

УДК 621.313.333

## СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА АКТИВНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ДЕЛ-02 МЕТОДОМ ПОЛІНОМІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ

*Кулагін Д.О., аспірант*

*Запорізький національний технічний університет*

*69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64*

*E-mail: nemix123@rambler.ru*

Синтезовано регулятор струму тягового електропривода дизель-поїзда ДЕЛ-02 методом поліноміальних рівнянь.

Ключові слова: метод поліномів, система керування, активна складова струму, регулятор, частота поля.

## СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДЭЛ-02 МЕТОДОМ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

*Кулагин Д.А., аспирант*

*Запорожский национальный технический университет*

*69063, г. Запорожье, ул. Жуковського, 64*

*E-mail: nemix123@rambler.ru*

Синтезирован регулятор тока тягового электропривода дизель-поезда ДЭЛ-02 методом полиномиальных уравнений.

Ключевые слова: метод полиномов, система управления, активная составляющая тока, регулятор, частота поля.

## SYNTHESIS OF DIGITAL MODAL CONTROLLER FREQUENCY-CONTROLLED TRACTION DIESEL-ELECTRIC TRAINS DEL-02 METHOD OF POLYNOMIAL EQUATIONS

*Kulagin D., post-graduate student*

*Zaporozhye National Technical University*

*Zaporozhye, 69063, st. Zhukovskogo, 64*

*E-mail: nemix123@rambler.ru*

The regulator of current of hauling electromechanic drive of diesel-train DEL-02 is synthesized by the method of polynomial equalizations.

Keywords: the method of polynomials, a control system, an active component of a current, a regulator, frequency of a field.

**Вступ.** В сучасній теорії автоматичного керування систематизовано значну кількість методів синтезу регуляторів систем керування електроприводами, що є різноманітними за своїми постановками, вихідними даними та результатами. При використанні даних методів до складних систем електроприводів, що описуються диференціальними рівняннями вищих порядків, не завжди маємо задовільний результат якості перехідних процесів [1].

Перспективним до використання у складних електроприводах, задля синтезу системи керування, є метод поліноміальних рівнянь [2].

В країнах Європейського Союзу значна увага приділяється питанням розробки сучасних систем керування об'єктами залізничного транспорту. Подальше підвищення ефективності перевезень можливе тільки за технічного розвитку рухомого складу в напрямках модернізації тягових систем з використанням трифазних асинхронних двигунів, з метою отримання багатосекційних локомотивів великої

потужності з обмеженим навантаженням на вісь, та заміни аналогових систем і електромеханічних пристроїв цифровими системами, засобами мікропроцесорної техніки [3].

**Аналіз попередніх досліджень.** Сучасна серія вітчизняних дизель-поїздів ДЕЛ зарекомендувала себе як надійний та економічний вид дизель-поїздів [4], яка, проте, потребує подальшої модернізації [5].

Розробка модернізованої системи керування дизель-поїздом ДЕЛ-02 проводиться в руслі впровадження до даної системи внутрішнього контуру регулювання активної складової струму, з подвійним регулятором струму [5], що дозволяє отримати статичну точність системи [6]. Питання синтезу оптимальної форми даного регулятора є основним моментом модернізації.

Модернізація частотно-керованих тягових електроприводів (ЧКТЕ) [5], під час якої було впроваджено систему ЧКТЕ з подвійним регулятором струму до каналу керування автономним інвертором

напруги (АІН) дизель-поїзда ДЕЛ-02, показала можливість ефективної реалізації системи ЧКТЕ зі змінним алгоритмом керування та подвійним регулятором струму на базі автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією.

Синтез модальних регуляторів замкненої системи керування дозволяє отримувати власні числа матриці, що описує регулятор, в заданих точках або областях комплексної площини [7]. Синтезований регулятор повинен забезпечувати оптимальне співвідношення між швидкодією і точністю з одного боку, та перерегулюванням з іншого [8].

Використання цифрових регуляторів в складних системах електроприводу призводять до збільшення швидкодії системи керування, і, відповідно, до покращення якостей перехідних процесів електропривода [9].

