

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ РЕЛЕЙНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Шеремет О. І., Ткаченко О. О.

Рассматриваются особенности синтеза релейных регуляторов для электроприводов постоянного тока. Релейные регуляторы, работающие в скользящем режиме эквивалентны линейному усилителю с бесконечно большим коэффициентом усиления. Скользящий режим работы релейной системы заключается в том, что под действием обратных связей, охватывающих линейные звенья объекта управления совместно с релейным регулятором, последний переключается из одного устойчивого положения в другое с высокой частотой. Показано, что релейная система в режиме скольжения имеет свойство инвариантности по отношению к некоторым параметрическим и координатным возмущениям. Рассмотрен синтез релейных регуляторов для электроприводов постоянного тока при представлении динамики силовой части системой дифференциальных уравнений. Предложен алгоритм оптимального управления скоростью двигателя постоянного тока и показано, что закон оптимального управления, синтезированный аналитически, может быть реализован различными структурами.

Розглядаються особливості синтезу релейних регуляторів для електроприводів постійного струму. Релейні регулятори, що працюють в ковзному режимі еквівалентні лінійному підсилювачу з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення. Ковзний режим роботи релейної системи полягає в тому, що під дією зворотних зв'язків, що охоплюють лінійні ланки об'єкта керування спільно з релейним регулятором, останній перемикається з одного стійкого стану в інший з високою частотою. Показано, що релейна система в режимі ковзання має властивість інваріантності по відношенню до деяких параметричних і координатних збурень. Розглянуто синтез релейних регуляторів для електроприводів постійного струму при представленні динаміки силових частини системою диференціальних рівнянь. Запропоновано алгоритм оптимального керування швидкістю двигуна постійного струму і показано, що закон оптимального керування, синтезований аналітично, може бути реалізований різними структурами.

The synthesis theoretical aspects by relay regulators for direct current electric drives are considered in the article. Relay regulators operating in the sliding mode are equivalent to a linear amplifier with an infinitely large gain. Sliding mode of the relay system is that under the influence of feedbacks, covering the linear links of the control object in conjunction with the relay controller, the latter switches from one stable position to another with a high frequency. It is shown that the relay system in the slip regime has the property of invariance with respect to certain parametric and coordinate perturbations. The synthesis of relay regulators for direct current electric drives is considered when representing the dynamics of the power part by a system of differential equations. An algorithm for the optimal control of the DC motor speed is proposed and it is shown that the optimal control law, synthesized analytically, can be realized by various structures.

Шеремет О. І.

канд. техн. наук, доц. каф. ЕСА ДДМА, докторант ДДТУ
sheremet-oleksii@ukr.net

Ткаченко О. О.

магістр каф. ЕСА ДДМА

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

ДДТУ – Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське.

УДК 62-52: 621.313

Шеремет О. І., Ткаченко О. О.

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ РЕЛЕЙНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Теоретично вичерпне рішення задачі керування в умовах дії параметричних і координатних збурень, що змінюються в широкому діапазоні, дає ідея побудування систем, які є стійкими при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення. Необхідний результат при подібному підході досягається у границі при збільшенні коефіцієнта підсилення до нескінченності.

Реалізація нескінченно великого коефіцієнта підсилення в рамках лінійних структур виявляється практично нерозв'язною задачею. Причиною цього є наявність природних фізичних обмежень на величину керуючої дії, які приводять до утворення коливань у замкнутому контурі при спробі необмеженого збільшення коефіцієнта підсилення. Однак для забезпечення необхідної якості процесу керування при обмеженому діапазоні змінення параметричних і координатних збурень часто немає необхідності в реалізації нескінченно великого коефіцієнта підсилення. Виявляється достатнім забезпечити стійкість і задані показники якості при кінцевому, але відносно великому коефіцієнті підсилення [1].

