АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 004.032.26:629.7.058.6 (045)
DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/02

Гобатюк Т.П.
Національний авіаційний університет

НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМ ТРИФАЗНИМ ІНВЕРТОРОМ

За останні роки тенденція розвитку і вдосконалення електронних пристроїв із високою потужністю і частотою, а також передача високовольтного постійного струму посідають провідне місце у розвитку авіаційної енергетичної системи. Новий авіаційний інвертор із високим коефіцієнтом потужності та його цифрове забезпечення є наразі однією із пріоритетних напрямів дослідження. Одним із таких напрямів є вибір параметрів ПІД-регулятора. Це завдання є складним процесом, а конструкція інвертора виключає можливість здійснення функції самообертання в онлайн-режимі параметрів ПІД-регулятора.

У цій роботі розглянуто нейромережеве керування авіаційним трифазним інвертором, оскільки нині використання підходів на основі штучних нейронних мереж стрімко зростає у сфері силової електроніки і приводів. Окрім того, аналізується принцип ШІМ-випрямлення джерела напруги на основі традиційного SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) та покращується алгоритм керування інвертором задля ефективного зменшення вмісту гармонік і забезпечення високого коефіцієнту потужності. До того ж алгоритм керування і схема перевіряються експериментально із використанням інструментів MATLAB / Simulink. Задля вимірювання коефіцієнту потужності інвертора нами використано лабораторний модуль системи для дослідження електричних параметрів літака і відповідного аналізу даних. Цей інвертор має такі параметри ПІД-регулятора, які можуть здійснювати функцію самоповороту в онлайн-режимі.

Результати експерименту свідчать про те, що трифазний ШІМ-випрямляч на основі керування нейронною мережею може зменшити гармонічні спотворення, а коефіцієнт потужності досягає максимальних показників. Ці результати допоможуть у подальшому проєктуванні авіаційного трифазного інвертора з високим коефіцієнтом потужності. Водночас, якщо порівняти звичайне ПІД-керування з удосконаленою нейронною мережею, керування нейронною мережею здійснюється в режимі онлайн-налаштування параметрів ПІД, зменшуючи пропорційний, інтегральний і диференційний час коригування параметрів, що також покращує ефективність проєктування пристрою.

Ключові слова: *нейромережеве керування, трифазний інвертор, моделювання, коефіцієнт потужності, ПІД-регулятор.*

Постановка проблеми.

Недостатній коефіцієнт потужності випрямленої напруги, гармонічне забруднення електроенергії створюють підґрунтя для дослідження нового типу інвертора і стратегії керування ним. Досліджується трифазне джерело напруги з ШІМ-випрямлячем, яке має стабільну вихідну напругу та одиниці коефіцієнта потужності. Методи керування постійним струмом мають переваги швидкого динамічного реагування. У трифазному джерелі напруги ШІМ-випрямляча сучасні методи керування переважно містять одноцикловий контроль [1], ШІМ-регулювання струму із фіксованою частотою перемикання [2], прогнозований струм керування [3-4], пряму потужність, метод контролю [5] тощо. Порівняно із традиційною синусоїдою модуляції (SPWM) трифазне джерело напруги випрямляча із векторним керуванням ШІМ (SVPWM) не тільки використовує напругу постійного струму і швидкі динамічні характеристики, але і схильне до легкої цифровізації, тому цей тип випрямляча глибоко вивчається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останні дослідження показують, що інкрементний ПІД-регулятор має простий і легкий для здійснення алгоритм, але керування параметрами налаштування ПІД-регулятора у режимі онлайн має певні труднощі. Отже, новий нейромережевий

ПІД-регулятор, який поєднує нейронну мережу і ПІД-контроль, можна одержати завдяки онлайн ПІД-налаштуванню параметрів контролера через Інтернет-навчання і таким чином досягти хорошого контрольного ефекту. У дослідженні [5], де розглядалося пряме керування потужністю [6] випрямляча на основі контролю SVPWM, перевірено доцільність та ефективність схеми керування. Інкрементний алгоритм ПІД вивчено також у роботі [7], де результати моделювання показали, що цей контролер має високу точність керування порівняно із традиційним ПІД-регулятором, тоді як нейронна схема ПІД-контролера мережі за допомогою DSP вже була реалізована і досягла хороших результатів [9].