Проведення синтезу цифрового модального регулятора здійснюється за методикою з використанням поліноміальних рівнянь [10].

**Мета роботи.** 1. Використання відомого методу поліномів для синтезу регуляторів системи керування дизель-поїзда ДЕЛ-02, задія спрощення процедури синтезу регуляторів в порівнянні з методом підпорядкованого керування.

2. Розрахунок характеристичних поліномів:

- за схемою Баттерворта.

- за біноміальною схемою;

- з використанням інтегрального показника якості – квадрату помилки;

- з використанням інтегрального показника якості – абсолютного значення помилки.

3. Моделювання перехідних характеристик отриманих регуляторів.

4. Порівняння отриманих результатів для різних схем синтезу модального регулятора з використанням методу поліноміальних рівнянь.

### Матеріал і результати дослідження.

Для об'єкта керування (системи, що складається з АІН, випрямляча та блоку фільтрів), заданого у вигляді

$$y(t) = W(p)u(t), \quad (1)$$

де  $W(p)$  – передаточна функція об'єкта керування;

$u(t)$  – просторовий сигнал у часі, що формується модальним регулятором активної складової струму;

$y(t)$  – вихідний просторовий сигнал у часі, що формується об'єктом керування.

Розрахуємо регулятор активної складової струму, що забезпечує стійкість, швидкодію  $\Omega = 3$  і коефіцієнт підсилення замкненої еталонної системи

$k_0^e = 1$ . Тут  $\Omega$  – середньгеометричний корінь характеристичного полінома модального регулятора активної складової струму [2].

$$W(p) = \frac{k_i}{R_d \cdot X_c \cdot T_d \cdot p^2 + R_d \cdot X_c \cdot p + 1}, \quad (2)$$

де  $k_i = \frac{2}{\pi}$  – модуль комутаційної функції АІН;

$X_c$  – ємнісний опір фільтра ланки постійного струму у відносних одиницях;

$R_d$  – активний опір фільтра ланки постійного струму та ошиновки у відносних одиницях.

$$T_d = \frac{L_d}{R_d}, \quad (3)$$

де  $L_d$  – індуктивність ланки постійного струму дизель-поїзда [5].

Об'єкт керування приведемо до стандартного операторного виду. Перехід здійснюється за формулою [10]:

$$W(p) = \frac{b(m, p)}{a(n, p)}, \quad (4)$$

звідки маємо

$$a(2, p) = R_d \cdot X_c \cdot T_d \cdot p^2 + R_d \cdot X_c \cdot p + 1 \quad (5)$$

$$b(1, p) = k_i. \quad (6)$$

Відповідно до представлені структури синтезуємо модальний регулятор першого порядку, що має вид:

$$\dot{u}(t) + \beta_0 \cdot u(t) = \alpha_1 \cdot \dot{y}(t) + \alpha_0 \cdot y(t) + \nu_0 \cdot g(t), \quad (7)$$

де  $\beta_0, \alpha_1, \alpha_0, \nu_0$  – коефіцієнти матриці характеристичного поліному [10].

Матриця характеристичного поліному регулятора знаходиться відповідно до виразів (8)-(10) [1].

$$C = \begin{bmatrix} a_0 & -b_0 & 0 \\ a_1 & -b_1 & -b_0 \\ 1 & 0 & -b_1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$X = \text{col}[\beta_0; \alpha_0; \alpha_1], \quad (9)$$

$$d = \text{col}[a_0^e; a_1^e - a_0; a_2^e - a_1], \quad (10)$$

де  $a_0, a_1$  – коефіцієнти полінома знаменника передаточної функції об'єкта керування;

$b_0, b_1$  – коефіцієнти полінома чисельника передаточної функції об'єкта керування;

$a_0^e, a_1^e, a_2^e$  – коефіцієнти еталонного характеристичного полінома передаточної функції об'єкта керування [11].