Реалізація нескінченно великих коефіцієнтів підсилення можлива в нелінійних системах з розривним керуванням. У роботах [2, 3] показано, що релейний регулятор, який працює у ковзному режимі, еквівалентний лінійному підсилювачу з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення.

Ковзний режим роботи релейної системи полягає у тому, що під дією зворотних зв'язків, що охоплюють лінійні ланки об'єкта керування сумісно з релейним регулятором, останній перемикається з одного стійкого положення в інше з високою частотою [4]. Середнє значення сигналу на вході релейного елемента при цьому рівне нулю, а середнє значення сигналу на виході по абсолютній величині менше максимального, що відповідний одному зі стійких положень.

Релейна система у ковзному режимі, що відноситься до класу систем, які є стійкими при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення, має властивість інваріантності по відношенню до деяких параметричних і координатних збурень. Введення в систему керування декількох реле і створення для кожного з них ковзного режиму шляхом охоплення зворотними зв'язками сумісно з кожною ланкою лінійної частини об'єкта керування дозволить усунути вплив практично всіх його змінних параметрів, а також зовнішніх збурень на динамічні властивості і отримати теоретично будь-який бажаний перехідний процес.

Метою роботи є розгляд теоретичних аспектів алгоритмічного синтезу релейних регуляторів для електроприводів постійного струму та визначення алгоритму оптимального керування швидкістю.

Теоретично вичерпний розв'язок задачі керування в умовах дії параметричних та координатних збурень, що змінюються в значному діапазоні, дає ідея побудови систем, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнту підсилення. Необхідний результат при даному підході досягається при збільшенні коефіцієнту підсилення до безкінечності. Для систем з регулюванням за відхиленням (рис. 1) передаточна функція за каналом збурення має вигляд:

$$\Phi(p) = \frac{y(p)}{f(p)} = \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p) \cdot W_1(p) \cdot K(p)}.$$

Передаточна функція, яка приведена вище, прямує до нуля, коли коефіцієнт підсилення $K(p) \rightarrow \infty$. Передаточна функція по каналу керуючої дії має вигляд:

$$\Phi(p) = \frac{y(p)}{y^*(p)} = \frac{W_2(p) \cdot W_1(p) \cdot K(p)}{1 + W_2(p) \cdot W_1(p) \cdot K(p)}$$

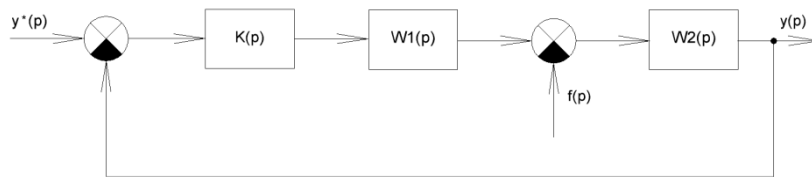


Рис. 1. Структурна схема системи з регулюванням за відхиленням

Передаточна функція за каналом керуючої дії прямує до одиниці, коли коефіцієнт підсилення $K(p) \rightarrow \infty$.

Реалізація безкінечно великого коефіцієнту в рамках лінійних структур виявляється практично неможливою. Причиною цього є наявність природних фізичних обмежень на величину керуючої дії, які приводять до виникнення коливань в замкненому контурі при спробі необмеженого збільшення коефіцієнту підсилення. Однак для забезпечення необхідної якості перехідних процесів керування при обмеженому діапазоні зміни параметричних та координатних збурень зазвичай немає необхідності в реалізації безкінечно великого коефіцієнту підсилення. Виявляється достатнім забезпечити стійкість та задані показники якості при кінцевому, але відносно великому значенні коефіцієнту підсилення.

Реалізація безкінечно великих коефіцієнтів підсилення можлива в нелінійних системах з розривним керуванням. В [2, 3] показано, що релейний регулятор, що працює в режимі ковзання, еквівалентний лінійному підсилювачу з безкінечно великим коефіцієнтом підсилення.