Постановка завдання.

Принципова схема трифазного випрямляча джерела напруги на основі керування SVPWM показана на рис. 1. Він працює за допомогою теорії опорних кадрів, яка передає трифазну статичну систему координат у двофазну обертову систему координат. Тоді за допомогою алгоритму керування космічним вектором можна генерувати шість ШІМ-сигналів керування, що дозволяє досягти точного керування вимикачем. Отже, випрямляч отримує потрібну постійну напругу. Двоконтурна система керування системою керування містить одну зовнішню петлю напруги і два внутрішніх контури струму. Шлейф напруги переважно використовується для керування вихідною напругою постійного струму трифазного реле-VSR. Основною функцією контуру струму є регулювання струму.

Випрямляч, заснований на традиційному алгоритмі керування SVPWM та використовує ПІД-регулювання, простий і легкий у роботі, але параметри керування ПІД-регулятором не здатні здійснювати функцію самообертання у режимі онлайн та отримати задовільні результати, тому він потребує доопрацювання і покращення.

Виклад основного матеріалу.

Традиційний ПІД-регулятор відноситься до реалізації виходу цифрового контролера для керування поступовим $\Delta u(k)$. Коли виконавчим установам потрібен поступовий контроль, ми маємо використовувати інкрементний ПІД-контроль. Відповідно до посилань на ПІД-регулювання ми знаємо, що формула ПІД -регулятора виглядає так:

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D \left[e(k-1) - e(k-2) \right],$$

де, K_p, K_I, K_D – пропорційний коефіцієнт, інтегральний коефіцієнт і диференціальний коефіцієнт відповідно; $e(j)$ – значення вхідного відхилення j-ї вибірки; $u(k-1)$ – це вихід $(k-1)$-ї вибірки. Інкрементальний алгоритм ПІД-регулювання відповідно виглядає так:

$$\Delta u(k) = K_p \left[e(k) - e(k-1) \right] + K_I e(k) + K_D \left[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \right]$$

У традиційному поступовому ПІД-регуляторі K_p, K_I, K_D – три параметри, які важко регулювати. Це, у свою чергу, збільшує складність проєктування системи. Однак нейрони мають характеристики самонавчання, адаптаційної здатності і простоти обчислення, тому вдосконалений алгоритм інкрементного ПІД-контролю нейронної мережі може здійснюватися налаштуванням параметрів у режимі онлайн, що може ефективно вирішити проблему на відміну від традиційного налаштування параметрів ПІД-регулятора.

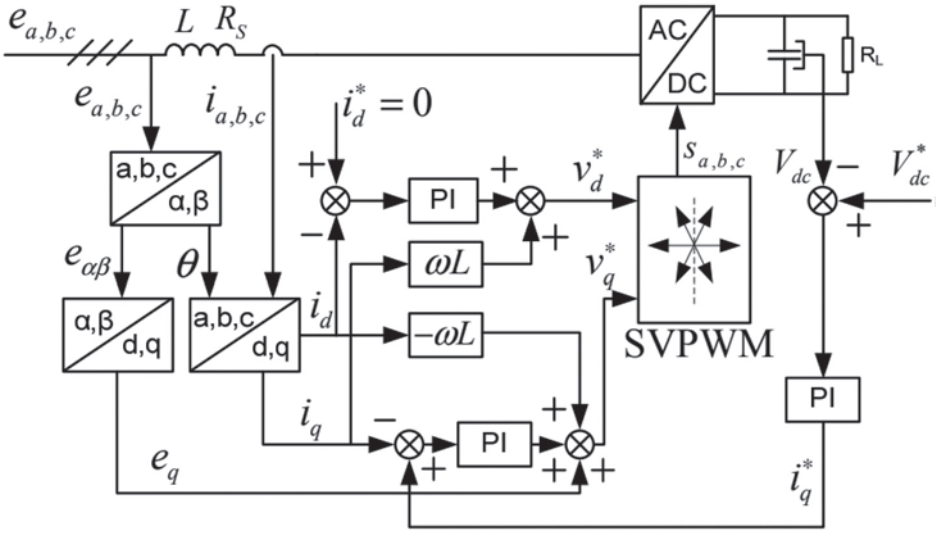

Рис. 1. Принципова схема трифазного реле-VSR

Вхід нейронів можна визначити так:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) - e(k-1) + \Delta e(k) \\ x_2(k) = e(k) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases}$$