Розрахуємо характеристичний поліном за різними способами синтезу:

1. За біноміальною схемою еталонний характеристичний поліном для  $\Omega = 3$  має вигляд [11]:

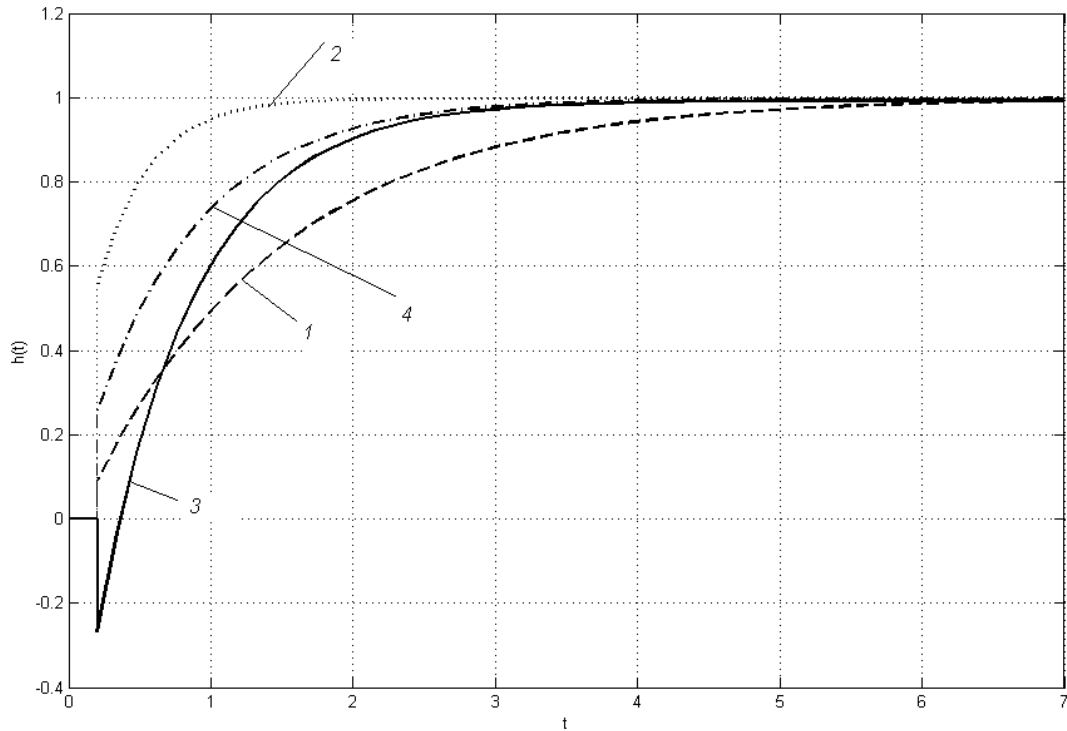


Рисунок 1 - Перехідні процеси при різних системах вибору еталона (масштаб осі абсцис 1 с/поділку (под.), осі ординат 0,2 А/под.)

$$a^e(3, p) = p^3 + 3 \cdot \Omega \cdot p^2 + 3 \cdot \Omega^2 \cdot p + \Omega^3 = p^3 + 9p^2 + 27p + 27. \quad (11)$$

2. За схемою Баттерворта [11]:

$$a^e(3, p) = p^3 + 2 \cdot \Omega \cdot p^2 + 2 \cdot \Omega^2 \cdot p + \Omega^3 = p^3 + 6p^2 + 18p + 27. \quad (12)$$

3. З використанням інтегрального показника якості – квадрату помилки еталонний характеристичний поліном для  $\Omega = 3$  має вигляд [10]:

$$a^e(3, p) = p^3 + 2 \cdot \Omega \cdot p^2 + \Omega^2 \cdot p + \Omega^3 = p^3 + 6p^2 + 9p + 27. \quad (13)$$

4. З використанням інтегрального показника якості – абсолютного значення помилки [10]:

$$a^e(3, p) = p^3 + 2,15 \cdot \Omega \cdot p^2 + 1,75 \cdot \Omega^2 \cdot p + \Omega^3 = p^3 + 6,45p^2 + 15,75p + 27. \quad (14)$$