Режим ковзної роботи релейної системи полягає в тому, що під дією зворотних зв'язків, що охоплюють лінійні ланки об'єкту курування разом з релейним регулятором, останній перемикається з одного стійкого стану в інше з дуже високою (теоретично безкінечно високою) частотою. Середнє значення сигналу на вході релейного елемента при цьому рівне нулю, а середнє значення сигналу на виході за абсолютною величиною менше максимального, що відповідає одному із стійких станів. Існування режиму ковзання можливе, якщо виконується умова, що зводиться до вимоги стійкості деякої лінійної системи з безкінечно великим коефіцієнтом підсилення. А саме, виникнення режиму ковзання можливе тоді,

коли похідні від вхідного сигналу релейного елемента $\dot{x}(t)$ до переключення $\dot{x}^-(t)$ та після

переключення $\dot{x}^+(t)$ мають різні знаки, тобто:

$$\dot{x}^-(t) \cdot \dot{x}^+(t) < 0.$$

Наведена вище умова може виконуватись, коли різниця порядків знаменника та чисельника елемента зворотного зв'язку дорівнює одиниці, це можливо для схеми, що приведена на рис. 2.

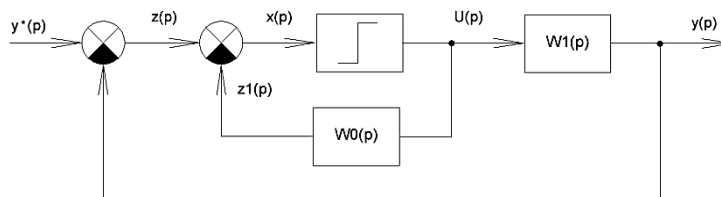


Рис. 2. Структурна схема системи з релейним елементом

Іншими словами при наявності інерційної ланки в замкнутому контурі, що має релейний елемент. Рівняння релейної системи, приведені на рис. 2, можна представити у вигляді:

$$x(p) = z(p) - z_1(p) = z(p) - W_0(p) \cdot U(p).$$

В режимі ковзання сигнал на вході релейного елемента дорівнює нулю, таким чином отримуємо:

$$z(p) - W_0(p) \cdot U(p) = 0,$$

звідки:

$$U(p) = \frac{1}{W_0(p)} \cdot z(p).$$

Зміна $U(p)$ являє собою деяку еквівалентну керуючу дію.

Отримаємо наступне рівняння, що визначає рух релейної системи в режимі ковзання:

$$z(p) = \frac{W_0(p)}{W_0(p) + W_1(p)} \cdot y^*(p).$$

Рівняння наведене вище відповідає системі, зображеній на рис. 2, якщо замінити релейний елемент лінійним підсилювачем з безкінечно великим коефіцієнтом підсилення. Також це рівняння справедливе і для схеми на рис. 3, звідки можна зробити висновок, що на рух системи, що працює в режимі ковзання, не впливають параметри лінійної частини об'єкту керування, що охоплена зворотнім зв'язком разом з релейним елементом.

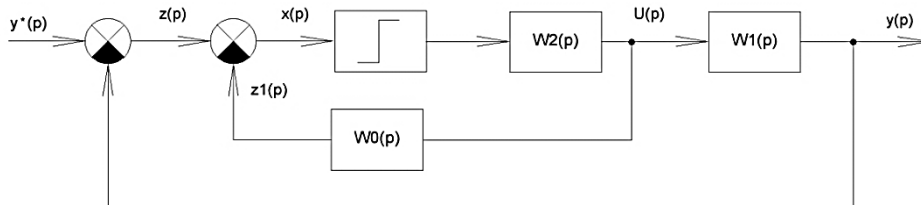


Рис. 3. Структурна схема системи з релейним елементом

Сказане вище свідчить, що релейна система в режимі ковзання, що відноситься до класу систем стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнту підсилення, має властивість інваріантності по відношенню до деяких параметричних та координатних збурень. Введення в систему декількох реле та створення для кожного з них режиму ковзання шляхом охоплення зворотними зв'язками разом з кожною ланкою лінійної частини об'єкта керування дозволяє уникнути впливу практично всіх його параметрів, а також зовнішніх збурень на динамічні властивості та теоретично отримати будь який перехідний процес.

