

## СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ДЛЯ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЙ ХЕВІСАЙДА

Шеремет О. І., Лебідь В. Т.

Стаття присвячена аналітичному синтезу регулятора для замкненої системи керування електроприводом. При цьому використовується метод часового еквалайзера, тобто штучного розбиття бажаної динамічної характеристики на виході системи на дискретні інтервали з подальшою їх реалізацією за допомогою відповідного регулятора. Наводяться розрахункові формули, що дозволяють синтезувати регулятори у відповідності до певних передатних функцій розімкнутої або замкнутої системи та бажаного перехідного процесу. Тема статті спрямована на вдосконалення методів синтезу регуляторів, які забезпечують ефективне керування складними технологічними процесами.

Статья посвящена аналитическому синтезу регулятора для замкнутой системы управления электроприводом. При этом используется метод временного эквалайзера, то есть искусственного разбиения желаемой динамической характеристики на выходе системы на дискретные интервалы с последующей их реализацией с помощью соответствующего регулятора. Приводятся расчетные формулы, позволяющие синтезировать регуляторы в соответствии с определенными передаточными функциями разомкнутой или замкнутой системы и желаемого переходного процесса. Тема статьи направлена на совершенствование методов синтеза регуляторов, обеспечивающих эффективное управление сложными технологическими процессами.

The article is devoted to analytical synthesis of controller for closed-loop electric drive control. When this method is used temporal equalizer, i.e. artificial partitioning the desired dynamic characteristic of the output to discrete intervals with their subsequent implementation by the respective regulator. We give formulas to synthesize regulators in accordance with the specific transfer functions open or closed systems and the desired controller. The theme of article is aimed at improving methods of regulators synthesis for providing efficient management of complex technological processes.

Шеремет О. І.

канд. техн. наук,  
доц. каф. ЕСА ДДМА  
sheremet-a@mail.ru

Лебідь В. Т.

д-р техн. наук,  
зав. каф. ЕСА ДДМА

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

УДК 62-52

Шеремет О. І., Лебідь В. Т.

### СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ДЛЯ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЙ ХЕВІСАЙДА

Як правило, в більшості методів синтезу регуляторів для систем підпорядкованого регулювання в якості бажаних параметрів обираються декілька показників якості (перерегулювання, статична похибка, тривалість перехідного процесу, тощо) або частотні характеристики (логарифмічні амплітудно-частотні та фазочастотні). Такі показники не відображають суцільної картини динамічного режиму. У роботах [1, 2] запропоновано брати у якості вихідного параметра для синтезу регулятора весь бажаний перехідний процес, попередньо виконавши його квантування за часом, тобто розбиття на деякі елементарні частини. Складову частину регулятора, яка буде описувати квантований перехідний процес, було названо часовим еквалайзером [1].

Квантований перехідний процес може бути представлений у вигляді ступінчастої функції, яка є сумою функцій Хевісайда [3], що затримуються відносно нуля на цілу кількість періодів квантування  $T_0$ .

$$\begin{aligned}
 y^*(t) &= h_1(\sigma(t-T_0) - \sigma(t-2T_0)) + h_2(\sigma(t-2T_0) - \sigma(t-3T_0)) + \dots \\
 &\dots + h_{n-1}(\sigma(t-(n-1)T_0) - \sigma(t-nT_0)) + h_n\sigma(t-nT_0) = \\
 &= \sum_{i=1}^{n-1} h_i(\sigma(t-iT_0) - \sigma(t-(i+1)T_0)) + h_n\sigma(t-nT_0).
 \end{aligned} \quad (1)$$

Зворотне перетворення Лапласа від виразу (1) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 Y^*(p) &= L^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} h_i(\sigma(t-iT_0) - \sigma(t-(i+1)T_0)) + h_n\sigma(t-nT_0) \right\} = \\
 &= \frac{1}{p} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_i (e^{-iT_0 p} - e^{-(i+1)T_0 p}) + h_n e^{-nT_0 p} \right).
 \end{aligned} \quad (2)$$

