

Тому передаточна функція за збуренням в статиці:

$$W_{\delta}(0) = \frac{k_c + \frac{R_e}{W_{pc}(0) \cdot k_{TP}}}{W_{psh}(0) \cdot k_{ш} + \frac{C}{W_{pc}(0) \cdot k_{TP}}} \quad (11)$$

Все це дає змогу визначити результуючий вираз для зв'язку діапазону керування з параметрами привода врахувавши 5, 9, 10 та 11:

$$D = \frac{\delta}{100} \cdot \frac{\omega_H}{\Delta \omega_{p.3}} \cdot \frac{R_e}{C} \cdot \frac{W_{psh}(0) \cdot k_{ш} + \frac{C}{W_{pc}(0) \cdot k_{TP}}}{k_c + \frac{R_e}{W_{pc}(0) \cdot k_{TP}}} \quad (12)$$

Література

[1]. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. Посібник/ М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. К.: Либідь, 2005. – 680 с.

[2]. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 2: Цифрові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 2014. – 142 с.

DETERMINATION OF CONTROL RANGE IN ELECTRIC DRIVE

Shareiko D. Yu.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Automation Department of Admiral Makarov National Shipbuilding University

Mykolaiv, Ukraine dshareiko.mk@gmail.com

Verbin O.O.

master's degree, gr. 6371m, National Shipbuilding University named after Admiral Makarov

Mykolaiv, Ukraine verbinoleksandr58@gmail.com

Koshman M.V.

master's degree, gr. 6371m, National Shipbuilding University named after Admiral Makarov

Mykolaiv, Ukraine weepcfg@gmail.com

Analytical dependence of the speed control range of the electric drive of a direct current motor (DC motor) of independent excitation was obtained. Considered subordinate regulation. The transfer functions of the closed system under disturbance and the formulas of the control error and the static decay of the speed of the closed system are presented.

Key words: electric drive, transfer function, control range, control error, static speed decay, slave regulation, structural diagram.

УДК 621.314.26

ЦИФРОВА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО ПРИСТРОЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПЛАЗМОТРОНУ

Верещаго Є.М.¹, Костюченко В.І.², Новогрецький С.М.³

І.к.т.н., проф. каф. МП, 2к.т.н., доц. каф. СЕЕС, 3к.т.н., доц. каф. СЕЕС
1,2,3 Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна

lyevgen.vereshchago@nuos.edu.ua; 2vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua;

3sergii.novogretskyi@nuos.edu.ua

Анотація: Викладено етапи проектування цифрового ПІ-регулятора, що забезпечує експоненційний характер перехідного процесу при максимально допустимій амплітуді пульсацій струму навантаження в квазівстановленому режимі в діапазоні амплітуд стрибкоподібних задаючих впливів і заданій частоті комутації силових ключів перетворювача.

Ключові слова: імпульсний перетворювач, система керування, синтез, регулятор.

Вступна частина. В даний час імпульсні перетворювачі, побудовані, зокрема, на базі мостових перетворювачів з фазовим керуванням, що реалізують м'яке перемикання, знаходять дуже широке застосування в ефективних пристроях електроживлення плазмотронів, що забезпечують надійне збудження дугового розряду, стійку роботу плазмотрона в широкому діапазоні струмів та швидкостей повітряного потоку, що робить останній регульованим та простим в експлуатації [1].

Сучасний етап розвитку перетворювальної техніки характеризується впровадженням в інформаційні підсистеми систем керування мікроконтролерів, що реалізують цифрові алгоритми керування. При такому керуванні мікроконтролеру доступні основні дані про функціонування силової частини – сигнали з датчиків струму, напруги та температури, що надходять на входи аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). На їх основі мікроконтролер здійснює керування драйверами силових транзисторів за заданим алгоритмом.

