

УДК 62-82

П.М. АНДРЕНКО, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХП»;
О.В. ДМИТРІЄНКО, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХП»

ДИНАМІЧНИЙ СИНТЕЗ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ РУХУ

Запропоновано схемне рішення електрогідравлічного мехатронного модуля лінійного переміщення. Розроблено повну математичну модель його робочого процесу та методику динамічного синтезу, яка дозволяє поліпшити його динамічні властивості та отримати бажані характеристики. Встановлено взаємозв'язок між параметрами переміщення вихідної ланки виконавчого механізму мехатронного модуля руху і струмом керування пропорційного електромагніту гідророзподільника.

Ключові слова: мехатронний модуль, математична модель, динамічний синтез, пропорційний електромагніт, гідророзподільник.

Вступ

Завдяки відомим своїм перевагам, таким як малий об'єм і маса на одиницю потужності; простота плавного регулювання швидкості, зусиль та захист від перевантажень; мала інерційність виконавчих механізмів; можливість створення мехатронних модулів і складних систем регулювання тощо, об'ємні гідроприводи знайшли широке застосування у сучасному технологічному обладнанні та мобільних машинах. За даними статті [1] прогнозований річний приріст світового виробництва гідрообладнання до 2020 року становитиме 6,5%. Однією з основних тенденцій розвитку сучасних гідроприводів є інтенсивне зрощування гідроприводів з електронними системами керування, застосування "інтелектуальних" гідроапаратів з вбудованою електронікою та стандартними комунікаційними засобами з відкритою структурою [2]. При цьому найбільш інтенсивний розвиток отримали дроселюючі гідророзподільники та гідроапарати з пропорційним електричним керуванням, особливо з вбудованою системою контролю і керування. Фірми *Rexroth*, *Parker Hannifin*, *Moog* та інші розробили проміжні апарати між вказаними типами, а саме апарати з пропорційним електричним керуванням, запірно-регулюючий елемент (ЗРЕ) яких має нульове перекриття та можливість встановлення дроселюючого гідророзподільника у першому каскаді, що дозволило на порядок поліпшити їх динамічні характеристики [2], характеристики мехатронних модулів побудованих з їх використанням. Таким чином, перспективний електрогідравлічний мехатронний модуль руху крім електричного блоку керування і гідравлічного виконавчого механізму повинен містити гідророзподільник з пропорційним електричним керуванням з нульовим перекриттям, встановленим у першому каскаді, безпосередньо біля виконавчого механізму.

Аналіз літературних джерел

Питання розрахунку та проектування мехатронних модулів руху розглянуто в досить невеликій кількості наукових робіт [3–7]. В роботах [3, 4] наведено схеми мехатронних модулів руху, принципи їх побудови та тенденції розвитку мехатронних систем. В статті [5] наведена математична модель робочого процесу мехатронного модуля руху з регулятором витрат та дроселем. Проте, в [3–5] не розглядаються питання синтезу мехатронних модулів та їх складових. Робота [6] присвячена розробці математичних моделей робочого процесу мехатронних систем та їх структурних елементів. В ній наведені методики синтезу елементів таких систем. Однак, в цій роботі

розглядаються виключно мехатронні модулі руху побудовані на електричних елементах. В роботі [7] описано нову концепцію моделювання і проектування мехатронних систем з пристроями гідравтоматики, які розкривають механізм формування системи та їх моделей, що відображає закономірності процесу функціонування, будови і властивості об'єкта. Однак, в даній роботі не розглядається мехатронний модуль руху з пропорційним гідророзподільником з нульовим перекриттям, встановленим у першому каскаді. Зазначимо, що роботи [6, 7] є підґрунтям динамічного синтезу мехатронних модулів руху та їх елементів.

Проведений нами аналіз літературних джерел дозволив встановити, що динамічний синтез мехатронного модуля руху з пропорційним гідророзподільником з нульовим перекриттям, встановленим у першому каскаді, не знайшло в них належного висвітлення. Отже динамічний синтез такого мехатронного модуля руху є актуальним науковим завданням, вирішення якого дозволить поліпшити динамічні характеристики останнього. Метою даної статті є розробка методики динамічного синтезу електрогідравлічного мехатронного модуля руху.