Відповідна функція з одним виходом:

$$u(k) = u(k-1) + \omega_1 x_1(k) + \omega_2 x_2(k) + \omega_3 x_3(k),$$

де ω_1, ω_2, ω_3 - вагові коефіцієнти, що відповідають $x_i(k)$ (i = 1, 2,3). Наведені вище три параметри із використанням контрольованих правил навчання та алгоритму навчання визначаються так:

$$\begin{cases} \omega_1(k) = \omega_1(k-1) + \eta_p e(k-1) u(k-1) x_1(k-1) \\ \omega_2(k) = \omega_2(k-1) + \eta_I e(k-1) u(k-1) x_2(k-1) \\ \omega_3(k) = \omega_3(k-1) + \eta_D e(k-1) u(k-1) x_3(k-1) \end{cases}$$

де η_p, η_I, η_D використовують три види швидкості навчання. Отже, інкрементний ПІД-контроль нейронної мережі може досить просто реалізуватися налаштуванням параметрів вагових коефіцієнтів. Тоді ми зможемо зменшити труднощі вибору пропорційного, інтегрального і диференціального коефіцієнтів та покращити ефективність системи проєктування загалом.

Розглянемо будову принципової схеми трифазного ШІМ-випрямляча джерела напруги на основі ПІД-регулювання нейронної мережі (рис. 2). Інвертором управляють переважно за допомогою шести вмикачів та вимикачів. За умов традиційного керування SVPWM вимикач живлення верхнього моста VSR має перемикатися 6 разів за один період перемикання, що призводить до більших втрат під час перемикання. Задля зменшення частоти перемикання і втрат перемикача у цій роботі використано п'ять елементів керування SVPWM [8]. Тому під час перемикання вимикач живлення верхнього мосту VSR слід перемикати лише 4 рази. Гармоніка переважно є цілим числом, кратним частоті перемикання через симетрію форми хвилі функції перемикання. В інверторі керування SVPWM використовується двоконтурна структура керування. Зовнішня петля напруги переважно використовується для керування вихідною напругою трифазного випрямляча. Внутрішній контур струму використовується для керування струмом відповідно до інструкції струму ПІД-регулятора зовнішньої петлі.

Схема керування представлена на рис. 2. ПІД-регулятор трьох петель використовує ПІД-контроль нейронної мережі, що є корисним для навчання і процесу реалізації ПІД-параметрів задля отримання бажаного ефекту керування. Показано, що трифазний струм передається від C і P для отримання двофазного струму di і q в обертовій рамі. Сигнал про помилку напруги через