Широкому застосуванню в імпульсних джерелах вторинного електроживлення цифрового зворотного зв'язку сприяє і та обставина, що за останнє десятиліття були суттєво покращені характеристики вбудованих АЦП (роздільна здатність 12 біт при часі вибірки 80 нс) та цифрових широтно-імпульсних модуляторів (ШІМ) (роздільна здатність ШІМ 150 пс).

Метою роботи є послідовне викладення етапів проектування цифрового ПІ-регулятора, що забезпечує експоненційний характер перехідного процесу з часом регулювання t_{reg} при максимально допустимій амплітуді пульсацій струму навантаження в квазівстановленому режимі в діапазоні амплітуд стрибкоподібних заданих впливів від 0,2 до $I_{ref\max}$ та заданій частоті комутації силових ключів перетворювача.

Основна частина. На першому етапі синтезу необхідні динамічні характеристики цифрової системи формуються тільки з урахуванням дискретності за часом Δ , що вноситься в контур регулювання мікроконтролером.

Процес проектування включає два етапи:

- оптимізація коефіцієнтів регулятора для еквівалентної лінійної моделі;
- перехід до дискретного подання.

Функціональна схема стабілізатора струму представлена на рис. 1. Вона містить регулятор струму (CR), широтно-імпульсний модулятор (PWM-2), імпульсний перетворювач (PS), що працює на плазмотрон і контур регулювання струму дуги. На вході регулятора струму здійснюється порівняння напруги завдання $U_{ref\,cur}$, пропорційного заданому значенню струму навантаження I_{ref} , і напруги u_{fb} , що надходить з датчика струму (CS) з коефіцієнтом передачі R_{CS} і пропорційного істинному значенню струму навантаження.

Згладжування пульсацій струму навантаження здійснюється дроселем з параметрами r, L . Еквівалентна схема навантаження представлена у вигляді послідовного з'єднання джерела ЕРС U_0 та диференціального опору R_{diff0} зі змінними параметрами [1]. Основним (нормальним) є режим вимушених коливань із періодом, що задається опорним генератором із частотою дискретизації $1/T$ (T – період дискретизації).

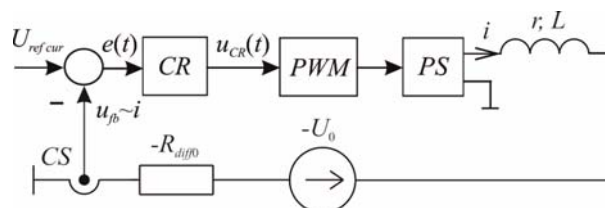


Рис. 1. Схема стабілізатора струму

Імпульсні перетворювачі з пропорційними регуляторами струму дроселя [2] характеризуються поганою якістю процесів. У зв'язку з цим поширення отримали ізодромні регулятори струму (ПІ-регулятори) та більш складні регулятори [2].

Незмінна неперервна частина системи «ДЖ-дуга» в більшості випадків може бути приведена до ланки, передатна функція (ПФ) якої має вигляд [1]

$$W_0(s) = \frac{k_0}{\tau s - 1}, \quad (1)$$

де $\tau = 625 \cdot 10^{-6}$ с, $k_0 = 12,81$ Т. У ПФ $W_0(s)$ включаються коефіцієнти посилення силової частини, датчика струму та ШІМ.

Неважко знайти, що z – передатна функція об'єкта дорівнює (перехід від неперервної моделі до дискретної з інтервалом дискретизації 0,000001 при використанні екстраполятора нульового порядку)

$$H(z) = \frac{0,02051}{z - 1,002}.$$

На рис. 2 показані графіки модуля та аргументу функції $H(e^{j\omega\Delta})$, де $\Delta = 0,0001$. На цьому ж рисунку показані відповідні графіки частотної характеристики вихідної неперервної системи, що описується виразом (1).

Можна бачити, що в області частот до $3 \cdot 10^4$ рад / сек частотні характеристики неперервної та дискретної систем близькі по модулю, проте дискретний сигнал має більший зсув по фазі.

