

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 681.527.3:623.438

Скворчевський О.Є., канд. техн. наук

НЕЛІНІЙНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ, ПОБУДОВАНОГО НА ОСНОВІ ЕЛЕМЕНТІВ СОПЛО-ЗАСЛІНКА ТА ПРОПОРЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. З часів першого застосування елемента сопло-заслінка у складі системи керування рухом крилатої ракети Фау-1, цей підсилювач набув широкого розповсюдження. Така популярність цього пневматичного або гідравлічного підсилювача пояснюється простістю його конструкції та безпрецедентно високим коефіцієнтом посилення по потужності, який складно досягти в одному каскаді електронних підсилювачів. Відсутність тертя в елементі сопло-заслінка забезпечує високу чутливість цього підсилювача.

Суттєвим недоліком елемента сопло-заслінка є низький коефіцієнт корисної дії, викликаний непродуктивною витратою робочої рідини через сопло у відсутності сигналу керування. Вказаний недолік можна ліквідувати шляхом встановлення послідовно елемента сопло-заслінка зворотного клапану, що приводиться до руху тим же електромагнітом, що і елемент сопло-заслінка [1]. В основу винаходу [1] покладена гіпотеза про те, що послідовно встановлений електрокерований зворотний клапан не буде впливати на процес регулювання потужності елементом сопло-заслінка завдяки тому, що довжина його робочого ходу на порядок більша ніж у елемента сопло-заслінка. Однак ця гіпотеза вимагає обґрунтування, як на основі математичного моделювання, так і експериментальних досліджень робочих процесів запропонованого перетворювача.

Аналіз останніх досягнень в напрямку створення електрогідравлічного перетворювача на основі елемента сопло-заслінка нормально-закритого типу. В напрямку створення електрогідравлічного перетворювача на основі елемента сопло-заслінка нормально-закритого типу [1] проведено значний обсяг робіт. Запропоновано пропорційний електромагніт [2] із покращеною тяговою характеристикою, що дозволяє переміщувати заслінки при діаметрах сопел до $7 \cdot 10^{-3}$ м. Це, в свою чергу дозволить використовувати вказаний електрогідравлічний перетворювач для безпосереднього керування запірно-регулюючими елементами пропорційної гідроапаратури із великими умовними проходами (Ду 32, Ду 50), поршнями переміщення нахиленої шайби аксіально-поршневих та статорного кільця радіально-поршневих або пластинчастих регульованих насосів, для побудови електрогідравлічних слідкуючих приводів із одним каскадом посилення. Вище перелічені електрогідравлічні пристрої мають однакову ознаку – перетворення енергії потоку робочої рідини в механічну енергію поступального руху із одночасною стабілізацією чи керуванням по заданому закону. Тому будемо називати їх мехатронними модулями поступального руху.

В роботі [3] виконано математичне моделювання статичних робочих процесів електрогідравлічних перетворювачів нормально-закритого типу, яке показало можливість практично лінійного регулювання тиску в залежності від струму керування. Результати роботи [3] знайшли експериментальне підтвердження в роботі [4].

Незважаючи на проведений обсяг робіт відкритим залишається питання про вплив зворотного клапану, встановленого послідовно елементу сопло-заслінка, на динамічні характеристики електрогідравлічного мехатронного модуля поступального руху. Також необхідно порівняти отримані характеристики перехідних процесів із аналогічними характеристиками мехатронних модулів, побудованих на основі елементів сопло-заслінка нормально-відкритого типу.

Електрогідравлічні слідкуючі приводи та агрегати на основі елементів сопло-заслінка нормально-відкритого типу достатньо досліджені в класичних роботах Т.М. Башти, В.Н. Прокоф'єва, Н.С. Гаминіна, В.А. Лещенко, Е.М. Хаймовича, Д.Ф. Попова, Б.Ф. Гликмана та ін. Однак в цих роботах для опису елементів та систем гідроприводу та гідроавтоматики, як правило, використовуються лінеаризовані математичні моделі. На сучасному етапі розвитку прикладної математики та обчислювальної техніки більш доцільно використовувати нелінійні математичні моделі для подальшого їх вирішення численними методами із застосуванням пакетів прикладних програм.