Динамічний синтез електрогідравлічного мехатронного модуля руху

Динамічний синтез такого модуля проводили, використовуючи математичну модель його робочого процесу, див. рис.

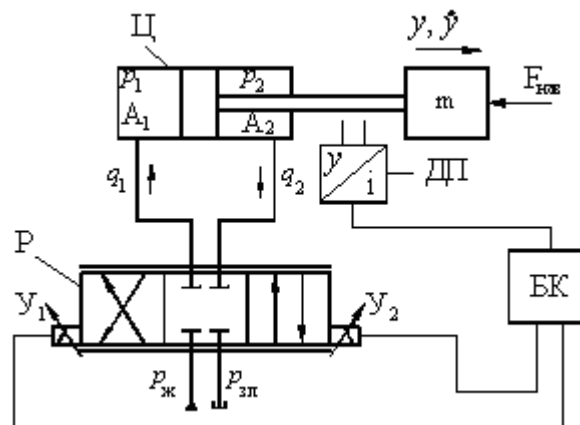


Рис. – Розрахункова схема електрогідравлічного мехатронного модуля руху з пропорційним гідророзподільником: P – пропорційний гідророзподільник; Ц – гідроциліндр; ДП – датчик переміщень; БК – блок керування; U_1, U_2 – пропорційні електромагніти

При розробці математичної моделі електрогідравлічного мехатронного модуля руху, з врахуванням його блочно модульної компоновки та параметрів гідророзподільника, приймали наступні припущення:

- гідророзподільник – ідеальний: його перекриття нульове; гідравлічні провідності G_1 і G_2 , а також G_3 і G_4 , утворені дроселюючими кромками, при рівних значеннях переміщення ЗРЕ однакові; радіальний зазор, перетоки робочої рідини (PP) і опір внутрішніх каналі настільки малий, що їм можна знехтувати;

- пружини гідророзподільника мають малу жорсткість та працюють у межах, де їх характеристики лінійні і не відбувається відрив їх кінців від поверхонь контакту, що дозволяє знехтувати силою від їх дії на ЗРЕ;

- корпуса гідроциліндра, гідророзподільника, каналів та трубопроводів абсолютно жорсткі, а їх пружні властивості враховуються приведеним модулем об'ємної пружності PP;

– довжина трубопроводів мала, а їх діаметр у порівнянні з довжиною великий, що дозволяє знехтувати хвильовими процесами, які відбуваються в них. Нехтуємо також початковими ділянками трубопроводів. Товщина стінок трубопроводів та каналів достатньо велика, це дозволяє вважати, що їх діаметр не залежить від внутрішнього тиску РР;

– у мехатронному модулі руху відсутні: витоки та перетоки, кавітація, гідравлічний удар і виконується умова нерозривності РР. Швидкість звуку в РР, з урахуванням пружних властивостей трубопроводів, є сталою та значно більшою за швидкість руху РР;

– РР – ньютонівська, а її течія ізотермічна.

При прийнятих припущеннях математична модель робочого процесу мехатронного модуля руху складається з рівнянь:

– руху штока гідроциліндра разом з приведеними до нього масами рухомих частин

$$m\ddot{y} = A_1 p_1(t) - A_2 p_2(t) - F_{\text{тер}}(t) - F_{\text{нав}}(t); \quad (1)$$

– витрати РР в правій і лівій порожнині гідроциліндра

$$\left. \begin{aligned} q_1(t) &= A_1 \dot{y} + \frac{W_{\text{пор}} + A_1 \dot{y}}{E_{\text{пр}}} \frac{dp_1(t)}{dt} \\ q_2(t) &= A_2 \dot{y} - \frac{W_{\text{шт}} - A_2 \dot{y}}{E_{\text{пр}}} \frac{dp_2(t)}{dt} \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

– руху ЗРЕ гідророзподільника

$$m_{\text{ЗРЕ}} \ddot{x}_{\text{ЗРЕ}} = F_{\text{ем ГР}}(t) - F_{\text{тер ЗРЕ}}(t) - F_{\text{гд ЗРЕ}}(t); \quad (3)$$