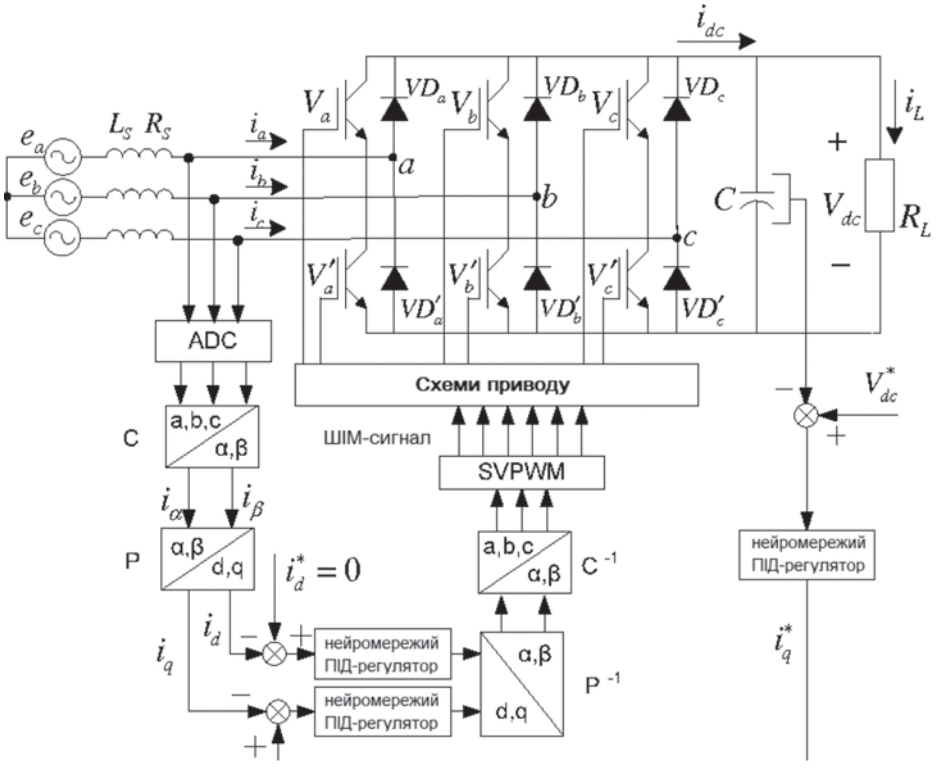

Рис. 2. Принципова схема трифазного VSR на основі ПІД-контролю нейронної мережі

ПІД-контролер нейронної мережі може отримати значення команди активного струму, одночасно значення команди реактивного струму встановлено на нуль. Потім команда подачі напруги трифазного випрямляча отримується шляхом роз'єднання. Нарешті, сигнал керування трифазним випрямлячем отримується за алгоритмом SVPWM, а потім реалізується керування вимикачем випрямляча.

У цій роботі було використано алгоритм ПІД-контрольної нейронної мережі [6]. Здійснення алгоритму таке:

1) параметр ініціалізації (k = 2), такий як η_p, η_I, η_D та коефіцієнт інерції;

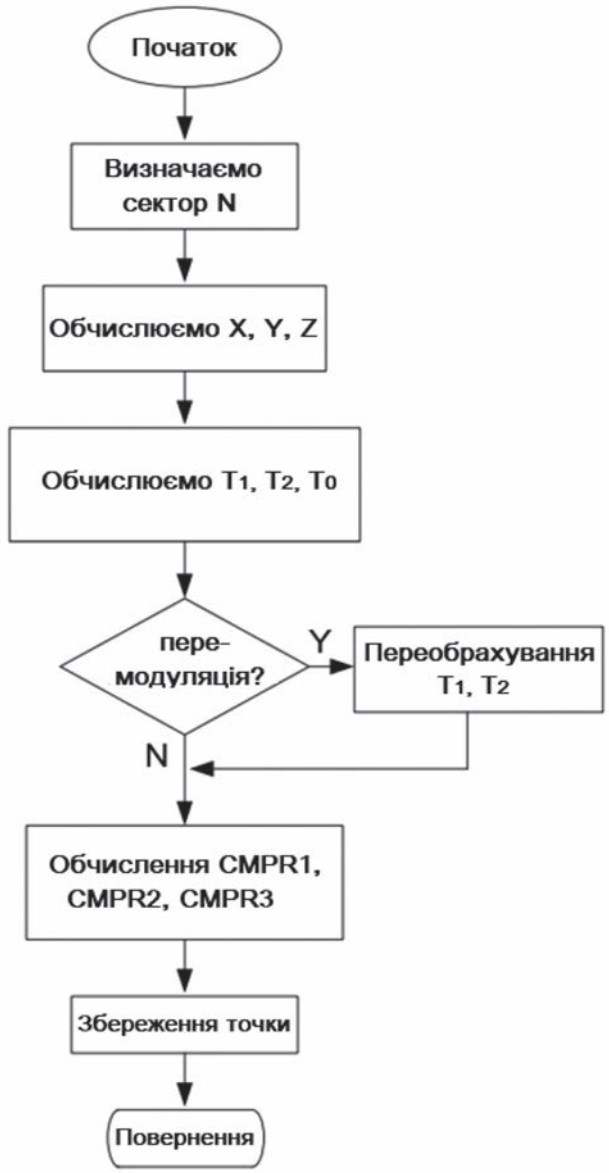

Рис. 3. Блок-схема алгоритму SVPWM

2) отримуємо значення *r(k)* та *y(k)* та обчислюємо відхилення:

$$e(k) = r(k) - y(k) \text{ та } \Delta e(k);$$

3) обчислюємо $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$ як вхідний сигнал нейронної мережі;