В роботі [5] проведений ґрунтовний аналітичний огляд сучасних методів математичного комп'ютерного моделювання робочих процесів електрогідравлічних систем та агрегатів. Показано, що певним стандартом в моделюванні енергетичних, статичних та динамічних процесів в електрогідравлічних системах та їх елементах є модуль Simulink програми MATLAB. Його широке розповсюдження можна пояснити відносною простістю та схожістю своєю блочною структурою на попередні програми для розрахунку гідроприводів (SIAM, VisSim, та ін.). Використання математичних пакетів (Simulink/MATLAB, SIAM, VisSim, та ін.), що дозволяють вводити модель у комп'ютер, шляхом її набору із стандартизованих блоків, має декілька принципових недоліків. Стандартизм блоків вимагає створювати оригінальні авторські блоки для моделювання складних робочих процесів. Переведення моделей із первісної форми диференціальних та алгебраїчних рівнянь в блочну структуру вимагає значної праці та часу, а також створює передумови для виникнення помилок. Також часто відповідність набраних блок-схем вихідним рівнянням викликає сумніви.

Таким чином побудова об'єктно-орієнтованої математичної моделі досліджуємого модуля, що буде складатися із нелінійних диференціальних рівнянь, із подальшим їх чисельним рішенням є актуальною науковою задачею.

Задача та мета дослідження. Задачею роботи є розробка об'єктно-орієнтованої нелінійної математичної моделі та отримання характеристик перехідних процесів мехатронного модуля поступального руху, побудованого на основі елементу сопло заслінка нормально-відкритого типу та пропорційного електромагніту [2]. Метою отримання вказаних характеристик є подальше їх співставлення із аналогічними характеристиками мехатронного модуля, побудованого на основі елементів сопло-заслінка нормально-закритого типу.

Основний матеріал дослідження динаміки мехатронного модуля, побудованого на основі елементів сопло-заслінка та пропорційних електромагнітів.

Розробка об'єктно-орієнтованої нелінійної математичної моделі на основі нелінійних диференціальних рівнянь

На рис. 1 представлена розрахункова схема вказаного електрогідравлічного мехатронного модуля поступального руху. Шток асиметричного гідравлічного циліндру несе інерційне навантаження m також до штоку прикладене зусилля F . Позитивний напрямок руху Y поршня зі штоком та позитивний напрямок руху X заслінки із яком пропорційного електромагніту показаний на рис. 1.

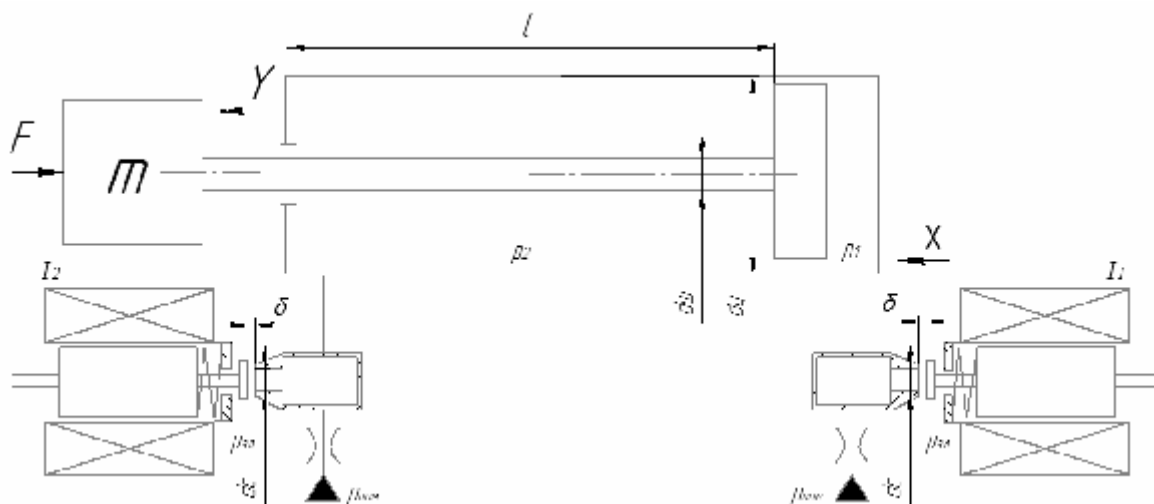


Рис. 1. Розрахункова схема електрогідравлічного мехатронного модуля поступального руху, створеного на основі елементів сопло заслінки нормально-відкритого типу

Електричні процеси в обвиті пропорційного електромагніту опишемо на основі спрощеного диференційного рівняння [6]:

$$\frac{dI}{dt} \cdot L = U - I \cdot R, \quad (1)$$

де t – час; I – керуючий струм електромагніту; L – індуктивність обвитки котушки пропорційного електромагніту; U – напруга на обвиті котушки пропорційного електромагніту; R – опір обвитки котушки пропорційного електромагніту.