– витрати РР через дроселюючі щілини гідророзподільника

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{ГР1}}(t) &= q_{\text{щ1}}(t) - q_{\text{ст1}}(t) + q_{\text{осц1}}(t) \\ q_{\text{ГР2}}(t) &= q_{\text{щ2}}(t) - q_{\text{ст2}}(t) + q_{\text{осц2}}(t) \end{aligned} \right\}; \quad (4)$$

– обмеження переміщень поршня гідроциліндра і ЗРЕ гідророзподільника

$$y < y(t) \leq y_{\text{max}} \quad \text{і} \quad x_{\text{ЗРЕ}} < x_{\text{ЗРЕ}}(t) \leq x_{\text{ЗРЕ max}}; \quad (5)$$

– зміни стану РР

$$T_a = \text{const}, \rho(t). \quad (6)$$

В рівняннях (1)–(6): m – маса штока гідроциліндра разом з приведеними до нього масами рухомих частин; y – переміщення штока гідроциліндра; A_1 і A_2 – відповідно площі безштокової і штокової порожнин гідроциліндра; $p_1(t)$ і $p_2(t)$ –

відповідно тиск у без штоковій і штоковій порожнинах гідроциліндра; t – час; $F_{\text{тер}}(t)$ і $F_{\text{нав}}(t)$ – відповідно сили тертя, яку розраховуємо згідно залежності зі статті [8], і сила зовнішнього навантаження; $W_{\text{пор}}$ і $W_{\text{шт}}$ – відповідно об’єми безштокової і штокової порожнин гідроциліндра; $E_{\text{пр}}$ – приведений модуль об’ємної пружності РР, у якому модуль об’ємної пружності РР з врахуванням вмісту повітряної фази, тиску та температури визначали за формулою з статті [9]; $m_{\text{ЗРЕ}}$ – маса ЗРЕ гідророзподільника разом з приведеними до нього масами рухомих частин; $x_{\text{ЗРЕ}}$ – переміщення ЗРЕ гідророзподільника; $F_{\text{емГР}}(t)$, $F_{\text{терЗРЕ}}(t)$ і $F_{\text{гдЗРЕ}}(t)$ – відповідно сили пропорційного електромагніта гідророзподільника, тертя ЗРЕ і гідродинамічна, що діє на ЗРЕ; $q_{\text{щ1}}(t)$ і $q_{\text{щ2}}(t)$, $q_{\text{ст1}}(t)$ і $q_{\text{ст2}}(t)$, $q_{\text{осц1}}(t)$ і $q_{\text{осц2}}(t)$ – відповідно витрати через 1 і 2 дроселюючі щілини, стиску РР в правій і лівій порожнинах гідророзподільника, осциляції в дроселюючих щілинах гідророзподільника; T_a – температура РР, яку приймали постійною, рівною її середньому значенню; $\rho(t)$ – густина РР, яку визначали за формулою з статті [9].

Зазначимо, що сила тертя ЗРЕ $F_{\text{терЗРЕ}}(t)$ і гідродинамічна $F_{\text{гдЗРЕ}}(t)$ гідророзподільника у загальному випадку є функціями переміщення та швидкості переміщення його ЗРЕ $F_{\text{терЗРЕ}}(t) = F_{\text{терЗРЕ}}(x_{\text{ЗРЕ}}, \dot{x}_{\text{ЗРЕ}})$ і $F_{\text{гдЗРЕ}}(t) = F_{\text{гдЗРЕ}}(x_{\text{ЗРЕ}}, \dot{x}_{\text{ЗРЕ}})$, що треба мати на увазі при розв’язку рівняння (3). Сила пропорційного електромагніта гідророзподільника містить осциляційну складову, яка надає осциляцію ЗРЕ, мала у порівнянні з силою керування ЗРЕ і швидкість зміни якої в часі щонайменше на два порядки більша від першої. Розрахунок цієї сили проводили за залежностями, наведеними у роботі [10]. З урахуванням вищесказаного, сили $F_{\text{терЗРЕ}}(t)$ і $F_{\text{гдЗРЕ}}(t)$, з врахуванням осциляції ЗРЕ гідророзподільника, розраховували за залежностями, наведеними у статтях [11] і [12].

