інвертора

Існуючі способи компенсації нелінійних властивостей інвертора спрямовано на вимірювання знаку вихідного струму та інжектування коригуючої напруги ΔU у сигнали завдання напруги інвертора:

$$\bar{U}_s = \bar{U}_{s1} + \Delta U \begin{pmatrix} \text{sign}(i_a) + e^{j\frac{-2\pi}{3}} \text{sign}(i_b) + \\ + e^{j\frac{2\pi}{3}} \text{sign}(i_c) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Якість компенсації, яка виконується таким способом, залежить від точності знаходження моменту зміни знаку вихідного струму, що є непростою задачею для реальних систем частотно-керованого електроприводу через наявність дрейфу нулів у каналах вимірювання струму, схильність дії потужних електромагнітних перешкод перетворювача, а також можливість неодноразової зміни знаку струму на одному періоді модуляції. Крім того, суттєвим недоліком існуючих способів є використання постій-

ної величини коригуючого вектора напруги ΔU , величина якого повинна бути відома завчасно. Це ускладнює процедуру налагодження електроприводу, а також призводить до появи неточностей компенсації при зміні параметрів інвертора.

Для усунення існуючих недоліків було розроблено новий спосіб компенсації нелінійних властивостей інвертора (рис. 9), який базується на адаптивному спостерігачі струму статора асинхронного двигуна, що описується наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_s}{dt} = -\frac{R_r L_m^2 + R_s L_r^2}{\sigma L_s L_r^2} \bar{i}_s + \frac{1}{\sigma L_s} \bar{u}_s + \\ + \left(\frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r^2} - j\omega_r \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \right) \bar{\psi}_r; \\ \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} = \frac{R_r}{L_r} (L_m \bar{i}_s - \bar{\psi}_r) + j\omega_r \bar{\psi}_r, \end{cases} \quad (8)$$

де R_s, R_r, L_m, L_s, L_r – активні опори та індуктивності схеми заміщення асинхронного двигуна; \bar{i}_s, \bar{u}_s – вектор струму та напруги статора; $\bar{\psi}_r$ – вектор потокозчеплення ротора; ω_r – частота обертання ротора.

Застосування адаптивного спостерігача струму дозволило надати запропонованому способу більшої стійкості стосовно неточностей у каналі вимірювання струму.

Як відомо, параметри інвертора можуть змінюватися під час його роботи, що може призводити до погіршення якості компенсації. Отже, існує необ-

хідність постійного спостереження за якістю форми вихідного струму інвертора з подальшою зміною величини коригуючого вектора напруги. Застосування інтегральних показників якості не є зручним з позиції обчислювальної складності, а також оновлення значень лише один раз на період.

Автором запропоновано використання величини пульсацій реактивного струму двигуна як показника якості кривої струму. За умови синусоїдальної форми струму й напруги без жодних викривлень реактивний струм двигуна у статичному режимі є постійним за величиною. За появою викривлень форма реактивного струму стає пульсуючою, що дає змогу використовувати розмах пульсацій реактивного струму як неінтегрального показника якості кривої струму. З цією ж метою можливо застосовувати активну складову струму, але з урахуванням того, що в будь-яких режимах роботи асинхронний двигун є споживачем реактивної енергії, знак реактивної складової, на відміну від активної, є незмінним. Для знаходження величини реактивного струму використовується наступне рівняння:

$$I_{react} = -i_{s\alpha} \sin \theta_U + i_{s\beta} \cos \theta_U, \quad (9)$$

де I_{react} – величина реактивного струму двигуна; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – складові вектора струму статора в нерухомій відносно статора двофазній системі відліку; θ_U – кут між вектором напруги статора (або відповідного сигналу завдання) і додатнім напрямком осі α .