Динаміка руху заслінки із якорем пропорційного електромагніту описується наступним диференційним рівнянням:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} \cdot m_{3,IP} = k_I \cdot I - c_E \cdot x - \left(\frac{1,8}{0,47 + \nu} + 1 \right) \cdot \rho \cdot \nu \cdot V_3 - \frac{\pi \cdot d_C^2}{4} \cdot p_1, \quad (2)$$

де x – координата положення заслінки із якорем пропорційного електромагніту; $m_{3,IP}$ – приведена маса заслінки із якорем електромагніту; k_I – коефіцієнт пропорційності по струму електромагніту; c_E – жорсткість пружини електромагніту; ν – кінематична в'язкість робочої рідини; ρ – щільність робочої рідини; V_3 – швидкість руху заслінки із якорем електромагніту ($\frac{dx}{dt} = V_3$); d_C – діаметр сопла; p_1 – тиск в міждрісельній камері елемента сопло-заслінка.

В диференційному рівнянні (2) складова ($k_I \cdot I$) характеризує зусилля пропорційного електромагніту, якому протидіє зусилля пружини ($c_E \cdot x$), сила тертя, що визначається за емпіричною формулою поданою в [7] ($\left(\frac{1,8}{0,47 + \nu} + 1 \right) \cdot \rho \cdot \nu \cdot V_3$), статич-

не зусилля тиску робочої рідини ($\frac{\pi \cdot d_C^2}{4} \cdot p_1$). В роботі [8] вказується, що силою швидкісного напору струменя робочої рідини на заслінку можна знехтувати.

Оскільки в подальшому електрогідравлічний слідкуючий привод, розрахункова схема котрого показана на рис. 1, буде конструктивно виконано у вигляді компактного мехатронного модуля, гідравлічним опором каналів між електрогідравлічними перетворювачами та порожнинами гідроциліндру можна знехтувати. Таким чином тиск в поршневій порожнині гідроциліндру прийемо рівним p_1 , а в штоковій – p_2 .

Рівняння нерозривності для поршневої порожнини:

$$\frac{dp_1}{dt} \cdot \frac{W_{II}}{E} = \mu_{ДР} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ДР}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{НОМ} - p_1|}{\rho}} - \mu_{С-З} \cdot \pi \cdot d_C \cdot (\delta - x) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_1 - p_{ЗЛ}|}{\rho}} - \frac{\pi \cdot d_{Ц}^2}{4} \cdot V_{II} \quad (3)$$

де W_{II} – об'єм поршневої порожнини гідроциліндру; E – об'ємний модуль пружності робочої рідини; $\mu_{ДР}$ – коефіцієнт витрати вхідного дроселя; $d_{ДР}$ – діаметр вхідного дроселя; $p_{НОМ}$ – номінальний тиск гідросистеми; $\mu_{С-З}$ – коефіцієнт витрати елементу сопло-заслінка; δ – максимальна відстань, на яку може відійти заслінка від торця сопла; $p_{ЗЛ}$ – тиск у зливній магістралі; $d_{Ц}$ – діаметр циліндру; V_{II} – швидкість руху поршня зі штоком гідроциліндру.

Об'єм поршневої порожнини гідроциліндру є змінною величиною та дорівнює:

$$W_{II} = \frac{\pi \cdot d_{Ц}^2 \cdot (y + 0,01)}{4} \quad (4)$$

де y – координата положення поршня зі штоком.

В роботі [8] зазначається, що довжина робочого ходу заслінки має становити близько $\frac{1}{5} \cdot d_C$, тому величину δ потрібно обирати дещо більшою ніж $\frac{1}{5} \cdot d_C$.