Експоненціальні функції з формули (2) можуть бути представлені у вигляді розкладення у ряд Маклорена. Період квантування  $T_0$  є малою величиною, тому для спрощення розрахунків за формулами, можна відкинути у цьому ряді складові, до яких входить  $T_0$  у другій та вищих степенях, тобто вважати, що

$$e^{-iT_0 p} = \frac{1}{1+iT_0 p}, \quad e^{-(i+1)T_0 p} = \frac{1}{1+(i+1)T_0 p}, \quad e^{-nT_0 p} = \frac{1}{1+nT_0 p},$$

$$Y^*(p) = \frac{1}{p} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_i \left( \frac{1}{1+iT_0 p} - \frac{1}{1+(i+1)T_0 p} \right) + h_n \frac{1}{1+nT_0 p} \right). \quad (3)$$

Метою роботи є розробка методу синтезу регулятора для замкненої системи регулювання з використанням часового еквалайзера [1, 2].

Розглянемо структурну схему системи, що складається з об'єкта керування з передатною функцією  $W_{ок}(p)$ , регулятора –  $W_p(p)$  та коефіцієнта зворотного зв'язку  $k_{зв.з}$ . Передатна функція об'єкта та коефіцієнт зворотного зв'язку є незмінними.

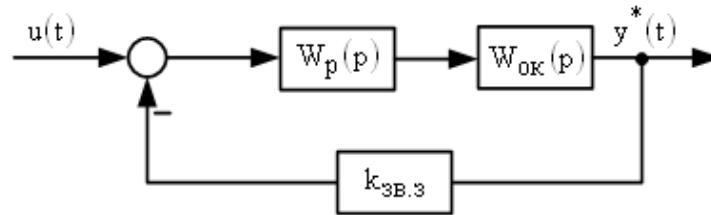


Рис. 1. Структурна схема замкненої системи керування електроприводом

Передатна функція такої системи

$$W(p) = \frac{W_p(p) \cdot W_{ок}(p)}{1 + k_{зв.з} W_p(p) \cdot W_{ок}(p)},$$

а її перехідний процес може бути представлений у вигляді

$$y^*(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W_p(p) \cdot W_{ок}(p) U(p)}{1 + k_{зв.з} W_p(p) \cdot W_{ок}(p)} \right\}. \quad (4)$$

Звідки можна знайти вираз для передатної функції регулятора

$$W_p(p) = \frac{Y^*(p)}{W_{ок}(p) (U(p) - Y^*(p) k_{зв.з})}. \quad (5)$$

Підставимо у формулу (4) вираз (3) для зображення вихідної координати

$$W_p(p) = \frac{\frac{1}{p} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_i \left( \frac{1}{1+iT_0 p} - \frac{1}{1+(i+1)T_0 p} \right) + h_n \frac{1}{1+nT_0 p} \right)}{W_{ок}(p) \left( U(p) - \frac{1}{p} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_i \left( \frac{1}{1+iT_0 p} - \frac{1}{1+(i+1)T_0 p} \right) + h_n \frac{1}{1+nT_0 p} \right) k_{зв.з} \right)}. \quad (6)$$

Формула (6) дозволяє синтезувати регулятори для систем підпорядкованого регулювання.

Розглянемо структурну схему замкненої системи регулювання струму двигуна постійного струму (рис. 2).

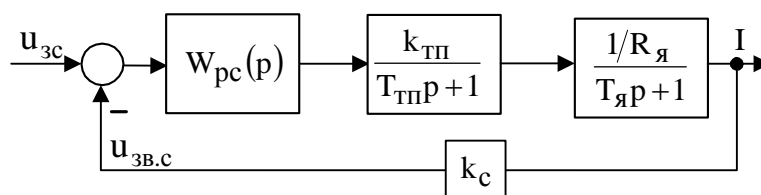


Рис. 2. Структурна схема замкненої системи регулювання струму двигуна постійного струму