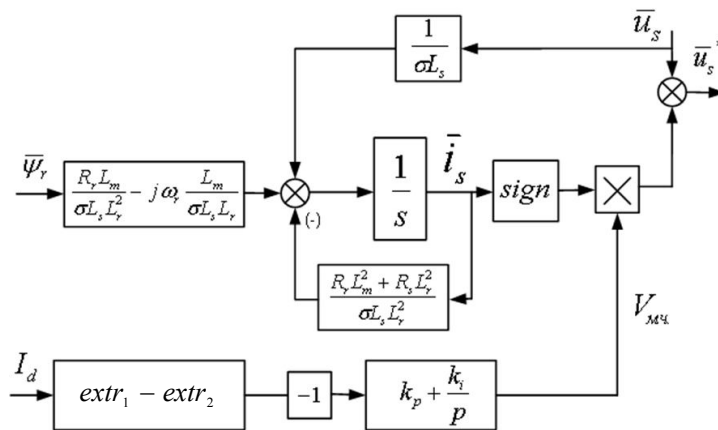


Рисунок 9 – Структура запропонованого способу компенсації нелінійних властивостей інвертора

Як видно з рис. 10, за наявності викривлень форми струму в реактивному струмі двигуна з'являються пульсації з періодом, що є рівним 1/6 періоду основної напруги. Отже, розмах пульсацій використовується в запропонованому способі як показник некомпенсованості нелінійностей інвертора.

Принцип роботи запропонованої системи направлений на пошук значення коригуючого вектора напруги, за яким значення розмаху пульсацій реак-

тивного струму двигуна є мінімальним. Значення реактивного струму отримуються шляхом переходу до системи відліку, що обертається синхронно з вектором напруги живлення двигуна. Результати моделювання запропонованої системи зображено на рис. 11. З нього видно, що застосування такого способу компенсації дозволяє значно покращити форму вихідного струму інвертора при роботі на низьких частотах обертів.

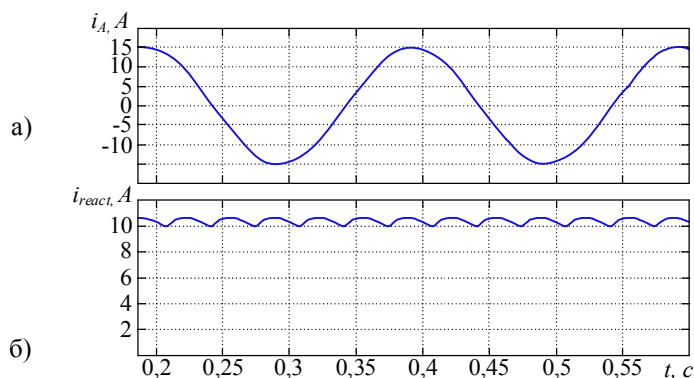


Рисунок 10 – Форма вихідного струму інвертора (а) та реактивного струму АД (б) за відсутності компенсації нелінійних властивостей інвертора

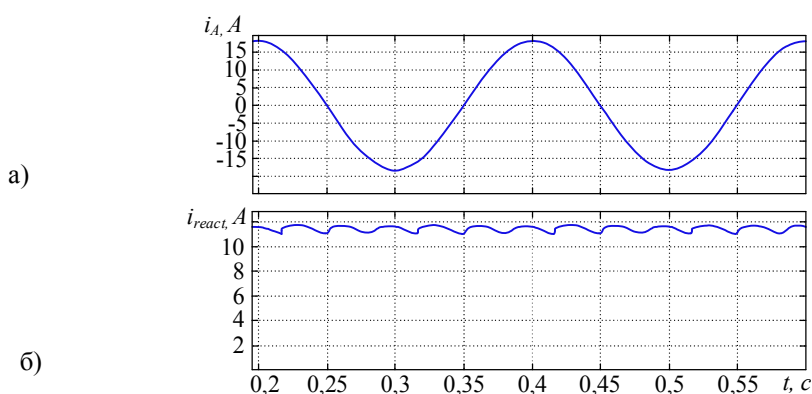


Рисунок 11 – Форма вихідного струму інвертора (а) та реактивного струму АД (б) за наявності компенсації нелінійних властивостей інвертора