Динаміку руху поршня зі штоком навантаженим корисною масою m визначає диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \cdot m_{II.ПР} = \frac{\pi \cdot d_{Ц}^2}{4} \cdot p_1 - \frac{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2)}{4} \cdot p_2 - F \quad (5)$$

де $d_{Ш}$ – діаметр штока гідроциліндру; p_2 – тиск у штоковій порожнині гідроциліндру; $m_{II.ПР}$ – приведена маса поршня, штока та корисного інерційного навантаження m ; F – корисне силове навантаження на штоку гідроциліндру.

Силою тертя між поршнем і корпусом гідравлічного циліндру можна знехтувати, оскільки вона значно менша ніж сила корисного навантаження та зусилля, що створюється перепадом тисків в порожнинах гідроциліндру.

Рівняння нерозривності для штокової порожнини гідроциліндру матиме вигляд:

$$\frac{dp_2}{dt} \cdot \frac{W_{III}}{E} = \mu_{ДР} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ДР}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{НОМ} - p_2|}{\rho}} - \mu_{С-3} \cdot \pi \cdot d_C \cdot \delta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_2 - p_{3Л}|}{\rho}} + \frac{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2)}{4} \cdot V_{II}, \quad (6)$$

де W_{III} – об'єм штокової порожнини гідроциліндру, який дорівнює:

$$W_{III} = \frac{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2) \cdot (l - y)}{4}, \quad (7)$$

де l – довжина робочого ходу поршня зі штоком; y – координата їх положення.

Диференційні рівняння (1), (2), (3), (5), (6) приведемо до форми Коши та запишемо у вигляді системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (U - I \cdot R); \\ \frac{dV_3}{dt} = \frac{1}{m_{3,ПР}} \cdot (k_I \cdot I - c_E \cdot x - (\frac{1,8}{0,47 + v} + 1) \cdot \rho \cdot v \cdot V_3 - \frac{\pi \cdot d_C^2}{4} \cdot p_1); \\ \frac{dx}{dt} = V_3; \\ \frac{dp_1}{dt} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot d_{Ц}^2 \cdot (y + 0,01)} \cdot (\mu_{ДР} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ДР}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{НОМ} - p_1|}{\rho}} - \mu_{С-3} \cdot \pi \cdot d_C \cdot (\delta - x) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_1 - p_{3Л}|}{\rho}} - \frac{\pi \cdot d_{Ц}^2}{4} \cdot V_{II}); \\ \frac{dV_{II}}{dt} = \frac{1}{m_{II,ПР}} \cdot (\frac{\pi \cdot d_{Ц}^2}{4} \cdot p_1 - \frac{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2)}{4} \cdot p_2 - F); \\ \frac{dy}{dt} = V_{II}; \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2) \cdot (l - y)} \cdot (\mu_{ДР} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ДР}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{НОМ} - p_2|}{\rho}} - \mu_{С-3} \cdot \pi \cdot d_C \cdot \delta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_2 - p_{3Л}|}{\rho}} + \frac{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2)}{4} \cdot V_{II}). \end{array} \right. \quad (8)$$

Система (8) має всі властивості математичної моделі, кількість змінних ($I, V_3, x, p_1, V_{II}, y, p_2$) дорівнює кількості диференціальних рівнянь, t є незалежною змінною.

При розробці математичної моделі були прийняті наступні припущення, а саме: опір гідравлічних каналів вкрай малий, хвильові процеси практично відсутні, номінальний тиск гідросистеми $p_{НОМ}$ на вході модуля постійний, тепловий режим роботи приводу усталений.

