УДК 621.436:621.31:656 **DOI 10.20535/1813-5420.1.2024.297576**

І.З. Маслов[1], канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1759-6077
Д.О. Кулагін[2], д-р техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-3610-4250
[1]Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»
[2]Національний університет «Запорізька політехніка»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ В СУДНОВІЙ АВТОНОМНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

В статті показано процес побудови моделі функціонування системи керування перетворювачем частоти для суднової автономної електроенергетичної системи. Дана задача вирішувалась для спрощення математичного описання вказаного перетворювача частоти для суднової автономної електроенергетичної системи. В результаті отримано математичну множину ймовірних комбінацій робочих станів силових ключів і відповідні значення узагальнених векторів напруги автономного інвертора при використанні широтно – імпульсної модуляції. Проведене на основі цього моделювання підтвердило відповідність отриманих значень фазної напруги автономного інвертора реальним енергетичним процесам. Показано, що важливим є подальше дослідження технічних та методичних факторів підвищення енергетичної ефективності та точності математичного опису реальних ланок енергетичних систем, що забезпечить процес більш якісного дослідження енергетичних процесів в них.

Ключові слова: *математичне описання, ефективність, режими роботи перетворювача частоти, перетворювач частоти, автономний інвертор напруги.*

Вступ. Режим роботи транспортного перетворювача частоти визначає ступінь використання потужності та всієї сили тяги, надійність і економічність його в конкретних умовах експлуатації судна, що є актуальною задачею. Намагання поліпшення використання тягової потужності й сили тяги супроводжується вдосконалюванням режимів керування енергетичною установкою, раціональним використанням паливно-енергетичних ресурсів на рух судна та забезпечення власних потреб.

Дослідженню питання раціонального керування перетворювачами частоти, використанню енергетичних ресурсів присвячено багато робіт [1-7], що пояснюється важливістю даної прикладної задачі та актуалізує важливість даного питання. Проте з розвитком сучасних засобів побудови перетворювачів частоти, розвитком наукової бази створення систем керування енергетичним установками засобів транспорту дана задача постійно отримує більш нові та сучасні рішення.

Мета та завдання. Метою даної статті є побудова моделі функціонування системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі.

Завданням статті є розвиток інженерно-технічних підходів, що сприятимуть скороченню та спрощенню опису системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі.

Матеріал і результати досліджень.

Для дизель – генераторного перетворювача частоти використовуються в якості напівкерованих силових ключів транзистори різних типів, приклади їх використання наведено на рис. 1 [1-4].

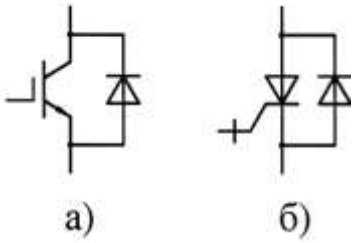

Рисунок 1 - *Використання різних типів транзисторних ключів для автономного інвертора напруги на основі: а) IGBT; б) GTO (або IGCT).*

На рис. 2 зображена схема перетворювача частоти, яка розповсюджена у застосуванні в судновій дизель-генераторній енергетичній системі змінного струму [5,6], яка виконана на IGBT силових ключах.

Автономний інвертор напруги під'єднаний до шини постійного струму, яка шунтована конденсаторним фільтром С. Він, використовується для компенсації реактивної потужності навантаження, його застосування є характерною особливістю цієї схеми.

При побудові схеми автономного інвертора напруги на основі IGBT, використовуючи досвід застосування цих перетворювачів частоти [1-6], стає зрозуміло, що це дає ряд переваг в порівнянні з іншими видами схем для суднових систем:

– легкість керування з невеликим власним використанням потужності;

– можливість до керованого запирання;

– висока робоча частота.

