

DOI 10.15589/jnn20170114
УДК 621.313.333
К72

DESIGN FEATURES OF THE FREQUENCY CONVERTER FOR THE ELECTRIC PROPULSION MOTOR OF AN UNDERWATER VEHICLE

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ ДЛЯ ГРЕБНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПІДВОДНОГО АПАРАТА

Dmytro V. Kostenko
dmi.kostenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4003-5614

Д. В. Костенко,
канд. техн. наук, доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Special features of the characteristics of the frequency converter for the electric propulsion motor of an underwater vehicle have been described. A typical circuit of such a converter is developed, and the methods for improving its characteristics are substantiated.

Keywords: separator; frequency converter; asynchronous motor; underwater vehicle.

Анотація. Описані особливості характеристик преобразователя частоты для гребного электродвигателя подводного аппарата, разработана типовая схема такого преобразователя, обоснованы способы улучшения ее характеристик.

Ключевые слова: преобразователь частоты; асинхронный двигатель; подводный аппарат

Анотація. Описано особливості характеристик перетворювача частоти для гребного електродвигуна підводного апарату, розроблено типову схему такого перетворювача, обґрунтовані способи поліпшення її характеристик.

Ключові слова: перетворювач частоти; асинхронний двигун; підводний апарат.

REFERENCES

- [1] Toshio Takahashi. Intelligent Power-Management Peripheral for Motor Control. Available at: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275958
- [2] Stanley Huang. Develop a Motor Control Application with Freescale MCUs. Available at: http://cache.freescale.com/files/training/doc/dwf/DWF14_APF_IND_T0459.pdf
- [3] Kononov B. T., Nechaus A. O., Riabukha N. M. *Systema keruvannia chastotno-rehulovanyh elektropyvodom na bazi asynkhrornoho elektrychnoho dvyhuna* [Control system for the variable-frequency electric drive based on the asynchronous electric motor]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl — Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, 2014, no. 3 (40), pp. 136–140.
- [4] Blintsov V. S., Zhuk O. K., Zhuk D. O., Kostenko D. V., Shevchenko V. V. *Mikrokontrolerne keruvannia elektropyvodom. Chastyna 1: Navchalnyi posibnyk* [Microcontrol regulation of the electric drive. Part 1: Study Guide]. Mykolaiv, NUK Publ., 2014. 264 p.

- [5] Wood P., Battello M., Keskar N., Guerra A. AN-1044. Plug N Drive Application Overview Integrated Power Module for Appliance Motor Drive. 2002 International Rectifier rev. 1. Available at: <http://www.infineon.com/dgdl/an-1044.pdf?fileId=5546d462533600a4015355918f950f99>
- [6] Jon Burroughs AN900. Controlling 3-Phase AC Induction Motors Using the PIC18F4431. 2004 Microchip Technology Inc. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn020394.pdf>
- [7] Kostenko D. Phase voltage's forming metod for three-phase inverter. Proceedings of the 5th international conferece UEES'01. Technical University of Szczecin, Poland, 2001, pp. 647–650.
- [8] Kostenko D. V. *Puti umensheniya gabaritov v preobrazovatelyakh chastoty dlya podvodnykh apparatov* [Ways of reduction of dimensions in frequency converters for underwater vehicles] *Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia PTT-2011. Vseukrainska naukovo-tekhnichna koferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu. Materialy konferentsii* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference with International Participation "Underwater engineering and technology 2011"]. Mykolaiv, NUK Publ., 2011, pp. 102–106.
- [9] Kostenko D. V., Volyanskaya Ya. B. *Energoberegayushchee upravlenie asinkhronnym elektroprivodom s ispolzovaniem mikroprotsessornoy tekhniki* [Energy-saving control of the asynchronous electric drive using microprocessor equipment]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*. Mykolaiv, NUK Publ., 2005, no. 3 (402), pp. 101–109.
- [10] Kostenko D. V., Tribulkevich S. L. *Osobennosti tormoznykh rezhimov v elektroprivode s preobrazovatelem chastoty* [Features of brake modes in the electric drive with the frequency converter]. *Problemy avtomatyky ta elektroobladnannia transportnykh zasobiv PAETZ-2011. Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia. Materialy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Problems of automation and electric equipment of transport vehicles 2011"]. Mykolaiv, NUK Publ., 2011, pp. 19–21.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Структура перетворювача частоти для асинхронного двигуна на сьогодні загалом усталилася, про що свідчать численні публікації й аналіз серійних виробів [1–5]. Наукові дослідження йдуть в основному в напрямку оптимізації структури й вдосконалення законів управління. Зусилля з оптимізації структури потрібні, в першу чергу, для тих спеціальних галузей застосування, до яких належать і електродвигуни підводних апаратів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботах [1, 2] показано, що будь-який сучасний перетворювач частоти являє собою трифазний автономний інвертор з колом постійного струму, виконаний на IGBT-транзисторах. Головними елементами такого пристрою є випрямляч, інвертор, асинхронний чи синхронний двигун і програмований мікроконтролер. Крім цього, використовуються індуктивності і ємності для стабілізації напруги виходу випрямляча й зменшення рівня вищих гармонік [3]. У публікаціях [4, 5] наведено приклади реалізації таких перетворювачів.