Система розрахункових рівнянь приймає вигляд [10], [11]:

$$\mathbf{C}\mathbf{X} = \mathbf{d}. \quad (15)$$

Складаючи рівняння за схемою (15) для кожного з випадків (11) – (14) при формі матриць (8) – (10) отримаємо коефіцієнти матриці характеристичного поліному (7):

1.  $\beta_0 = 8, \alpha_0 = -17,223, \alpha_1 = -23,498;$
2.  $\beta_0 = 5, \alpha_0 = -19,942, \alpha_1 = -15,366;$
3.  $\beta_0 = 5, \alpha_0 = -19,942, \alpha_1 = -7,208;$
4.  $\beta_0 = 5,45, \alpha_0 = -19,534, \alpha_1 = -13,323.$

Графіки перехідних характеристик при налаштуванні за способами (11) – (14) показано на рис. 1

(характеристики позначено цифрами 1-4 відповідно).

Перевірка якості регуляторів проводилася за методикою подання на їх вхід одиничного ступінчатого сигналу в момент часу 0,2 с [11].

Коефіцієнт підсилення замкненої системи

$$k_0 = \frac{b_0}{a_0^e}, \quad (16)$$

для всіх згаданих систем еталону є однаковим

$$k_0 = \frac{1,1032}{27} = 0,04085. \quad (17)$$

Коефіцієнт  $v_0$  модального регулятора знаходимо з умови забезпечення коефіцієнта передачі системи:

$$v_0 = \frac{k_0^e}{k_0} = \frac{1}{0,04085} = 24,479. \quad (18)$$

**Висновки.** 1. Приведено об'єкт керування до стандартного операторного вигляду (4) – (6). Розраховано характеристичні поліноми за різними схемами еталонної моделі, проведено моделювання перехідних характеристик отриманих регуляторів.

2. Отримані перехідні характеристики регуляторів (рис. 1) показують, що найкраща швидкодія виявляється при використанні схеми Баттерворта. При синтезі регулятора з використанням інтегрального показника якості – квадрату помилки маємо незадовільну характеристику перехідного процесу, що містить від'ємну ділянку на початку процесу. Інші спо-

соби синтезу показали проміжний результат за швидкістю.

3. Подальші дослідження даного питання плануються проводити в руслі інтеграції синтезованого регулятора за схемою Баттерворта до системи керування АІН дизель-поїзда ДЕЛ-02 та дослідження якості отриманих перехідних характеристик руху дизель-поїзда.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Паршуков А.Н. Методы синтеза модальных регуляторов / Паршуков А.Н. – Тюмень: ТГНУ, 2008. – 59 С.

2. Толочко О.И. Применение метода стандартных полиномов при синтезе систем подчинённого регулирования / Толочко О.И. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ. – 2003. – №4 (62). – С. 114-120.

3. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. Научное издание / Носков В.И., Дмитренко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 С.

4. Носков В.И. Электропередача дизель-поезда ДЭЛ-01 / В.И. Носков, Г.Г. Басов // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ. – 2000. – №5. – С. 64-68.

5. Кулагін Д.О. Розробка моделі модернізованого частотно-керованого тягового електропривода зі змінним алгоритмом керування дизель-поїзда ДЕЛ-02 / Кулагін Д.О., Качур О.С., Андрієнко П.Д. // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя. – 2010. – №1. – С. 30-34.

6. Андрієнко П.Д. Динамика двухконтурной системы регулирования скорости асинхронного двигателя с обратной связью по частоте / Андрієнко П.Д., Шрейнер Р.Т., Волков А.В. // ЭП. Электропривод. – 1982. - №9. – С. 5-8.

7. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Кузовков Н.Т. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 С.

8. Потапенко Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко. – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 353 С.

9. Квакернаак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М.: «Мир», 1977. – 650 С.

10. Волгин Л.Н. Элементы теории управляющих машин / Л.Н. Волгин. – М.: «Советское радио», 1962. – 164 С.

11. Ишматов З.Ш. Использование метода полиномиальных уравнений для синтеза микропроцессорных систем управления электроприводами / Ишматов З.Ш. // Електротехніка. – 2003. - №6. – С. 33-39.