Система (8) описує динаміку мехатронного модуля при русі поршня в напрямку показаному на рис. 1, що досягається за рахунок зміни тиску p_1 в поршневій порожнині гідроциліндру. Рух поршня зі штоком в протилежному вказаному на рис. 1 напрямку досягається шляхом керування тиском p_2 у штоковій порожнині гідроциліндру. Модифікуємо систему диференціальних рівнянь (8) так, щоб вона описувала цей процес:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (U - I \cdot R); \\ \frac{dV_3}{dt} = \frac{1}{m_{3,ПП}} \cdot (k_I \cdot I - c_E \cdot x - (\frac{1,8}{0,47 + v} + 1) \cdot \rho \cdot v \cdot V_3 - \frac{\pi \cdot d_C^2}{4} \cdot p_2); \\ \frac{dx}{dt} = V_3; \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2) \cdot (y + 0,01)} \cdot (\mu_{ДР} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ДР}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{НОМ} - p_2|}{\rho}} - \\ - \mu_{С-3} \cdot \pi \cdot d_C \cdot (\delta - x) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_2 - p_{3Л}|}{\rho}} - \frac{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2)}{4} \cdot V_{П}); \\ \frac{dV_{П}}{dt} = \frac{1}{m_{П,ПП}} \cdot (\frac{\pi \cdot (d_{Ц}^2 - d_{Ш}^2)}{4} \cdot p_2 + F - \frac{\pi \cdot d_{Ц}^2}{4} \cdot p_1); \\ \frac{dy}{dt} = V_{П}; \\ \frac{dp_1}{dt} = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot d_{Ц}^2 \cdot (l - y)} \cdot (\mu_{ДР} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ДР}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{НОМ} - p_1|}{\rho}} - \\ - \mu_{С-3} \cdot \pi \cdot d_C \cdot \delta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_1 - p_{3Л}|}{\rho}} + \frac{\pi \cdot d_{Ц}^2}{4} \cdot V_{П}); \end{array} \right. \quad (9)$$

При підготовці системи (9), позитивний напрямок руху поршня зі штоком приймався зворотним ніж показано на рис. 1.

Методи, початкові умови, конструктивні та функціональні параметри, при яких проводилося математичне моделювання

Динамічні характеристики отримані шляхом численного інтегрування систем (8) та (9) диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутти із кроком $4 \cdot 10^{-6}$ с. Діапазон незалежної змінної – часу приймався від 0 до 0,04 с. Початкові значення змінних були наступними: $I = 0,5A$, $V_3 = 0$, $x = 0$, $p_1 = 0,2 \cdot p_{НОМ}$, $V_{П} = 0$, $y = 0$, $p_2 = 0,2 \cdot p_{НОМ}$.

Значення варійованих параметрів наступні: $L = 0,08Гн$, $R = 16Ом$, $m_{3,ПП} = 0,1кг$, $k_I = 96,67 \frac{H}{A}$, $c_E = 8 \cdot 10^4 \frac{H}{м}$, $v = 0,2Ст$, $\rho = 900 \frac{кг}{м^3}$, $d_C = 3 \cdot 10^{-3} м$, $E = 1700 \cdot 10^6 Па$,

$d_{Ц} = 0,08 м$, $d_{Ш} = 0,036 м$, $\mu_{ДР} = 0,6$, $d_{ДР} = 3 \cdot 10^{-3} м$, $p_{НОМ} = 16 \cdot 10^6 Па$, $\rho = 900 \frac{кг}{м^3}$,
 $\mu_{С-3} = 0,62$, $\delta = 6 \cdot 10^{-4} м$, $p_{ЗЛ} = 0$, $m_{П.ПР} = 20 кг$, $F = 2 \cdot 10^4 Н$, $l = 0,2 м$.

Вхідним ступінчастим впливом є напруга, її значення становило $U = 24 В$.

Характеристики перехідних процесів мехатронного модуля поступального руху, побудованого на основі елементів сопло-заслінка та пропорційних електромагнітів

На рис. 2 представлені графіки змін тиску в порожнинах гідроциліндру під час перехідного процесу. Якщо не зважати на незначні коливання тиску на початку перехідного процесу, його можна вважати близьким до аперіодичного.