МЕТОЮ РОБОТИ є уточнення структури перетворювача частоти з урахуванням високих вимог щодо габаритів і високої питомої потужності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Основні вимоги до всього електроустаткування підводного апарата — малі габарити, що пов'язано з необхідністю розміщення обладнання в міцних корпусах, які потребують блоків плавучості для компен-

сації негативної плавучості, що впливає на загальний розмір підводного апарата, його гідродинамічний опір і приєднані маси води. Оскільки в прив'язаних підводних апаратів гідродинамічний опір істотно залежить від гідродинамічного опору кабелю, навіть для малогабаритних підводних апаратів необхідна значна потужність пропульсивної установки, що спричиняє потребу отримання високої питомої потужності. У той же час для гребного електродвигуна не обов'язково висока точність підтримки частоти обертання (навантаження гребного двигуна має вентиляторний характер), а також високий момент на валу за малих частот обертання. Ці особливості дозволяють застосувати перетворювач частоти зі скалярним управлінням.

Загальна структура перетворювача частоти для регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна [3] складається з таких компонентів: силовий випрямляч, фільтр, інвертор, управляючий мікроконтролер, сенсори напруги й струму. Перед перетворювачем частоти й після нього можуть встановлюватися фільтри, що перешкоджають випромінюванню перешкод у мережу й захищають двигун від перенапруг. Силовим елементом перетворювача частоти є інвертор, який має 6 IGBT транзисторів і спеціалізований підсилювач для управління затворами транзисторів — драйвер. У даний час значного поширення набули інтелектуальні силові модулі (IPM) — пристрої, які поєднують в собі силові транзистори, драйвер, певні ланцюги захисту. Хоч інтелектуальний модуль коштує дорожче, ніж дискретні транзистори і драйвер, його використання має ряд переваг:

- апаратно реалізовані функції захисту (зі струму, температури, зниження напруги в ланцюгах живлення, від наскрізних струмів тощо);

- менші габарити;

- готова силова частина схеми з мінімальними паразитними індуктивностями.

Вибір транзисторів зі струму для роботи в перетворювачі частоти — досить нетривіальне завдання, оскільки в транзисторів нормується припустимий постійний струм, а не вихідний струм інвертора. Слід брати до уваги такі фактори:

- у роботі на низьких швидкостях обертання треба враховувати теплову інерційність напівпровідників, тому обчислення варто проводити не для діючого значення струму, а для амплітудного;

- транзистори працюють у режимі з модуляцією, тому необхідно зважати не тільки на статичні, а й на динамічні втрати;

- можливе непередбачуване збільшення струму двигуна, пов'язане з моментом на валу.

Для спрощення вибору модуля в документації вказано діапазон потужностей двигунів і забезпечено значний запас зі струму в транзисторів.

Обираючи управляючий мікроконтролер для перетворювача частоти, в першу чергу, треба враховувати питання електромагнітної сумісності й надійності. З точки зору електромагнітної сумісності перетворювач частоти має силовий блок, який є джерелом сильних індуктивних перешкод; аналоговий вимірювальний блок, що є реципієнтом перешкод; цифровий управляючий блок, який може як генерувати, так і сприймати перешкоди. Багато питань електромагнітної сумісності може бути розв'язано конструктивно й схемотехнічно, але й сам мікроконтролер повинен бути стійкий до перешкод. У цьому аспекті інтерес являють собою мікроконтролери фірми Microchip Technology, які мають високий опір до електромагнітних перешкод, можливість до розширеного температурного діапазону. Щорічно видається так званий reliability report — документ, який вміщує результати випробувань інтенсивності відмов компонентів у складних умовах.