Розглядали мехатронний модуль руху з сервоциліндром *AZP* фірми *Atos*, одного з світових лідерів виробництва електрогідравліки. Проводили оцінку витрати стиску та осциляції, які входять до рівнянь (2) і (4), у порівнянні з витратою через дроселюючу щілину пропорційного гідророзподільника. Розрахунки показали, що при нехтуванні вище вказаними витратами похибка не перевищить 1 %. З урахуванням вищевказаного та відомої формули, витрати через дросель, який керує, ідеального гідророзподільника рівняння (2) і (4) запишемо у наступному вигляді:

$$q_1(t) = A_1 \dot{y}, \quad q_2(t) = A_2 \dot{y}; \quad (7)$$

$$q_{\text{гп1}}(t) = q_{\text{щ1}}(t) = G(x_{\text{ЗРЕ}}) \sqrt{p_{\text{ж}} - p_1(t)}; \quad q_{\text{гп2}}(t) = q_{\text{щ2}}(t) = G(x_{\text{ЗРЕ}}) \sqrt{p_2(t) - p_{\text{зл}}}, \quad (8)$$

де $p_{\text{ж}}$ і $p_{\text{зл}}$ – відповідно тиск живлення і зливу; $G(x_{\text{ЗРЕ}})$ – гідравлічна провідність дроселюючої щілини гідророзподільника при зміщенні ЗРЕ на $x_{\text{ЗРЕ}}$, яку розраховували за залежністю

$$G(x_{\text{ЗРЕ}}) = \mu_{\text{щ}}(\text{Re}) A_{\text{щ}}(x_{\text{ЗРЕ}}) \sqrt{2/\rho(t)}, \quad (9)$$

де $\mu_{\text{щ}}(\text{Re})$ – коефіцієнт витрати у залежності від числа Рейнольдса, який розраховується за залежністю з роботи [13]; $A_{\text{щ}}(x_{\text{ЗРЕ}})$ – площа дроселюючої щілини гідророзподільника при зміщені ЗРЕ на $x_{\text{ЗРЕ}}$.

Зазначимо, що зазвичай, пропорційні гідророзподільники мають профільовані дроселюючі кромки, площа дроселюючої щілини яких розраховується за різними залежностями, наприклад, такими, як наведені у роботі [10]. Приймали, що $p_{\text{зл}} = 0$ і $p_{\text{ж}} = \text{const}$. З рівнянь (7) і (8) та рівняння нерозривності отримали:

$$A_1 \dot{y} = G(x_{\text{ЗРЕ}}) \sqrt{p_{\text{ж}} - p_1(t)}; \quad A_2 \dot{y} = G(x_{\text{ЗРЕ}}) \sqrt{p_2(t)}. \quad (10)$$

З рівнянь (10) знаходили тиск у порожнинах гідроциліндра

$$p_1(t) = p_{\text{ж}} - \frac{A_1^2 \dot{y}^2}{G^2(x_{\text{ЗРЕ}})}; \quad p_2(t) = \frac{A_2^2 \dot{y}^2}{G^2(x_{\text{ЗРЕ}})}. \quad (11)$$

Підставляючи отримані значення тиску в порожнинах гідроциліндра у рівняння (1) і розв'язуючи його відносно гідравлічної провідності дроселюючої щілини гідророзподільника, отримали

$$G(x_{\text{ЗРЕ}}) = \sqrt{\frac{\dot{y}^2 (A_1^3 + A_2^3)}{A_1 p_{\text{ж}} - m\ddot{y} - F_{\text{тер}}(t) - F_{\text{нав}}(t)}}. \quad (12)$$

З формул (9) і (12) отримали залежність для визначення зміни площі дроселюючої щілини гідророзподільника у залежності від швидкості переміщення штока гідроциліндра

$$A_{\text{щ}}(x_{\text{ЗРЕ}}) = \frac{1}{\mu_{\text{щ}}(\text{Re})} \sqrt{\frac{\dot{y}^2 \rho(t) (A_1^3 + A_2^3)}{2[A_1 p_{\text{ж}} - m\ddot{y} - F_{\text{тер}}(t) - F_{\text{нав}}(t)]}}. \quad (13)$$

Зазначимо, що сила тертя штока гідроциліндра у загальному випадку є функцією швидкості його переміщення $F_{\text{тер}}(t) = F_{\text{тер}}(\dot{y})$, це треба мати на увазі при розв'язку рівняння (13).