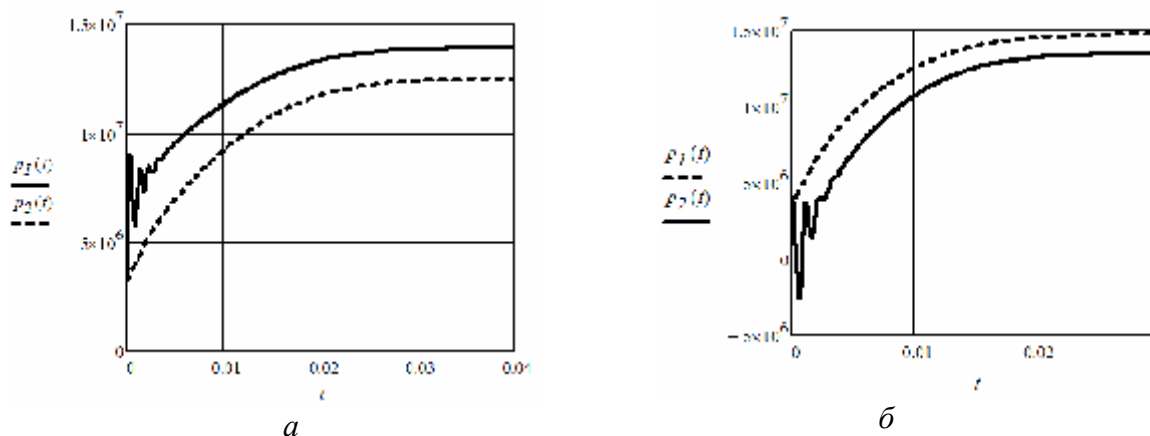


Рис. 2. Динаміка тиску в поршневій та штоковій порожнинах: а – при прямому русі поршня; б – при зворотному русі поршня

На рис. 3 динаміка швидкості руху та положення заслінки із якорем пропорційного електромагніту. Коливання швидкості руху заслінки присутні, тим не менш процес зміни положення заслінки носить аперіодичний характер. Графіки представлені на рис. 4 найбільш важливі, оскільки характеризують поведінку вихідної ланки системи – штока гідроциліндру. Коливання швидкості руху поршня зі штоком гідроциліндра тривають незначний час, після чого настає стабілізація швидкості на усталеному рівні. Зміна положення поршня зі штоком носить практично лінійний характер, незважаючи на коливання швидкості на початку перехідного процесу.

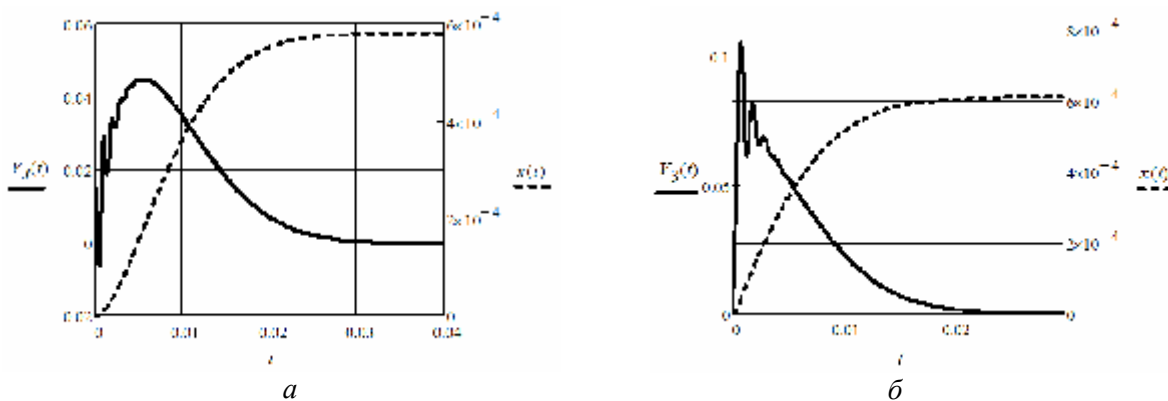


Рис. 3. Динаміка швидкості руху та положення заслінки із якорем пропорційного електромагніту: а – при прямому русі поршня; б – при зворотному русі поршня