Microchip Technology випускає чотири сімейства 8-розрядних мікроконтролерів, 16-розрядні сигнальні контролери, 32-розрядні контролери. Для завдань простого скалярного управління оптимальним вибором є мікроконтролери серії PIC18Fxx31, наприклад PIC18F2431, який спеціально призначений для управління електродвигунами, крім традиційних, для розширеного сімейства Microchip; має апаратний 6-канальний 3-фазний модулятор з блоком апаратного захисту, швидкий 10-бітний АЦП, інтерфейс енкадера. Висока надійність в умовах електромагнітних перешкод забезпечена не тільки особливостями напівпровідникової технології, але й додатковими апаратними блоками:

- сторожовий таймер, який перезапускає мікроконтролер у разі збою програми;

- монітор збоїв генератора, що автоматично перемикається на резервний RC генератор за умови збою основного;

- помножувач частоти з ФАПЧ (фазова автопідстроювання частоти).

Помножувач частоти з ФАПЧ — додатковий апаратний блок, який встановлений між тактовим генератором і рештою частини мікроконтролера, містить генератор, керований напругою, фазовий детектор, дільник частоти. Особливість роботи ФАПЧ у тому, що вихідний сигнал плавно підлаштовується під частоту й фазу вхідного. Якщо вхідний сигнал матиме поодинокі пропущені або зайві імпульси, то вихідний сигнал залишатиметься періодичним з незмінною формою.

Під час розробки схеми використано рекомендації щодо застосування AN-900 [6]. Схема електрична принципова показана на рис 1. Пристрій підключається до двох джерел живлення постійного струму, силового 300 В і стабілізованого 15 В для кіл управління.

Розглянемо призначення елементів:

DA5 — інтелектуальний силовий модуль, основний елемент силової схеми; DD1 — мікроконтролер, який реалізує закони управління й захисту;

R1, R2, R6, R7, R8, C6, C7, C8 — додаткові фільтри на аналогових входах мікроконтролера;

R9, C3 — фільтр живлення аналогових модулів мікроконтролера;

VD1, VD2 — світлодіоди індикації режимів «робота» і «аварія»;

DA1 — стабілізатор 5 В для живлення мікроконтролера;

DA2 — компаратор, що гарантує відсічення зі струму;

DA3 — компаратор, що забезпечує апаратний захист від перенапруг;

DA4 — підсилювач струму;

DA5 — підсилювач напруги;

DA6 — драйвер послідовного інтерфейсу CAN;

C23 ... C28 — бустрепні конденсатори.

Температурний захист інтелектуального модуля створюється внутрішніми терморезистором і компаратором. Для вибору порогу спрацьовування слід встановити резистор R17 між виводом модуля й загальним проводом. У технічній документації рекомендовано величину цього резистора 6,8 кОм, що відповідає порогу спрацьовування близько 100 градусів. Сигнал з цього резистора подається на аналоговий вхід мікроконтролера, де може додатково відстежуватися температура модуля. Виводи емітерів катодної групи транзисторів не під'єднано до мінусової шини модуля, а виведено назовні, що дає можливість встановити між емітерами й мінусом джерела живлення