4) обчислюємо вхід і вихід нейронної мережі, а потім визначаємо вихідні параметри вихідного шару як K_p, K_I, K_D;

5) обчислюємо вихід контролера $\Delta u(k)+U(k)$;

6) встановлюємо ліміт на вихідне значення;

7) налаштовуємо вагові коефіцієнти за допомогою навчання нейронної мережі;

8) визначаємо $k = k+1$ і повертаємося до кроку (2).

Отже, можна отримати значення $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$ і вони є входами нейронної мережі. Три вихідних параметри відповідно трьом вихідним параметрам ПІД-регулятора реалізують онлайн налаштування.

Під час проєктування трифазного випрямляча джерела напруги цифровий процесор сигналу, що використовується: TMS320F2812, - це основна частина всієї системи керування, що застосовується переважно для завершення процедур розрахунку і виведення його результату. Під час розрахунку налаштування ПІД-регулятора є складними; контур напруги і струмовий контур використовують налаштування параметрів ПІД-регулятора нейронної мережі.

Ми використаємо вдосконалений алгоритм для отримання результатів після відповідного перетворення на підпрограму SVPWM. Підпрограма SVPWM [13] є важливою частиною програмного забезпечення; діаграма програми представлена на рис. 3.

Ця підпрограма спочатку відповідно до даних u_a та u_β потрібна для визначення опорного вектора напруги V* розташованих секторів, потім – для обчислення X, Y, Z; потім – відповідно до вектора опорної напруги V* і розташованих секторів до визначених T1 і T2. Надалі потрібно зробити висновок щодо наявності надмірної модуляції. Якщо вона існує, нові T1 і T2 слід обчислити відповідно до такого рівняння:

$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{T_1}{T_1 + T_2} \\ T_2 = \dfrac{T_2}{T_1 + T_2} \end{cases}$$

Нарешті визначаємо точки перемикання вектора і виробляємо вихідні сигнали ШІМ-хвилі.

Із метою перевірки доцільності і правильності алгоритму керування розробляють прототип і проводять відповідні експерименти. Для прототипу частина апаратного забезпечення містить

основну схему і схему керування, цифровий процесор сигналу типу TMS320F2812. Індуктивність чистої сторони розрахована відповідно до вимог вихідної потужності та обраного значення трифазної індуктивності 4 мГн. Значення конденсатора постійного струму становить 2200 мкФ; програмне забезпечення містить основну програму, підпрограму обслуговування переривань тощо. Відповідно до проєктних вимог вихідна потужність становить 3 кВт, трифазна вхідна потужність - 115 В/400 Гц, частота перемикання - 5 кГц, вихідна напруга постійного струму - 350 В. Перевірка вхідної напруги фази С на стороні мережі подібна до струму вхідної форми сигналу фази С, як показано на рис. 4. На рис. 6 представлено навантаження вихідної напруги постійного струму за стабільності її на рівні приблизно 350 В. За даними рис. 5, вхідна напруга фази С – це переважно та ж сама фаза, що і вхідний струм.

Для вимірювання значення загального вмісту гармонік випрямляча і коефіцієнта потужності його конструкції ми використовуємо наявний лабораторний модуль системи випробування електричних параметрів літака для відповідного аналізу даних. Запустивши модуль аналізу гармонік і модуль аналізу коефіцієнта потужності системи та проаналізувавши зібрані результати, ми досягли загального вмісту гармонік струму фази С 5,23%, а також основної частоти 400,01 Гц та випрямляча коефіцієнта потужності 0,991, як це показано на рис. 7. Коли ми використовували традиційний ПІД-регулятор на тому ж експериментальному прототипі, то досягли загального вмісту гармонік фази струму С 7,84 % із коефіцієнтом потужності 0,963.