Клас керуючих функцій, доступних для реалізації при побудові тієї чи іншої системи керування електроприводом, визначається в першу чергу типом та конструктивними особливостями керуємого перетворювача потужності, що використовується. Алгоритмічний синтез релейних систем керування має сенс для електроприводів постійного струму перетворювачі яких керується повністю, та здатні перемикатися з високою частотою, наприклад, широтно-імпульсні перетворювачі, транзисторні [5] та тиристорні однофазні інвертори, або мають фільтруючі властивості, як генератор постійного струму з незалежним збудженням, електромашини або магнітні підсилювачі. Застосування випрямлячів з фазовим керуванням та природною комутацією вентилів разом з релейною системою керування вимагає застосування спеціальних заходів та додаткового розгляду. Для електроприводів невеликої потужності

дуже перспективним є застосування силових релейних регуляторів, що являють собою об'єднання в одному пристрої релейного елемента в інтегральному виконанні з високочастотним транзисторним інвертором.

Розглянемо синтез релейних регуляторів електроприводів постійного струму, для яких динаміка силової частини описується системою диференціальних рівнянь (1):

$$\begin{cases} p \cdot \varphi = k_I \cdot \omega_D; \\ p \cdot \omega_D = \frac{R_{Я}}{C\Phi \cdot T_M} \cdot i_D; \\ p \cdot i_D = -\frac{C\Phi}{R_{Я} \cdot T_{Я}} \omega_D - \frac{1}{T_{Я}} \cdot i_D + \frac{1}{R_{Я} \cdot T_{Я}} \cdot E_{П}; \\ p \cdot E_{П} = -\frac{1}{T_{П}} \cdot E_{П} + \frac{K_{П}}{T_{П}} \cdot u_K, \end{cases} \quad (1)$$

де φ – кут переміщення валу двигуна або робочого органу;

k_I – коефіцієнт передачі редуктора;

ω_D – кутова швидкість двигуна;

$R_{Я}$ – опір якоря двигуна;

$C\Phi$ – добуток конструктивного коефіцієнту на потік двигуна;

T_M – механічна стала часу двигуна;

i_D – струм якоря двигуна;

$T_{Я}$ – стала часу обмотки якоря двигуна;

$E_{П}$ – ЕРС перетворювача;

$T_{П}$ – стала часу перетворювача;

$K_{П}$ – коефіцієнт підсилення перетворювача;

u_K – напруга керування.

Динаміка збуреного руху описується системою рівнянь (2):

$$\begin{cases} p \cdot \eta_1 = b_{12} \cdot \eta_2; \\ p \cdot \eta_2 = b_{23} \cdot \eta_3; \\ p \cdot \eta_3 = b_{32} \cdot \eta_2 + b_{33} \cdot \eta_3 + b_{34} \cdot \eta_4; \\ p \cdot \eta_4 = b_{44} \cdot \eta_4 + m_4 \cdot U. \end{cases} \quad (2)$$

Керований перетворювач представимо у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, що справедливо для більшості однофазних інверторів, широтно-імпульсних перетворювачів, генератора постійного струму, магнітного підсилювача.

Виділимо з системи (2) диференціальні рівняння, що описують рух $\eta_3(U)$:

$$\begin{cases} p \cdot \eta_2 = b_{23} \cdot \eta_3; \\ p \cdot \eta_3 = b_{32} \cdot \eta_2 + b_{33} \cdot \eta_3 + b_{34} \cdot \eta_4; \\ p \cdot \eta_4 = b_{44} \cdot \eta_4 + m_4 \cdot U. \end{cases} \quad (3)$$

Введемо нові позначення для змінних стану: $\eta_2 = x_1$; $\eta_3 = x_2$; $\eta_4 = x_3$; $U = U_3$.