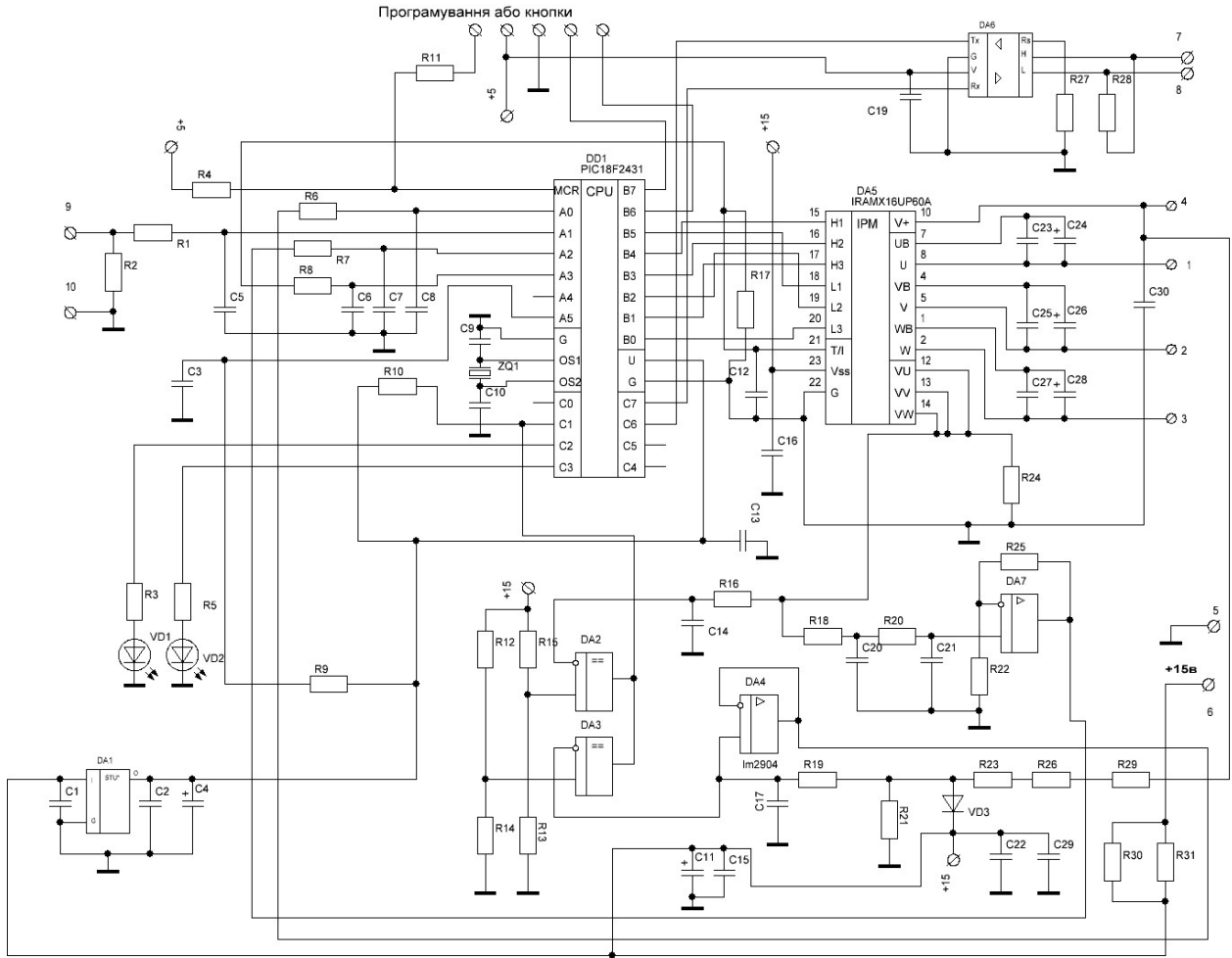


Рис. 1. Перетворювач частоти. Схема електрична принципова

шунт R24, оцінювати режим роботи перетворювача з падіння напруги на ньому.

Напруга з шунта R24 підключається до компаратора DA2, з виходу якого сигнал подається на вхід апаратного захисту мікроконтролера. У разі спрацювання компаратора всі транзистори модуля будуть переведені в неактивний стан. Транзистори модуля витримують металеве коротке замикання за напруги 300 В протягом 10 мкс, зазначене коло повинне забезпечити спрацювання відсічення за менший час. Крім того, сигнал з шунта передається в підсилювач DA7, з виходу якого посилена напруга подається на аналоговий вхід мікроконтролера. Підсилювач поєднує в собі функції фільтра, що створює придушення пульсацій на частоті несучої. Аналогічно організовано захист з напруги. Сигнал з високовольтного дільника підключається до підсилювача й компаратора. Вихід компаратора об'єднаний з виходом токового компаратора за принципом «монтажне I», а вихід підсилювача подається на один з аналогових входів мікроконтролера.

Мікроконтролер DD1 програмно реалізує основні функції управління силовою частиною перетворювача

частоти: формування за допомогою ШІМ трифазного вихідного напруги, розгін-гальмування двигуна, інформаційний обмін з дистанційним постом управління, контроль параметрів силового модуля, обслуговування аварійних ситуацій [6].