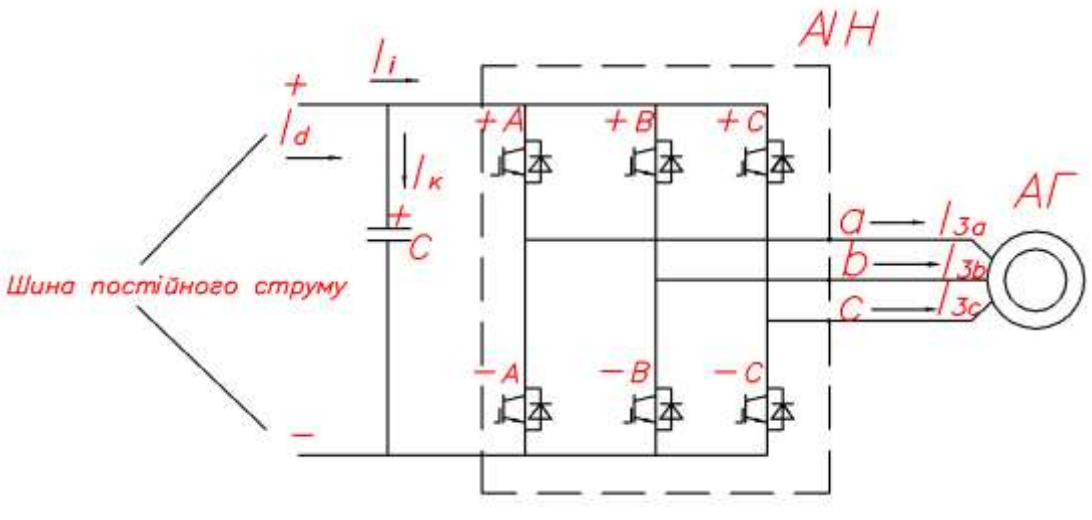

Рисунок 2 - *Функціональна схема перетворювача частоти суднової дизель-генераторної енергетичної системи на основі автономного інвертора напруги*

З рис. 2 бачимо, що до схеми автономного інвертора напруги входять шість транзисторів, які шунтовані діодами, це необхідно для отримання провідності струму активно – індуктивного навантаження, яким є асинхронний генератор. Для того, щоб перетворити постійну напругу в змінну трифазну, необхідно зробити перемикання транзисторів, перемикання яких повинно проходити у певній послідовності. Водночас, три транзистори повинні бути відкриті у кожен момент часу в кожній з фаз автономного інвертора напруги по черзі, а інші закриті.

Коли від системи керованих інверторів приходить керуючий імпульс на базу транзистора, в схемі відбувається ввімкнення транзисторів. Від заданих параметрів транзисторів залежить, яку змінну напругу та якої форми можливо отримати, в ідеальному випадку – синусоїдальна форма змінної напруги на виході, а якщо збільшувати чи зменшувати частоту подачі імпульсів на ключі перетворювача, можливо регулювати її частоту, це і є основна відмінність від тиристорного інвертора, в якому вихідна напруга не має можливості регулювання її частоти.

В таблиці 1 наведемо конкретні значення статорних напруг Usa, Usb, Usc, а також значення вектору статорної напруги асинхронного генератора у показниковій формі, в залежності від постійної напруги на вході інвертору Ud, для комбінацій робочих силових ключів трифазного автономного інвертора напруги, які можуть мати як відкритий, так і закритий стан:

$$\bar{U}_{s(l)} = U_{s(l)} e^{j\Theta_{s(l)}} , \qquad (1)$$

Логічно, що якщо живити розглянутий вище трифазний автономний інвертор напруги від асинхронного генератора, сума всіх можливих комбінації спрацювання силових ключів, положення яких відрізняються, та показників фазних статорних напруг, дорівнює семи.

Натуральне число l = 1, 2,…, 7 визначає собою умовне позначення номера варіанту комбінацій значень фазних статорних напруг асинхронного генератора Usa, Usb, Usc і відповідних створюваних узагальнених векторів статорної напруги (1) асинхронного генератора. У таблиці 1 позначкою "плюс" позначені відкриті положення станів силових ключів, а позначкою "мінус" – закриті стани силових ключів в автономному інверторі напруги, згідно з їх зображенням на рис. 2.4.

Загалом значення векторів статорної напруги асинхронного генератора можливо знайти з виразу [1]:

$$\bar{U}_{s(l)} = \frac{2}{3}\left\{1 - \left[\frac{l}{7}\right]\right\} U_d e^{j(l-1)\frac{\pi}{3}} , \qquad (2)$$

Таблиця 1 - Можливі комбінації станів силових ключів і відповідні значення узагальнених векторів вихідної напруги трифазного автономного інвертора напруги при широтно – імпульсної модуляції

№	Значення фазних статорних напруг			$\bar{U}_{s(l)}$	Комбінація силових ключів					
	Usa	Usb	Usc		-A1	+A2	-B1	+B2	-C1	+C2
1	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d$	+	-	-	+	-	+
2	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\pi/3}$	+	-	+	-	-	+
3	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j2\pi/3}$	-	+	+	-	-	+
4	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j\pi}$	-	+	+	-	+	-
5	$-\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j4\pi/3}$	-	+	-	+	+	-
6	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{2}{3}U_d e^{j5\pi/3}$	+	-	-	+	+	-
7	0	0	0	0	+ -	- +	+ -	- +	+ -	- +

Під час синтезу математичної моделі суднової дизель-генераторної енергетичної системи силові ключі перетворювача частоти вважаємо ідеальними, тобто вони не мають власного опору у відкритому стані та значення їхнього опору прямує до нескінченності в закритому стані, та час їх перемикання – миттєвий.