ВИСНОВКИ. Автономний інвертор напруги, що має високий рівень розповсюдження в сучасному електроприводі змінного струму, має цілу низку нелінійних властивостей, що суттєво перешкоджають роботі бездатчикових систем керування за рахунок внесення спотворень у вихідний струм двигуна, а також створення похибки між заданою вихідною напругою та її реальним значенням. Доведено: найбільш впливовою нелінійністю перетворювача є наявність «мертвого» часу, що вносить похибку за напругою залежно від знаку вихідного струму. Обґрунтовано причини незадовільної роботи існуючих способів компенсації, які базуються на знаку виміряного струму при роботі у складі реальних електромеханічних систем. Запропонований спосіб компенсації нелінійних властивостей автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією на базі адаптивного спостерігача струму дозволяє уникнути проблем зі знаходженням знаку вихідного струму, а також не вимагає завчасного визначення параметрів перетворювача.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bose B. Power electronics and variable frequency drives // IEEE Press. – New York, 1997. – 640 p.
2. Синчук О.Н. Тяговые статические преобразователи: учебное пособие. Часть 1. Выбор структур

тяговых статических преобразователей. – Харьков: УкрГАЗТ, 2004. – 102 с.

3. Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А., Сінчук І.О. Алгоритм компенсації ефекту «мертвого часу» в трьохфазних інверторах напруги // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 1/2010. – С. 38–42.

4. Zhengyi H., Xuewu J. A new inverter compensation strategy based on adjusting dead-time on-line // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2008. – PP. 768–773.

5. Urasaki N., Senjyu T., Uezato K., Funabashi T. Adaptive dead-time compensation strategy for permanent magnet synchronous motor drive // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Iss. 22. – PP. 271–280.

6. Wang H., Pei X., Chen Y. and oth. An adaptive dead-time compensation method for sinusoidal PWM-controlled voltage source inverter with output LC filter // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APES). – 2011. – PP. 778–785.

7. Пересада С.М., Дымко С.С. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент–ток // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 16–20.

ADAPTIVE COMPENSATION OF VOLTAGE-FED INVERTER NON-LINEARITIES
FOR THE SENSORLESS VECTOR CONTROL AT LOW SPEED

I. Kozakevich

State Institution of Higher Education «Kryvyi Rih National University»

vul. XXII partyzyzdu, 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine. E-mail: aepigor@gmail.com

The analysis of non-linear properties of a voltage-fed inverter, that is the base of the modern low-voltage variable-frequency electric drive, has been introduced. The negative influence of non-linearities of the inverter on the form of its output current as well as the complications of the performance of the sensorless vector control system of an induction motor have been proved, the reasons for decreasing of speed control range are analyzed. Available methods of compensation of the inverter non-linearity have been considered, an adaptive method of compensation that differs from the available methods in that there is no need to pre estimate the inverter parameters and that it has stability towards electromagnetic disturbances in the channels of inverter output currents estimation has been proposed. The investigated method based on adaptive current observer, this allow to reduce delay in the compensation system, due to the transport delay in current measurement channels. The advantages of the proposed method over the available ones have been proved by means of mathematical simulation and experiments.

Key words: voltage-fed inverter, reactive current, non-linearity.

REFERENCES

1. Bose, B. (1997), Power electronics and variable frequency drives, *IEEE Press*, New York, USA.
2. Sinchuk, O.N. (2004), *Tyagovye staticheskie preobrazovateli. Chast 1. Vybory struktury tyagovuh staticheskikh preobrazovateley* [Traction static converters: the manual. Part 1. Choosing the static structures of traction converters], UkrSART, Kharkiv. (in Russian)
3. Osadchuk, Y.G., Kozakevich, I.A. and Sinchuk, I.O. (2010), "The algorithm for compensation of «dead time» effect in the three-level voltage-fed inverters", *Elektromehanichni i energozberigajuchi systemy*, Vol. 1, pp. 38–42. (in Ukrainian)
4. Zhengyi, H. and Xuewu, J. (2008), "A new inverter compensation strategy based on adjusting dead-time on-line", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 768–773.
5. Urasaki, N., Senju, T., Uezato, K. and Funabashi, T. (2007), "Adaptive dead-time compensation strategy for permanent magnet synchronous motor drive", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, pp. 271–280.
6. Wang, H., Pei, X., Chen, Y., Kang, Y. and Yue, X. (2011), "An adaptive dead-time compensation method for sinusoidal PWM-controlled voltage source inverter with output LC filter", *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Washington, pp. 778–785.
7. Peresada, S.M. and Dymko, S.S. (2011), "Direct vector control of torque of induction motors with maximization of relation torque-current", *Elektromehanichni i energozberigajuchi systemy*, Vol. 3, pp. 16–20. (in Russian)

Стаття надійшла 27.02.2014.