Слід зазначити, що конструктивні та робочі параметри гідравлічної частини мехатронного модуля руху, такі як діаметр умовного проходу каналів та трубопроводів, геометричні розміри гідроциліндра і маса його рухомих частин, номінальне значення тиску живлення й інші, вибирають з ряду відповідного ДСТУ. Крім того, стандартизованими є параметри пропорційного електромагніта, а саме залежність сили на його якорі від струму керування.

Методика динамічного синтезу електрогідравлічного мехатронного модуля руху

Для розв'язання поставленої задачі приймали ряд припущень:

– у початковий момент часу ЗРЕ гідророзподільника знаходиться у

нейтральному положенні і швидкість поршня, тиск в порожнинах гідроциліндра та витрата РР дорівнюють нулю;

– вважаємо приведену масу до штока гідроциліндра постійною;

– обмежуємо максимальне значення тиску у штоковій порожнині гідроциліндра

$p_{2 \max} \leq p_2^*$, де p_2^* визначають з умови міцності гідроциліндра.

1 Задаємо початкові умови: $y(0) = y_0$; $\dot{y}(0) = 0$; $\ddot{y}(0) = 0$; $x_{ЗРЕ}(0) = x_{ЗРЕ0}$; $\dot{x}_{ЗРЕ}(0) = 0$; $\ddot{x}_{ЗРЕ}(0) = 0$; $A_{щ}(x_{ЗРЕ0}) = 0$; $q_{щ1}(0) = 0$; $q_1(0) = 0$; $q_{щ2}(0) = 0$; $q_2(0) = 0$ та значення $\rho(t)$ і $\mu_{щ}(Re)$, які на попередньому етапі розрахунку приймали рівними їх середньому значенню під час функціонування модуля руху.

2 У відповідності до заданого алгоритму функціонування мехатронного модуля руху задавали закон руху штока гідроциліндра $y(t) = y_0 + f_y(t)$.

3 Диференціюючи $y(t)$, отримали $\dot{y}(t)$ і $\ddot{y}(t)$. Підставляючи отримані значення $\dot{y}(t)$ і $\ddot{y}(t)$ у рівняння (13), отримали

$$A_{щ}(x_{ЗРЕ}) = A_{щ}(t). \quad (14)$$

4 Підставляючи у (14) вибраний закон зміни площі дроселюючої щілини пропорційного гідророзподільника $A_{щ}(t) = f_A(x_{ЗРЕ})$, отримали $x_{ЗРЕ}(t)$.

5 Диференціюючи значення $x_{ЗРЕ}(t)$, отримали $\dot{x}_{ЗРЕ}$ і $\ddot{x}_{ЗРЕ}$. Підставляючи отримані значення $\dot{x}_{ЗРЕ}$ і $\ddot{x}_{ЗРЕ}$ у рівняння (3) та розв'язуючи його відносно $F_{емГР}(t)$, отримуємо $F_{емГР}(t) = F_{емГР}(x_{ЗРЕ})$.

6 За статичною характеристикою пропорційного електромагніта знаходили $F_{емГР}(x_{ЗРЕ}) = F_{емГР}(i_{керем})$, де $i_{керем}$ – струм керування пропорційного електромагніта.

Таким чином, знайдено взаємозв'язок між параметрами переміщення вихідної ланки виконавчого механізму мехатронного модуля руху, переміщенням ЗРЕ гідророзподільника і струмом керування пропорційного електромагніту. Слід зазначити, що розроблена методика динамічного синтезу мехатронного модуля руху має універсальний характер.

Висновки

Запропоновано схемне рішення перспективного електрогідравлічного мехатронного модуля лінійного переміщення та розроблена повна математична модель його робочого процесу. Розроблена методика динамічного синтезу мехатронного модуля руху, яка дозволяє прискорити створення і впровадження нових та модернізованих модулів з бажаними динамічними та статичними характеристиками. Вперше встановлено взаємозв'язок між параметрами переміщення вихідної ланки виконавчого механізму мехатронного модуля руху, переміщенням ЗРЕ гідророзподільника і струмом керування пропорційного електромагніту.