Якщо розглянути станом на сьогоднішній день швидкодіючі силові ключі на основі IGBT, GTO (IGCT), то можливо зробити висновок, що вони застосовуються для створення статичних перетворювачів частоти, а їх характеристики лише в частині, яка наведена нижче, наближені до параметрів ідеальних ключів:

– відносно невеликі величини часу зрізу (затримки, фронту) їх переключення, якщо порівнювати з фактичними часовими довжинами провідного і непровідного станів зазначених ключів, при широтно – імпульсній модуляції;

– щодо невеликих значень струмів, які просочуються через зачинені ключі, якщо порівнювати їх зі значенням струму при відкритому (робочому) положенні.

Використовуючи закон керування ключами силового перетворювача, визначаємо вхідні та вихідні параметри перетворення електричної енергії, а саме, якість вихідної напруги автономного інвертора напруги суднової дизель-генераторної енергетичної системи. При цьому необхідно врахувати, що вирішальне значення має послідовність поводження в цілому автономного інвертора напруги, як ланки замкнутої системи автоматичного керування, а не лише фактор якісного гармонійного складу сформованої вихідної напруги для живлення асинхронного генератора, та фактор забезпечення високого ККД.

В результаті моделювання перетворювача частоти з початковими даними, показаними в [7], зібраного за розробленою моделлю, встановлено фазну напруга автономного інвертора напруги, показану на рис. 3, що повністю відповідає реальним енергетичним процесам [7].

Висновки

Було проведено побудову моделі функціонування системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі задля скорочення та спрощення опису системи перетворювача частоти в судновій автономній електроенергетичній системі. В результаті отримано математичне рівняння щодо визначення можливих комбінацій станів силових ключів і відповідні значення узагальнених векторів вихідної напруги трифазного автономного інвертора напруги при широтно – імпульсної модуляції. Проведене моделювання підтвердило адекватність отриманих значень фазної напруги автономного інвертора напруги, реальним енергетичним процесам.

Важливим є подальше дослідження технічних та методичних факторів підвищення енергетичної ефективності та точності математичного опису реальних ланок енергетичних систем, що забезпечить процес більш якісного дослідження енергетичних процесів в них.