Передатна функція регулятора струму –  $W_{рс}(p)$ . Тиристорний перетворювач представлено у вигляді аперіодичної ланки з коефіцієнтом підсилення  $k_{mn}$  та некомпенсованою сталою часу  $T_{\mu}$ . Двигун постійного струму розділений на дві складові: електричну та механічну. Електрична складова (з електричним струмом в якості вихідного параметра) є аперіодичною ланкою з електромагнітною сталою часу  $T_{я}$ . Активний опір якірного кола двигуна постійного струму  $R_{я}$ ,  $k_{с}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом. На вхід системи Над-

ходить завдання за струмом  $u_{3c}$ . На регулятор струму  $W_{pc}(p)$  надходить розузгодження між  $u_{3c}$  та сигналом зворотного зв'язку за струмом  $u_{36.c}$ .

Передатна функція об'єкта керування у контурі струму без урахування коефіцієнта зворотного зв'язку  $k_c$

$$W_{ок.с}(p) = \frac{k_{mn}}{T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{1/R_{я}}{T_{я}p + 1} = \frac{k_{mn}/R_{я}}{T_{\mu}T_{я}p^2 + (T_{\mu} + T_{я})p + 1}. \quad (7)$$

Сигнал завдання на кожен з контурів будемо вважати ступінчастим з амплітудним значенням у 10 В. Тоді зображення вхідної дії буде  $U(p) = 10/p$ .

Визначимо передатну функцію регулятора струму за формулою (6)

$$\begin{aligned} W_{pc}(p) &= \frac{\frac{1}{p} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_{(c)i} \left( \frac{1}{1+iT_{0c}p} - \frac{1}{1+(i+1)T_{0c}p} \right) + h_{(c)n} \frac{1}{1+nT_{0c}p} \right)}{W_{ок.с}(p) \left( \frac{10}{p} - \frac{1}{p} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_{(c)i} \left( \frac{1}{1+iT_{0c}p} - \frac{1}{1+(i+1)T_{0c}p} \right) + h_{(c)n} \frac{1}{1+nT_{0c}p} \right) k_{36.3} \right)} = \\ &= \frac{\left( \sum_{i=1}^{n-1} h_{(c)i} \left( \frac{1}{1+iT_{0c}p} - \frac{1}{1+(i+1)T_{0c}p} \right) + h_{(c)n} \frac{1}{1+nT_{0c}p} \right)}{\frac{k_{mn}/R_{я}}{T_{\mu}T_{я}p^2 + (T_{\mu} + T_{я})p + 1} \left( 10 - k_c \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_{(c)i} \left( \frac{1}{1+iT_{0c}p} - \frac{1}{1+(i+1)T_{0c}p} \right) + h_{(c)n} \frac{1}{1+nT_{0c}p} \right) \right)} = \\ &= W_{ок.с}^{-1}(p) W_{екв}(p) \end{aligned}$$

Таким чином, передатна функція регулятора струму буде визначатись двома складовими: зворотною передатною функцією об'єкта контуру струму  $W_{ок.с}^{-1}(p)$  та часового еквалізера  $W_{екв}(p)$ .

Функція  $W_{ок.с}^{-1}(p)$  може бути знайдена шляхом розв'язання зворотної задачі динаміки [4]. Представивши  $W_{ок.с}(p)$  у просторі станів [5], використовуючи лише суматори, інтегратори та підсилювальні ланки, можна одержати структурну схему, показану на рис. 3.