Використовуючи описаний підхід, отримуємо найменші можливі на сьогодні габарити активних компонентів перетворювача частоти: малогабаритний мікроконтролер, інтегральний силовий модуль, дві восьмививідні мікросхеми з компараторами й операційними підсилювачами. Значні габарити матимуть конденсатор силового випрямляча й тепловідвід силового модуля. Подальша мінімізація габаритів можлива за умови зменшення тепловиділення й необхідної ємності конденсатора.

Для зниження тепловиділення можна застосувати метод формування фазних напруг, описаний у літературі [7] (див. рис. 2), який зумовлює на 33% динамічні витрати. Формування вихідних напруг інвертора будемо виконувати методом прямого цифрового синтезу. Розділимо весь діапазон фазного кута на кінцеву кількість секторів, що має бути кратною 3, обирає-

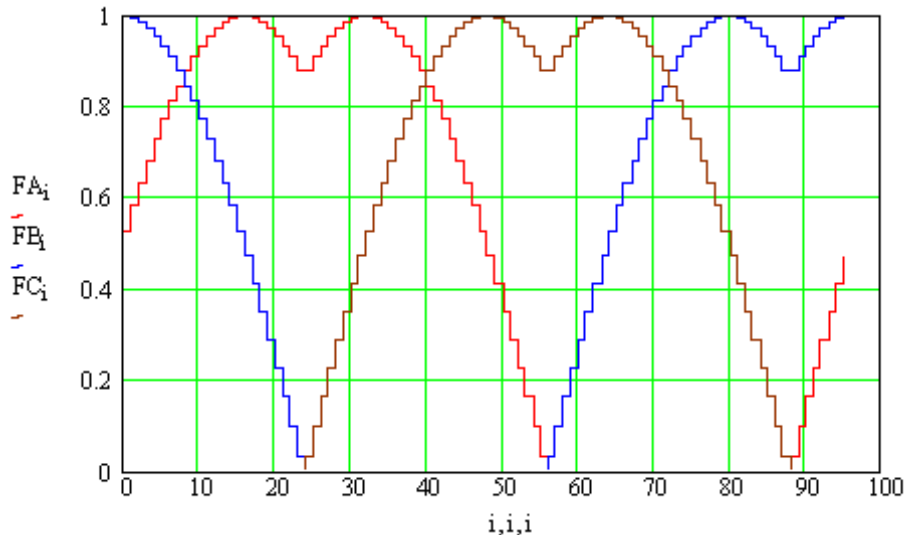


Рис. 2. Розрахунок фазних напруг

мо 96. Складемо вираз для трьох синусоїд, зміщених на 120 град. з областю визначення 0, 1:

$$A(\alpha) = \frac{\sin \alpha + 1}{2}; \quad B(\alpha) = \frac{\sin(\alpha + 2\frac{\pi}{3}) + 1}{2};$$

$$C(\alpha) = \frac{1 + (\sin(\alpha - 2\frac{\pi}{3}))}{2}.$$

Запишемо вираз для коригуючої функції:

$$D(\alpha) = \text{if}[(B(\alpha) < A(\alpha)) \cdot (B(\alpha) < C(\alpha)), B(\alpha), \text{if}[A(\alpha) < B(\alpha) \cdot (A(\alpha) < C(\alpha)), A(\alpha), C(\alpha)]];$$

задамо дискретний час:

$$i = 0..95; \quad x_i = \frac{\pi}{96} + \frac{\pi}{48} \cdot i;$$

сформуємо скориговані вихідні сигнали з урахуванням поправочного коефіцієнта 0,866:

$$FA_i = \frac{A(x_i) - D(x_i)}{0.866}, \quad FB_i = \frac{B(x_i) - D(x_i)}{0.866},$$

$$FC_i = \frac{C(x_i) - D(x_i)}{0.866}.$$

Для зменшення необхідної ємності конденсатора розглянемо функції, які виконує ємнісний фільтр у перетворювачі частоти [8].

1. Згладжування пульсацій випрямленої напруги. Під час використання випрямляча за схемою Ларіонова пульсації невеликі й несуттєво впливають на роботу перетворювача, тому за трифазного живлення функцію згладжування пульсацій можна не враховувати.

2. Джерело реактивної потужності. За умови роботи перетворювача частоти на активноіндуктивне навантаження конденсатор фільтра є джерелом реактивної потужності. Відсутність конденсатора може викликати аварійні перенапруги в колі постійного струму.

3. Обмеження комутаційних викидів. Ця функція важлива для безаварійної роботи перетворювача, але ємність, необхідна для обмеження викидів, незначна й несуттєво впливає на габарити загалом.