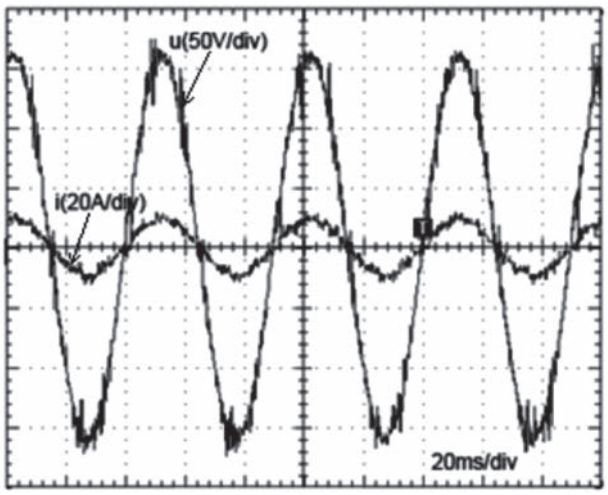

Рис. 4. Форми хвиль напруги і струму фази С

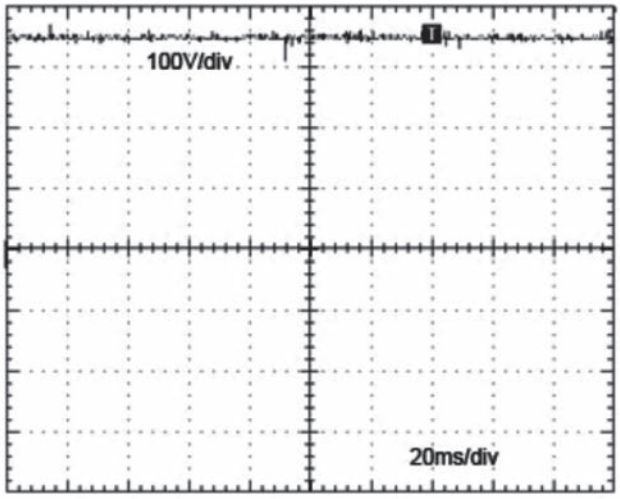

Рис. 5. Форми хвиль напруги на стороні постійного струму

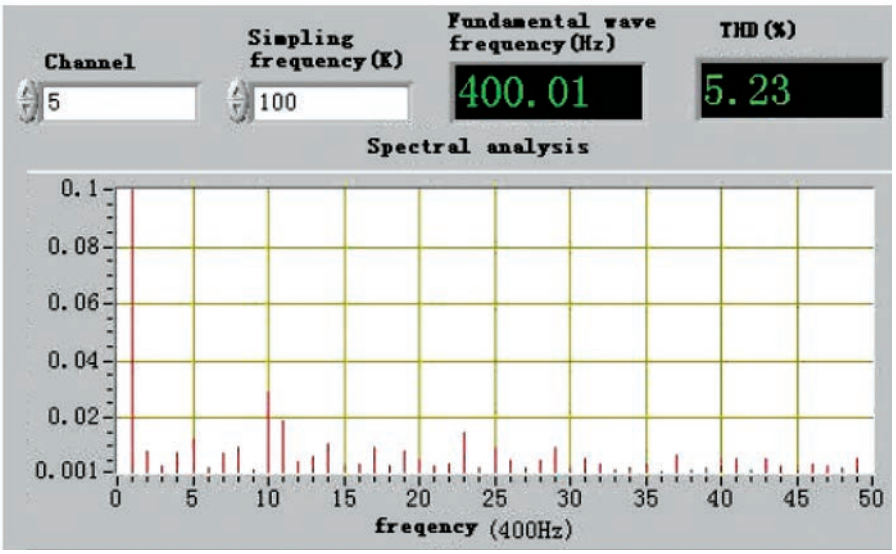

Рис. 6. Спектр гармонік струму

5. Висновки.