Припустимо, що ця система керує струмом дуги за допомогою використання синтезованого регулятора [1]

$$W^r(s) = \frac{k(Ts + 1)}{s}$$

з чисельними значеннями його постійної часу $T = 0,123 \cdot 10^{-3}$ с та $k = 40320$ с⁻¹.

Можна виявити, що ПФ системи керування в розімкнутому і замкнутому станах мають вигляд

$$W(s) = -\frac{k_r(Ts + 1)}{s(\tau s - 1)} = -k_r \bar{W}(s), \quad (2)$$

$$\Phi(s) = \frac{Ts + 1}{(\tau / k_r)s^2 + (T - 1 / k_r)s + 1}, \quad (3)$$

де $k_r = k k_0$ – коефіцієнт посилення розімкнутого струмового контуру, $\bar{W}(s)$ – нормована ПФ розімкнутої системи, а полюси замкнутої системи при чисельних значеннях з [1] дорівнюють $-9,09 \cdot 10^3$, $-9,09 \cdot 10^{-4}$.

Очевидно, щоб система автоматичного регулювання могла бути стійкою, повинна виконуватися нерівність $T - 1 / k_r > 0$. Звідси знаходимо

$$k_r > 1 / T.$$

Логарифмічні амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики системи в розімкнутому стані, а також амплітудно-частотна характеристика замкнутої системи наведено на рис. 3, з яких випливає $L = 36,1$ дБ, $\varphi_{\text{запас}} = 84,5^\circ$, $M = 1,07$, $\omega_{\text{ср}} = 10,17 \cdot 10^4$ рад/сек.

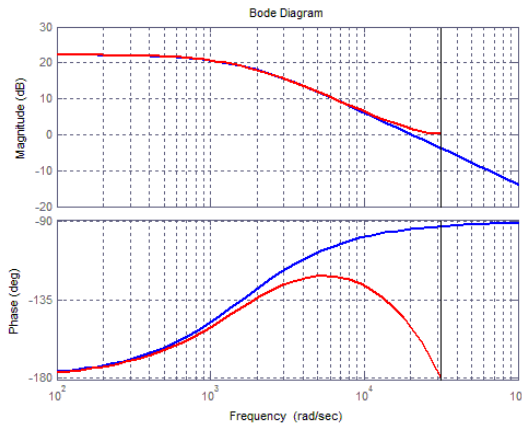


Рис. 2. Частотні характеристики неперервної та дискретної систем

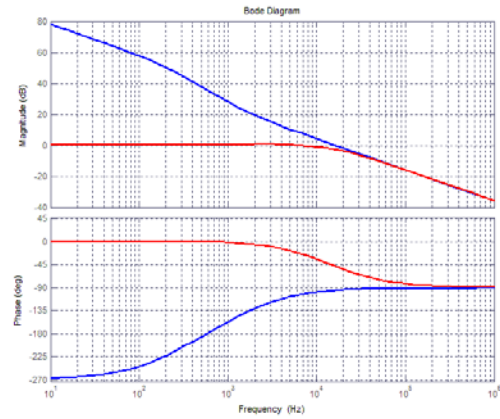


Рис. 3. Частотні характеристики, що відповідають ПФ $W(s)$, $\Phi(s)$

Для реалізації регулятора на мікропроцесорі скористаємось однією з двох методик [3]. У ній цифровій системі ставиться у відповідність еквівалентна неперервна система, синтезується для неї аналоговий регулятор і за отриманими параметрами регулятора визначаються параметри цифрового регулятора. Основною проблемою є задача визначення структури і параметрів еквівалентної неперервної системи.

Для конкретного випадку коефіцієнти ПІ-регулятора неперервної системи:

$$k = 4,959, k_{-1} = 40320 \text{ с}^{-1}.$$

Перевірка цифрового ПІ-регулятор струму. На рис. 4 представлена схема *Simulink*-моделі цифрової системи стабілізації струму дуги.