Список літератури: 1. Свешников, В.К. Где настоящее встречается с будущим. Выставка «Интердрайв-2012» глазами эксперта [Электронный ресурс] / В.К. Свешников. – Режим доступа: <http://www.konstruktor.net/pogrobnee-elekt/items>. 2. Свешников, В.К. Состояние и перспективы развития гидрооборудования стационарных машин [Текст] / В.К. Свешников // Мир Техники и Технологий. – Х.: ООО Издательский дом «Промінь», 2005. – № 11(48). – С. 18-22. 3. Введение в мехатронику [Текст]: учеб. пособие / О.М. Яхно, А.В. Узунов, А.Ф. Луговской и др. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. – 528 с. 4. Подураев, Ю.В. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем [Текст] / Ю.В. Подураев, В.С. Кулешов // Мехатроника. – М.: Машиностроение, 2000. – № 1. – С. 5-10. 5. Лурье, З.Я. Динамика дросельного гидроагрегата с регулятором расхода, нагрузочным дросселем и гидродвигателем прямолинейного движения [Текст] / З.Я. Лурье, И.А. Чекмасова // Вісник НТУ «ХПІ». – 2002. – № 9, Т. 12. – С. 129-135. 6. Герман-Галкин, С.В. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С.В. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА. Век, 2008. – 368 с. 7. Узунов, О.В. Розвиток теорії циклічно-модульного моделювання і проектування мехатронних систем та пристроїв: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.102; захищена 17.01.2012 / Узунов Олександр Васильович; НТУУ «КПІ». – К., 2011. – 39 с. 8. Korzeniewski, R. Identyfikacja sil tarcia w serwonapedzie elektropneumatycznym [Текст] / R. Korzeniewski, J. Pluta // International scientific-technical conference HYDRAULIC AND PNEUMATICS '2005. – Wroclaw, 2005. – P. 283-292. 9. Лурье, З.Я. Исследование рабочего процесса мехатронного гидроагрегата системы смазки металлургического оборудования с учетом характеристик двухфазной жидкости [Текст] / З.Я. Лурье, И.М. Федоренко // MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – 2010. – Vol. 12. – С. 10-25. 10. Андренко, П.М. Проектування і розрахунок елементів та пристрів гідропневмоавтоматики [Текст]: нав. посібник / П.М. Андренко. – К.: УМК ВО, 1990. – 100 с. 11. Лур'є, З.Я. Розрахунок сили тертя на запорно-регулюючому елементі гідроапарата з вібраційною лінеаризацією [Текст] / З.Я. Лур'є, П.М. Андренко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2008. – № 4. – С. 129-137. 12. Лурье, З.Я. Метод расчета гидродинамической силы на осциллирующем запорно-регулирующем элементе гидроаппарата [Текст] / З.Я. Лурье, П.Н. Андренко // Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин: междунар. науч.-технич. конф., 17-19 ноябр. 2010 г.: сборник докладов. – Минск, БНТУ, 2010. – С. 47-53. 13. Данилов, Ю.А. Аппаратура объемных гидроприводов: Рабочие процессы и характеристики [Текст] / Ю.А. Данилов, Ю.Л. Кирилловский, Ю.Г. Колпаков. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

Надійшла до редколегії 17.09.13

УДК 62-82

Динамічний синтез мехатронного модуля руху [Текст] / П.М. Андренко, О.В. Дмитрієнко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 1(1044). – С. 157-163. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-774X.

Предложено схемное решение электрогидравлического мехатронного модуля линейного перемещения. Разработана полная математическая модель его рабочего процесса и методика динамического синтеза, которая позволяет улучшить его динамические свойства и получить желаемые характеристики. Установлена взаимосвязь между параметрами перемещения выходного звена исполнительного механизма мехатронного модуля движения и током управления пропорционального электромагнита гидрораспределителя.

Ключевые слова: мехатронный модуль, математическая модель, динамический синтез, пропорциональный электромагнит, гидрораспределитель.

The schematic of electro-hydraulic mechatronic module of linear movement has been proposed. The complete mathematical model of its working process and the method of the dynamic synthesis have been developed. It allows to improve its dynamic properties and to get the desired characteristics. The correlation between the parameters of movement of the output link of executive mechanism of the mechatronic module of movement and current management of the proportional solenoid of control valve has been established.

Keywords: the mechatronic module, the mathematical model, the dynamic synthesis, the proportional solenoid, the control valve.