4. Прийом енергії за частотного гальмування. Функції 1 і 3 не потребують значної ємності конденсатора фільтра, вимоги до ємності функцій 2 і 4 можуть бути знижені вибором режиму роботи двигуна. Як відомо, коефіцієнт потужності асинхронного двигуна залежить від навантаження, який в номінальному режимі максимальний, на холостому ходу характер навантаження прямує до чисто індуктивного. Для зменшення необхідної ємності конденсатора силового фільтра слід знижувати напругу на виході перетворювача частоти за мінімізацією навантаження. Енергоєфективне управління асинхронним двигуном за таких умов навантаження докладно описано в літературі, наприклад [9]. За частотного гальмування уникнути дозаряду конденсатора можна в разі використання комбінованого гальмування [10]. З точки зору мінімізації ємності конденсатора фільтра треба знати амплітуду, величину пульсацій і напрямок струму в колі постійного струму. Розглянемо результати моделювання залежності форми струму від коефіцієнта потужності. Прийнято припущення — форма струму синусоїдальна, форма напруги прямокутна. Нижче подано графіки струму в мінусовій шині кола постійного струму перетворювача за активного, активноіндуктивного, індуктивного навантаження і в генераторному режимі (див. рис. 3). Як видно з графіків, під час зменшення коефіцієнта потужності навантаження збільшується змінна складова струму, при переході навантаження в генераторний режим змінюється середнє значення.

Роботу перетворювача з вираженим активноіндуктивним навантаженням можна виключити зниженням напруги на двигуні, генераторний режим — переходом у режим комбінованого гальмування. У та-