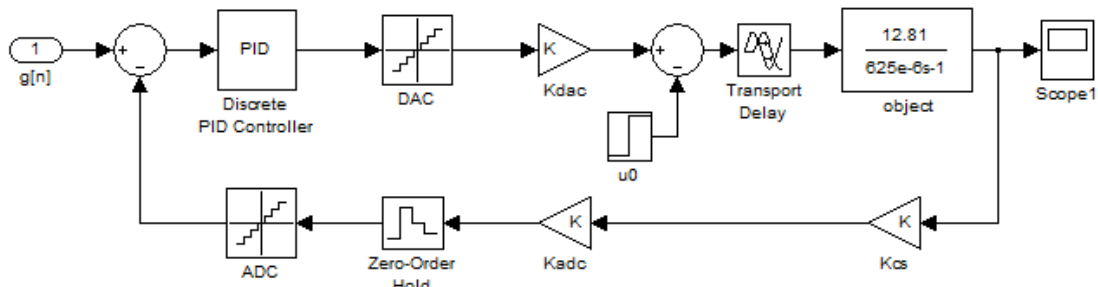


Рис. 4. *Simulink*-модель перетворювача з цифровим зворотним зв'язком

Для побудови дискретної ПФ інтегрального каналу застосуємо інтегрування Ейлера (метод прямокутників), тобто заміну [5]: $s \leftarrow (z - 1) / \Delta$,

$$\text{що дає } D_{PI}(z) = \frac{4,59z - 4,919}{z - 1}.$$

Розімкнена z -передатна функція системи визначається виразом

$$H_c(z) = \frac{0,1012z - 0,1013}{z^2 - 2,002z + 1,002}.$$

Використовуючи це, неважко встановити, що характеристичний поліном замкнутої системи має вигляд

$$z^2 - 1,899z + 0,9003.$$

На рис. 5 показаний годограф коренів цього виразу. На рис. 6 показана реакція цифрової замкнутої системи на зміну ступеневої заданої точки не тільки в моменти квантування, але і в проміжні інтервали. Видно, що система має гарну реакцію $t_{reg} < t_{reg}^*$, $\sigma < \sigma^*$, де $t_{reg}^* = 0,33 \cdot 10^{-3}$ с, $\sigma^* = 10\%$ – задані числа.

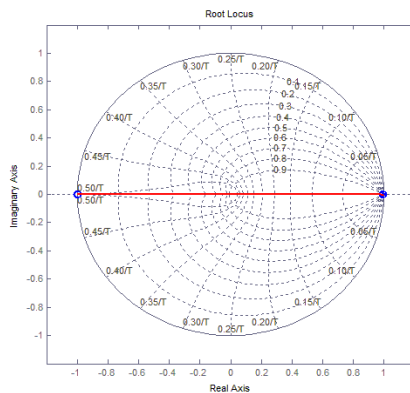


Рис. 5. Кореневий годограф цифрової системи стабілізації струму

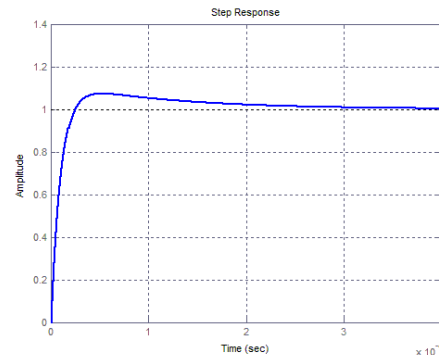


Рис. 6. Перехідний процес у замкнутій системі із цифровим регулятором

Оцінимо робастність отриманої системи. Класичними критеріями робастності є запаси стійкості по фазі та амплітуді.

На рис. 7. наведено частотні показники, відповідні ПФ (2), (3).