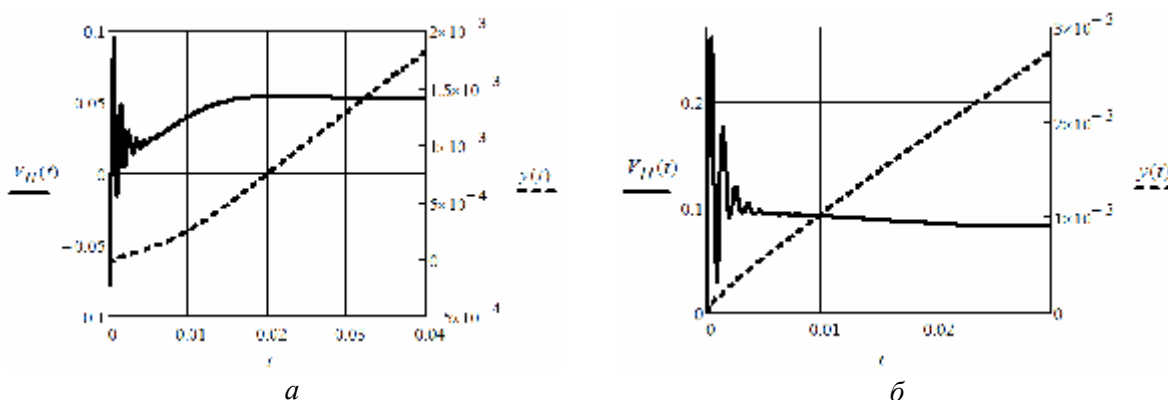


Рис. 4. Динаміка швидкості руху та положення поршня зі штоком: а – при прямому русі поршня; б – при зворотному русі поршня

Висновки та перспективи подальших досліджень. Мехатронний модуль поступального руху створений на основі елементів сопло-заслінка нормально-відкритого типу та пропорційного електромагніту [2] із покращеною тяговою характеристикою має високу якість перехідних процесів. Знайшло підтвердження припущення про те, що пропорційний електромагніт [2] дозволить керувати елементами сопло-заслінка із значним діаметром сопла. В результаті вперше запропонована схема електрогідравлічного слідкуючого приводу, в якому елемент сопло-заслінка виступає у якості першого каскаду підсилення. Однак при значному діаметрі сопла основний недолік цього елемента, а саме непродуктивна витрата робочої рідини, стає дуже істотним.

З огляду на вищесказане перспективним вбачається побудова мехатронних модулів поступального руху на основі елементів сопло-заслінка нормально-закритого типу [1], які виключають непродуктивну витрату робочої рідини у відсутності сигналу керування. Однак в такому випадку відкритим залишається питання про вплив зворотного клапану, встановленого послідовно елементу сопло-заслінка, на динамічні характеристики приводу. Отже серед найближчих перспектив досліджень в даному напрямку потрібно визнати створення нелінійної об'єктно-орієнтованої моделі такого мехатронного модуля із подальшим її рішенням методом Рунге-Кутти при ідентичних вказаних в цій статті початкових умовах, конструктивних та функціональних параметрах. Такий підхід дасть можливість коректно порівняти динамічні характеристики двох схем мехатронних модулів.

Література: 1. Пат. 76766 Україна, МПК (2006) F15B 3/00. Електрогідравлічний підсилювач / Скворчевський О.Є.; заявник та патентовласник Скворчевський О.Є. – № 2004021138 ; заявл. 17.02.04 ; опубл. 15.09.06, Бюл. № 9. 2. Пат. 75780 Україна, МПК (2006) H01F 7/08. Пропорційний електромагніт / Скворчевський О.Є.; заявник та патентовласник Скворчевський О.Є. – 20040705646 ; заявл. 12.07.04 ; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5. 3. Скворчевський О.Є. Математичне моделювання статичних робочих процесів електрогідравлічних перетворювачів нормально-закритого типу / О.Є. Скворчевський // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – № 45. – С. 48-54. 4. Скворчевський О.Є. Експериментальні дослідження статичних робочих процесів електрогідравлічного перетворювача нормально-закритого типу / О.Є. Скворчевський // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – №2. – С. 43-51. 5. Скворчевський О.Є. Аналітичний огляд сучасних методів математичного комп'ютерного моделювання робочих процесів електрогідравлічних систем та агрегатів/ О.Є. Скворчевський // Вісник НТУ «ХПІ»: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – № 34. – С. 71-79. 6. Харазов К.И. Электромагнитные устройства авиационной электроавтоматики. / Харазов К.И. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с. 7. Данилов Ю.А. Аппаратура объемных гидроприводов. Рабочие процессы и характеристики / Данилов Ю.А., Кирилловский Ю.Л., Колпаков Ю.Г. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с. 8. Баишта Т.М. Гидравлические приводы летательных аппаратов. Изд. 4-е перераб. И доп. / Баишта Т.М. – М.: Машиностроение, 1967. – 495 с.