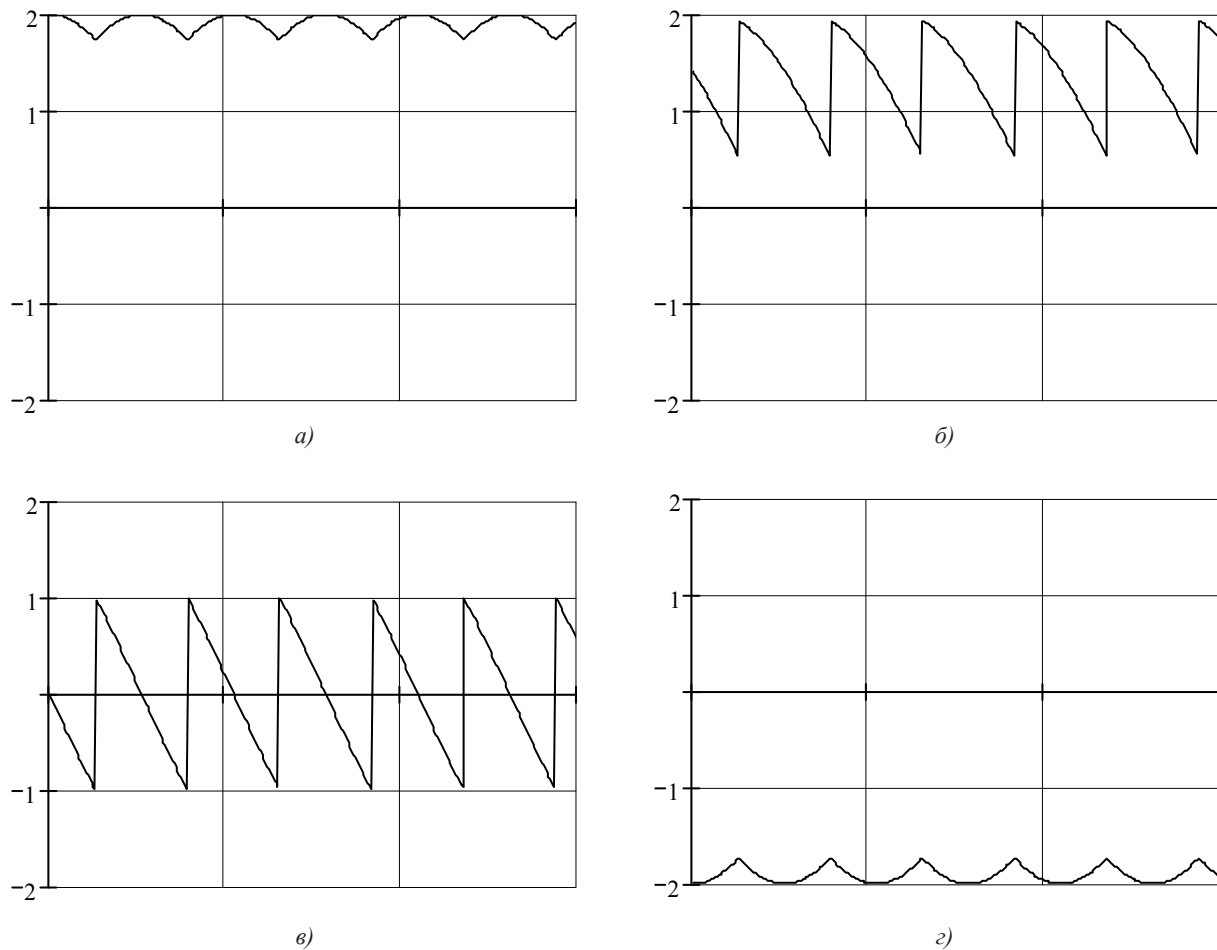


Рис. 3. Графіки струму в мінусовій шині кола постійного струму: *a* — активне навантаження, *б* — активноїндуктивне навантаження, *в* — індуктивне навантаження, *з* — генераторний режим

кому випадку послаблюються вимоги до конденсатора фільтра силового випрямляча, зменшення змінної складової струму допускає зниження необхідної ємності й реактивної потужності.

ВИСНОВКИ. Перетворювач частоти для гребного двигуна підводного апарата повинен мати малі габарити й високу питому потужність. Такі властивості

досягаються застосуванням інтелектуального силового модуля з управляючим мікроконтролером, який реалізує скалярне управління. Габарити пристрою також можна знизити завдяки вибору оригінального методу формування фазних напруг, використанню комбінованого гальмування, контролю над напругою двигуна з урахуванням коефіцієнта потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Toshio Takahashi.** Intelligent Power-Management Peripheral for Motor Control [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275958
- [2] **Stanley Huang.** Develop a Motor Control Application with Freescale MCUs [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://cache.freescale.com/files/training/doc/dwf/DWF14_APF_IND_T0459.pdf
- [3] **Кононов Б. Т.** Система керування частотно-регульованим електроприводом на базі асинхронного електричного двигуна [Текст] / Б. Т. Кононов, А. О. Нечаус, Н. М. Рябуха. // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. — 2014. — № 3 (40). — С. 136–140.
- [4] Мікроконтролерне керування електроприводом. Частина 1: Навчальний посібник [Текст] / В. С. Блінцов, О. К. Жук, Д. О. Жук, Д. В. Костенко, В. В. Шевченко. — Миколаїв : НУК, 2014. — 264 с.
- [5] AN-1044. Plug N Drive Application Overview Integrated Power Module for Appliance Motor Drive [Текст] / P. Wood, M. Battello, N. Keskar, A. Guerra. — 2002 International Rectifier rev. 1. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.infineon.com/dgdl/an1044.pdf?fileId=5546d462533600a4015355918f950f99>

- [6] **Jon Burroughs** AN900. Controlling 3-Phase AC Induction Motors Using the PIC18F4431. 2004 Microchip Technology Inc. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn020394.pdf>
- [7] **Kostenko D.** Phase voltage's forming metod for three-phase inverter [Текст] / D. Kostenko. // Proceedings of the 5th international conferece UEES'01. — Szczecin : Technical University of Szczecin, Poland, 2001. — Pp. 647–650.
- [8] **Костенко Д. В.** Пути уменьшения габаритов в преобразователях частоты для подводных аппаратов [Текст] / Д. В. Костенко. // Підводна техніка і технологія ПТТ-2011. Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. Матеріали конференції. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 102–106.
- [9] **Костенко Д. В.** Энергосберегающее управление асинхронным электроприводом с использованием микропроцессорной техники [Текст] / Д. В. Костенко, Я. Б. Волянская. // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2005. — № 3 (402). — С. 101–109.
- [10] **Костенко Д. В.** Особенности тормозных режимов в электроприводе с преобразователем частоты [Текст] / Д. В. Костенко, С. Л. Трибулькевич. // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів ПАЕТЗ-2011. Міжнародна науково-технічна конференція. Матеріали конференції. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 19–21.

© Д. В. Костенко

Надійшла до редколегії 02.02.2017
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. С. Бліщов*