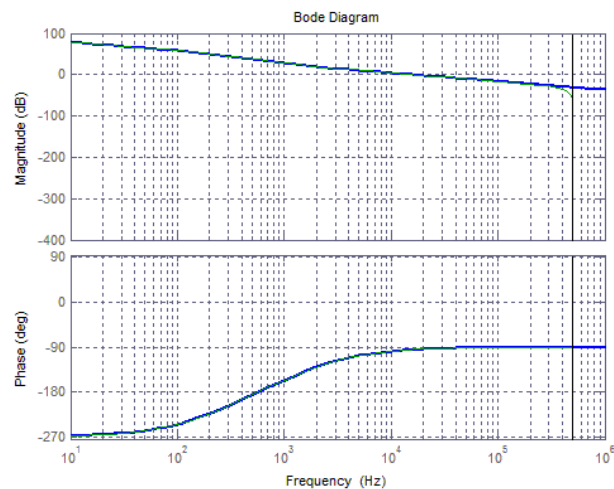


Рис. 7. Результати аналізу перетворювача із цифровим регулятором

На основі цього рисунка укладаємо, що цифровий варіант має запаси стійкості: по фазі $81,6^\circ$ і по амплітуді 25,9 (необхідна умова стійкості для систем із ШІМ [2, 4]) і тому розглянута система є робастною.

Висновки. Описаний підхід значною мірою ґрунтується на досягненнях класичної теорії аналогового зворотного зв'язку та відрізняється простотою.

Процес проектування цифрового зворотного зв'язку і з урахуванням затримки АЦП і ЦШИМ, що вноситься, є основою для проектування імпульсних ІВДЖ з повністю цифровим керуванням.

Подальшим розвитком може бути використання нелінійних динамічних коректорів, нелінійних та нейронних регуляторів та адаптивних систем.

Пропонований підхід може бути корисним і при модернізації систем керування широким класом динамічних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Analysis of dynamic characteristics of the inverter operating on a complex load. E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, S. Novogretskyi. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 5/5(107), 2020, – pp. 23-31. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.215145
2. Белов Г.А. Динамика импульсных преобразователей. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2001. – 528 с.
3. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
4. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
5. Лурье Б.Я., Энрайт П.Дж. Классические методы автоматического управления / под ред. А.А. Ланнэ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 424 с.

DIGITAL CONTROL SYSTEM OF A PULSED POWER SUPPLY FOR THE PLASMATRON

Eugen Vereshchago, Vitalii Kostiuchenko, Sergii Novogretskyi
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract: The stages of designing a digital PI controller are outlined, which provides an exponential nature of the transient process at the maximum allowable amplitude of load current ripples in a quasi-steady state in the range of amplitudes of stepwise setting actions and a given switching frequency of the power switches of the converter.

Keywords: pulse converter, control system, synthesis, regulator.

УДК 621.314.621

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ІНТЕГРОВАНІХ СУДНОВИХ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ
ПРОПУЛЬСИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Жук Д.О.¹, Жук О.К.², Козлов М.О.³, Лінченко В.В.⁴

*1 канд.техн. наук, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем
dmytro.zhuk@nuos.edu.ua*

*2 канд.техн. наук, професор кафедри програмованої електроніки, електротехніки та
телекомунікацій
oleksandr.zhuk@nuos.edu.ua*

*3 аспірант кафедри суднових електроенергетичних систем
maksym.kozlov@nuos.edu.ua*

*4 аспірант кафедри суднових електроенергетичних систем
linchenko_v@elektropostach.mk.ua*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна*

Анотація. Розглянуто типові архітектури інтегрованих суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) технічного флоту з напівпровідниковими пропульсивними комплексами (НПК) на основі частотнорегульованих асинхронних електроприводів (ЧРАЕП).

При вирішенні задач оцінки та забезпечення якості електроенергії виконано аналіз структури, особливостей складу СЕЕС з НПК з подальшою розробкою уточнених MATLAB-