Методика, представлена у цій роботі з використанням нейронної мережі для поліпшення налаштування параметрів ПІД-регулювання, дозволяє налаштувати параметри ПІД-регулювання у режимі онлайн. Завдяки експерименту ми знаємо, що трифазне джерело напруги інвертора хвилі випрямляча і хвилі струму, що використовується у нейронній мережі, є базовою однією фазою і може досягти єдності коефіцієнта потужності.

Легко помітити, що вдосконалення алгоритму керування інвертором може ефективно зменшити вміст гармонік і досягти високого коефіцієнту потужності.

Список літератури:

1. Wu R., Dewan S. B., Slemon G. R. A PWM AC-to-DC Converter with fixed switching frequency. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 1990. Vol. 26, Issue 5.

2. Rodriguez J., Pontt J., Silva C.A., Correa P., Lezana P., Cortes P., Ammann U. Predictive current control of a voltage source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 3007. Vol. 54, Issue 1. P. 495-503.

3. Fang Yu, Qiu Xun, Xing Yan, Hu Yuwen. Research on three-phase high power factor correction based on predictive digital current controller. *Proceedings of the CSEE.* 2006. Vol. 26, Issue 20. P. 69-73.

4. Rusheng J., Chen Biaoxian C., Chen Yan. A novel PWM rectifier. *Transactions of China Electrotechnical Society.* 2002. Vol. 17, Issue 6. P.48-52.

5. Wang Jiuhe, Li Huade, Wang Liming. Direct power control system of three phase boost type PWM rectifiers, *Proceedings of the CSEE.* 2006. Vol. 26, Issue 18. P. 54-60.

6. Wang Junqin. Research on incremental PID algorithm and simulation based on neural network. *Modern Electronics Technique.* 2010. Vol. 18. P. 121-123.

7. Chang L. Design of BP neural network PID controllers based on DSP. *Computer Engineering & Science.* 2011. Vol. 33, Issue 4. P. 154-158.

8. Zhang Chun, Han Ruihua, Jiang Ming. Research on simplifier algorithm of the three-phase voltage rectifier with SVPWM. *Mechanical & Electrical Magazine.* 2006. Vol. 23, Issue 10. P. 39-41.

9. Yang H. Modeling, analysis and design of feedback operational amplifier for undergraduate studies in electrical engineering. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering.* 2012. Vol. 10, Issue 8. P. 2295-2303.

10. Савёлов А.А., Сапожникова Е.Ж. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Системы электроснабжения воздушных судов». Москва: МИИГА, 1992. 234 с.

Hobatiuk T.P. NEURAL NETWORK CONTROL OF AVIATION THREE-PHASE INVERTER

In recent years, the trend of development and improvement of electronic devices with high power and frequency, the transmission of high-voltage direct current has led to the development of the aviation energy system. The new aircraft power inverter with a high power factor and its digital implementation is currently one of the priority branches of the study. One of such directions is a choice of parameters of the PID regulator. This task is in itself a complex process, and the design of the inverter eliminates the possibility of implementing the function of self-rotation in the online mode of the parameters of the PID controller.

In this paper, the neural network control of an aviation three-phase inverter is considered, as today the use of approaches based on artificial neural networks is growing rapidly in the field of power electronics and drives. The principle of PWM rectification of a voltage source based on traditional SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) is also analyzed and the inverter control algorithm is improved in order to effectively reduce the content of harmonics and provide a high power factor. In addition, the control algorithm and circuit are tested experimentally using MATLAB / Simulink tools. In order to measure and determine the power factor of the inverter, we use the laboratory module of the system to study the electrical parameters of the aircraft and to analyze the data. The considered inverter has such parameters of the PID regulator which can implement the function of self-rotation in the online mode.

The results of the experiment show that a three-phase PWM rectifier based on neural network control can reduce harmonic distortion, and the power factor reaches its maximum. These data will help in the future design of a three-phase aircraft inverter with a high power factor. At the same time, when comparing conventional PID control with an advanced neural network, neural network control is implemented in the online setting of PID parameters, reducing the proportional, integral, and differential adjustment time, which also improves the efficiency of the device design.

Key words: *neural network control, three-phase inverter, simulation, power factor, PID controller.*