В результаті перетворень отримаємо систему рівнянь наступного вигляду:

$$\begin{cases} p \cdot x_1 = b_{23} \cdot \eta_3; \\ p \cdot x_2 = b_{32} \cdot \eta_2 + b_{33} \cdot \eta_3 + b_{34} \cdot \eta_4; \\ p \cdot x_3 = b_{44} \cdot \eta_4 + m_4 \cdot U_3, \end{cases}$$

де U_3 – шукане оптимальне рівняння релейного регулятора.

Після алгебраїчних перетворень отримуємо алгоритм оптимального керування швидкістю (4):

$$U_3 = -\text{sign} \left(M_3 \cdot \left(\eta_3 - \frac{b_{32}}{b_{44}} \cdot \eta_2 - \frac{b_{34}}{b_{44}} \cdot \eta_4 \right) \right). \quad (4)$$

Формування керуючої дії здійснюється жорсткими зворотними зв'язками по координатам збуреного руху при цьому відпадає необхідність диференціювання помилки.

На основі виконаного синтезу алгоритму (4) можна сказати, що аналітичне конструювання регуляторів дозволяє визначити рівняння оптимальних регуляторів в двох фазових просторах, розширення розмірностей яких на одиницю дозволяє ввести в закони керування інтегральні складові. При цьому параметри синтезованих таким чином законів оптимального керування досить просто в загальному вигляді виражаються через параметри об'єкту.

ВИСНОВКИ

Закон оптимального керування, синтезований аналітично, може бути реалізовано різними структурами. При цьому системи оптимального керування, що сконструйовані для одного і того ж об'єкту, але в різних просторах станів, забезпечуючи відтворення однакових траєкторій збуреного впливу, викликаного будь-якими початковими відхиленнями, відрізняються кінцевим алгоритмом, структурною схемою, складністю технічної реалізації, статичними властивостями та ступеню чутливості до параметричних та зовнішніх збурень [6].

Раціональний вибір простору станів для структурної та технічної реалізації алгоритмів оптимального дозволить з найменшими затратами задовольнити самим жорстким вимогам на розробку системи керування електроприводом.

Таким чином, формування законів оптимального керування може бути здійснене різними структурними схемами, в яких на релейні регулятори окрім жорстких від'ємних зворотних зв'язків за основною координатою подаються різні стабілізуючі та компенсуючі зворотні зв'язки [7, 8].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности / М. В. Мееров. – М. : Наука, 1967. – 424 с.
2. Цыпкин Я. З. Теория релейных систем автоматического регулирования / Я. З. Цыпкин. – М. : Гостехиздат, 1955. – 456 с.
3. Цыпкин Я. З. Релейные автоматические системы / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1974. – 576 с.
4. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина. – К. : ИСИМО, 1996. – 298 с.
5. Импульсные и релейные следящие приводы постоянного тока с полу-проводниковыми усилителями / Л. Д. Панкратьев, И. Г. Паппе, Б. И. Петров, В. А. Полковников. – М. : Энергия, 1968. – 104 с.
6. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін. ; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
7. Зеленов А. Б. Аналитическое конструирование релейных регуляторов систем электропривода с нелинейной интегральной обратной связью / А. Б. Зеленов, В. П. Яблонь // Електромашинобудування та електроустаткування : респ. міжвід. наук.-техн. зб. – Одеса, 1996. – Вып. 48. – С. 10–20.
8. Зеленов А. Б. Оптимальное релейное управление электроприводом с характеристикой загрузки, имеющей участок отрицательного вязкого трения / А. Б. Зеленов // Вестник ХГПУ. Сер. «Электротехника, электроника и электропривод». – Вып. 113 : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков, 2000. – С. 82–84.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2017 р.