Bibliography (transliterated): 1. Pat. 76766 Ukraina, MPK (2006) F15V 3/00. Elektrogidravlichnij pidsiljuvach / Skvorchevs'kij O.Є.; zajavnik ta patentovlasnik Skvorchevs'kij O.Є. – № 2004021138 ; zajavl. 17.02.04 ; opubl. 15.09.06, Bjul. № 9. 2. Pat. 75780 Ukraina, MPK (2006) N01F 7/08. Proporcijnij elektromagnit / Skvorchevs'kij O.Є.; zajavnik ta patentovlasnik Skvorchevs'kij O.Є. – 20040705646 ; zajavl. 12.07.04 ; opubl. 15.05.06, Bjul. № 5. 3. Skvorchevs'kij O.Є. Matematichne modeljuvannja statichnih robochih procesiv elektrogidravlichnih peretvorjuvachiv normal'no-zakritogo tipu / O.Є. Skvorchevs'kij // Visnik NTU «HPI». Tematichnij vipusk: Novi rishennja u suchasnih tehnologijah. – Harkiv: NTU «HPI» – 2011. – № 45. – S. 48-54. 4. Skvorchevs'kij O.Є. Eksperimental'ni doslidzhennja statichnih robochih procesiv elektrogidravlichnogo peretvorjuvacha norma-l'no-zakritogo tipu / O.Є. Skvorchevs'kij // Mehanika ta mashinobuduvannja. Naukovo-tehnicnij zhurnal. – Harkiv: NTU «HPI», 2011. – №2. – S. 43-51. 5. Skvorchevs'kij O.Є. Analitichnij ogljad suchasnih metodiv matematichnogo komp'juternogo modeljuvannja ro-bochih procesiv elektrogidravlichnih sistem ta agregativ/ O.Є. Skvorchevs'kij // Visnik NTU «HPI»: Novi rishennja u suchasnih tehnologijah. – Harkiv: NTU «HPI» – 2011. – № 34. – S. 71-79. 6. Harazov K.I. Jelektromagnitnyeustrojstva-viacionnojjelektroavtomatiki. / Harazov K.I. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 192 s. 7. Danilov Ju.A. Apparatura ob#emnyh gidroprivodov. Rabochie processy i harakteri-stiki / Danilov Ju.A., Kirillovskij Ju.L., Kolpakov Ju.G. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 272 s. 8. Bashta T.M. Gidravlicheskie privody letatel'nyh apparatov. Izd. 4-e pererab. I dop. / Bashta T.M. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 495 s.

Скворчевський О.Є.

НЕЛІНІЙНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ, ПОБУДОВАНОГО НА ОСНОВІ ЕЛЕМЕНТІВ СОПЛО-ЗАСЛІНКА ТА ПРОПОРЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ

Метою статті є отримання динамічних характеристик мехатронного модуля поступального руху, побудованого на основі елементів сопло-заслінка та пропорційних електромагнітів із покращеною тяговою характеристикою. Поставлена мета реалізована шляхом розробки та чисельного інтегрування нелінійної математичної моделі. В результаті досліджень була підтверджена можливість досягнення динамічних характеристик високої якості для зазначеного мехатронного модуля поступального руху.

Скворчевский А.Е.

НЕЛИНЕЙНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ СОПЛО-ЗАСЛОНКА И ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Целью статьи является получение динамических характеристик мехатронного модуля поступательного движения, построенного на основе элементов сопло-заслонка и пропорциональных электромагнитов с улучшенной тяговой характеристикой. Поставленная цель реализована путем разработки и численного интегрирования нелинейной математической модели. В результате исследований была подтверждена возможность достижения высококачественных динамических характеристик для указанного мехатронного модуля поступательного движения.

Skvorchevsky A.Y.

NONLINEAR MATHEMATICAL SIMULATION OF THE DYNAMIC BY MECHATRONIC MODULE INCLUSIVE ELEMENTS OF THE NOZZLE-FLAP AND PROPORTIONAL ELECTROMAGNETS

This research aim is to obtain the dynamic characteristics of linear movement mechatronic module inclusive elements of the nozzle-flap and proportional electromagnets with improvement traction characteristics. This aim was achieved by nonlinear mathematical simulation. The studies confirmed the possibility to achieve high quality dynamic performance for a given mechatronic module of forward motion.