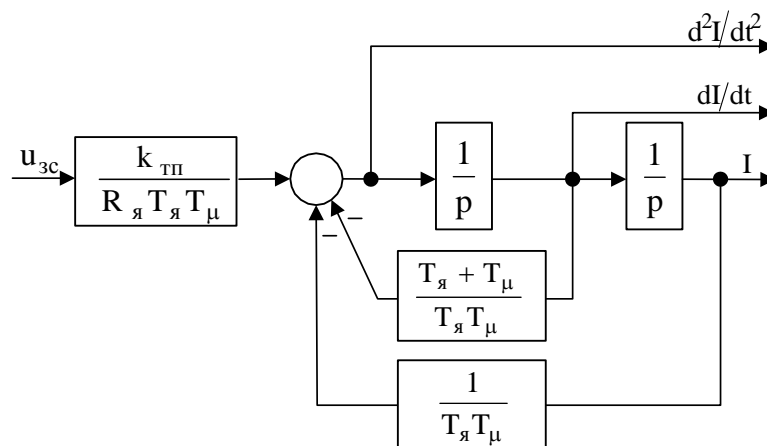


Рис. 3. Структурна схема для об'єкта контуру струму у просторі станів

Використовуючи принципи симетрії [2], представимо структурну схему ланки  $W_{ок.с}^{-1}(p)$  (рис. 4).

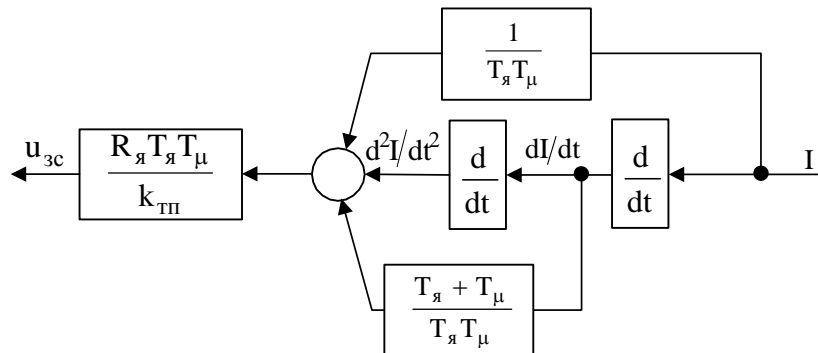


Рис. 4. Симетрична структурна схема для об'єкта контуру струму у просторі станів

Коефіцієнти передатної функції еквалайзера можна розрахувати за формулою (8), використовуючи символічну математику з програми Mathcad.

$$W_{екв}(p) = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n-1} h_{(c)i} \left( \frac{1}{1+iT_{0c}p} - \frac{1}{1+(i+1)T_{0c}p} \right) + h_{(c)n} \frac{1}{1+nT_{0c}p} \right)}{\left( 10 - k_c \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_{(c)i} \left( \frac{1}{1+iT_{0c}p} - \frac{1}{1+(i+1)T_{0c}p} \right) + h_{(c)n} \frac{1}{1+nT_{0c}p} \right) \right)} = \frac{a_9 p^9 + a_8 p^8 + a_7 p^7 + \dots + a_1 p^1 + a_0 p^0}{b_{10} p^{10} + b_9 p^9 + b_8 p^8 + \dots + b_1 p^1 + b_0 p^0}. \quad (8)$$

## ВИСНОВКИ

1. Представлення бажаного перехідного процесу у вигляді елементарних квантів, що являють собою зсунуті за часом функції Хевісайда, дає можливість для синтезу відповідного регулятора у замкненій системі регулювання.

2. Регулятор струму у замкненій системі регулювання, синтезований з використанням часового еквалайзера, складатиметься з двох частин: зворотної передатної функції об'єкта керування, що може бути визначена шляхом симетричного перетворення структурної схеми, та власне часового еквалайзера.

3. При збільшенні кількості смуг часового еквалайзера є доцільним перехід від його представлення у просторі Лапласа до описання за допомогою дискретного z-перетворення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шеремет О. І. Метод синтезу замкнених систем автоматичного регулювання на базі дискретного часового еквалайзера / О. І. Шеремет, О. В. Садовой // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки) – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2012. – Випуск 3(20). – С 124–129.

2. Садовой О. В. Аналітичний синтез регуляторів за квантованою формою бажаної перехідної функції / О. В. Садовой, О. І. Шеремет // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010. – Випуск 1(14). – С. 258–264.

3. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1998. – 608 с.

4. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекцій: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2004 – 576 с.

5. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.