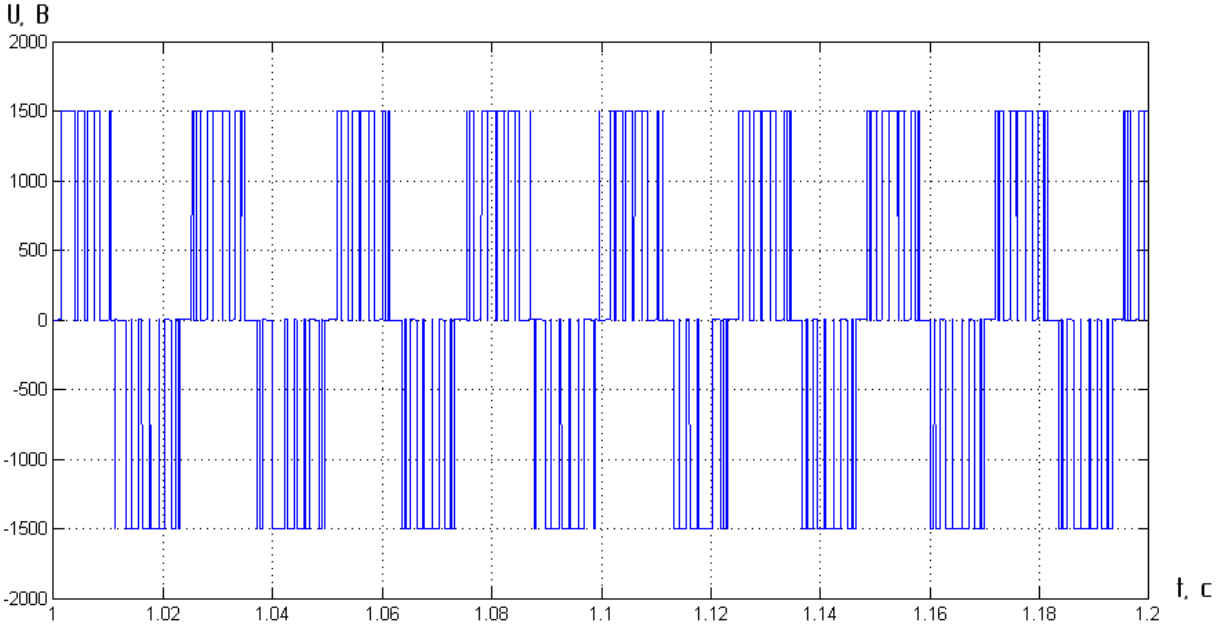

Рисунок 3 - *Фазна напруга автономного інвертора напруги*

Список використаної літератури

1. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Пивняк Г. Г., Волков А. В. – Днепропетровск, 2006. – 421 С.

2. Hierholzer M. Laska. 3rd generation of 1200 V IGBT modules / Hierholzer M. Laska, Th. Loddenkotter M. Munzer, M. Pfirsch F. Schaffer, C. Schmidt Th. // Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. – 1999. – Vol. 3. – P. 1787–1792.

3. James P. Forsyth. Accelerated testing of IGBT power modules to determine time to failure / James P. Forsyth // Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference. – 2010. – P. 1–4.

4. Khanna V. Power IGBT Modules / Khanna V. // Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT Theory and Design. – 2005. – P. 465–498.

5. Komatsu K. Yatsu. New IGBT modules for advanced neutral-point-clamped 3-level power converters / Komatsu K. Yatsu, M. Miyashita, S. Okita, S. Nakazawa, H. Igarashi, S. Takahashi, Y. Okuma, Y. Seki, Y. Fujihira // Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International. – 2010. – Vol. 1. – P. 523–527.

6. Kusko A. Control Means for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives / A. Kusko, D. Galler. // IEEE Trans. on Industry Applications. – 1983. – Vol. 19. – № 4. – P. 561–570.

7. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими енергетичних установоками моторвагонних поїздів : монографія. Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. 154 с.

I. Maslov[1], Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1759-6077
D. Kulagin[2], Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-3610-4250
[1]**Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy"**
[2]**National University "Zaporizhzhya Polytechnic"**

MATHEMATICAL MODEL OF THE FREQUENCY CONVERTER SYSTEM OPERATION IN A SHIP'S AUTONOMOUS POWER SYSTEM

The article shows the process of building a model of the frequency converter control system for a ship's autonomous power system. This task was solved to simplify the mathematical description of the frequency converter for the ship's autonomous power system. As a result, a mathematical set of probable combinations of operating states of power switches and the corresponding values of generalised voltage vectors of the autonomous inverter using pulse width modulation were obtained. The modelling carried out on the basis of this data confirmed

the correspondence of the obtained values of the phase voltage of the autonomous inverter to real energy processes. It is shown that it is important to further study the technical and methodological factors of increasing energy efficiency and the accuracy of the mathematical description of real links of power systems, which will ensure the process of a more qualitative study of energy processes in them.

Key words: *mathematical description, efficiency, operating modes of a frequency converter, frequency converter, autonomous voltage inverter.*

References

1. Modern frequency-controlled asynchronous electric drives with pulse width modulation / Pivnyak G. G., Volkov A. V. - Dnipro, 2006. - 421 p.

2. Hierholzer M. Laska. 3rd generation of 1200 V IGBT modules / Hierholzer M. Laska, Th. Loddenkotter M. Munzer, M. Pfirsch F. Schaffer, C. Schmidt Th. // Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. - 1999. - Vol. 3. - P. 1787-1792.

3. James P. Forsyth. Accelerated testing of IGBT power modules to determine time to failure / James P. Forsyth // Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference. - 2010. - P. 1-4.

4. Khanna V. Power IGBT Modules / Khanna V. // Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT Theory and Design. - 2005. - P. 465-498.

5. Komatsu K. Yatsu. New IGBT modules for advanced neutral-point-clamped 3-level power converters / Komatsu K. Yatsu, M. Miyashita, S. Okita, S. Nakazawa, H. Igarashi, S. Takahashi, Y. Okuma, Y. Seki, Y. Fujihira // Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International. - 2010. - Vol. 1. - P. 523-527.

6. Kusko A. Control Means for Minimisation of Losses in AC and DC Motor Drives / A. Kusko, D. Galler // IEEE Trans. on Industry Applications. - 1983. - Vol. 19. - No. 4. - P. 561-570.

7. Kulagin D. O. Design of control systems for traction power plants of motor-car trains : monograph. Berdiansk: FP-P Tkachuk O. V., 2014. 154 c.

Надійшла: 02.12.2023
Received: 02.12.2023