

ЦИФРОВА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗРІВНОВАЖЕННЯ НАДЛИШКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ВИРОБНИЧИХ МАШИНАХ

Розроблено алгоритм та побудована цифрова система електромагнітного зрівноваження надлишкових навантажень у виробничих машинах, яка дає можливість суттєво покращити динаміку електромеханічної системи на усьому діапазоні робочих швидкостей машини.

The algorithm has been designed and the digital electromagnetic excess loads balancing system of production machines have been built, which makes it possible to significantly improve the dynamics of the electromechanical system for the entire range of machine operating speeds.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Однією з визначальних у механіці машин є проблема ефективного зрівноваження надлишкових навантажень у виробничих машинах. Основними способами компенсації цих навантажень є застосування зрівноважувальних кулачкових механізмів, в т. ч. у комбінації з пневматичними, пружинними та гідравлічними навантажувачами. Безумовно, використання таких систем зрівноваження надлишкових моментів сприяє покращенню динамічних характеристик поліграфічних машин, але вимагає використання значної кількості додаткових елементів для контролю та регулювання параметрів пружних робочих тіл навантажувачів. Перспективною є розробка навантажувальних пристроїв для зрівноваження надлишкових навантажень, принципово відмінних від кулачкових.

2. АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ТЕМОЮ

Відомі зрівноважувальні пристрої [1,2,3] і механізми з пружинними, а також інерційними навантажувачами не є універсальними. При змінному характері роботи виробничої машини вимагають відповідного їх налагодження, яке складно забезпечити. Регулювання в пружинних навантажувачах тільки величини сили пружності приводить до того, що в певних фазах циклу додається пульсуюча енергія від самого навантажувача, яка зростає із збільшенням відхилення від заданого режиму роботи виконавчого механізму.

⁹ Українська академія друкарства

Інерційні навантажувачі забезпечують зрівноваження надлишкового інерційного навантаження при зміні робочої швидкості лише за умови кінематичного замикання зрівноважувального кулачкового механізму. Крім того, застосування нерегульованих силових навантажувачів зрівноважувальних пристроїв вимагає контролю пускового моменту двигуна і міцності деталей привода як у момент пуску, так і у момент його розгону. При цьому передатні механізми отримують додаткові навантаження, які створюються силовими навантажувачами. У пневмонавантажувачах за рахунок відключення тиску повітря можна усунути дію сил тиску повітря на систему приводу у період пуску машини. До пневмонавантажувачів розроблені пристрої ручного і системи автоматичного регулювання тиску повітря [4,5].

У публікації [6] запропонована мікропроцесорна система автоматичного регулювання тиску в пневмонавантажувачі, яка зрівноважує ударні навантаження на низьких та середніх робочих швидкостях роботи електромеханічної системи.

Забезпечення оптимального режиму роботи виробничих механізмів в усьому діапазоні робочих швидкостей залишається актуальною проблемою і на сьогодні. В даній роботі вирішити цю задачу пропонується шляхом застосування електромагнітного навантажувача з мікроконтролерною системою керування.

3. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗРІВНОВАЖЕННЯ НАДЛИШКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Приводна частина виробничої машини показана на рис.1 у вигляді двигуна Д, який приводиться в рух системою автоматичного регулювання швидкості САР. Обертовий рух від вала двигуна через ремінну передачу з передатним числом i_1 та пружністю C_1 передається головному валу ГВ, який, у свою чергу, через систему зубчатих коліс і валів з передатним числом i_2 та еквівалентною пружністю C_2 приводить в рух робочий орган з моментом інерції J_2 . Основним елементом системи електромагнітного зрівноваження надлишкових навантажень, що виконує обчислення та формує сигнали управління електромагнітною муфтою ЕМ, є мікроконтролер STM32F051. Енкодер Е закріплений на головному приводному валу і виконує функцію давача положення. Його сигнали А і В опрацьовуються блоком таймера TIM2, а сигнал Z – блоком фіксації зміни логічного рівня на зовнішніх виводах INT, які входять до складу обраного контролера. Таймер TIM1 генерує ШІМ сигнал управління комутаційним елементом КЕ, що підсилюється блоком підсилення і гальванічної розв'язки (БПГР). У свою чергу, комутаційний елемент періодично підключає обмотку муфти до лінії

живлення. Враховуючи, що обмотка керування муфтою має значний реактивний опір, струм у ній буде змінюватися плавно, а його величина буде залежати від «шпаруватості» ШІМ сигналу управління. Залежно від величини струму управління змінюватиметься також і гальмівний момент, що створює електромагнітна муфта на приводному валу. Таким чином, знаючи і враховуючи характер зміни надлишкових моментів для даної виробничої машини, можна скомпенсувати надлишкові навантаження. Струм, що проходить через обмотку керування муфтою, вимірюється за допомогою шунта. Напруга, яка знімається з шунта через блок гальванічної розв'язки (БГР), що виконаний на основі лінійної оптопари, поступає на вхід блоку АЦП мікроконтролера. Налаштування та візуалізація параметрів цифрової системи електромагнітного зрівноваження надлишкових навантажень відбувається за допомогою блоку вводу-виводу (БВВ) через послідовний інтерфейс I²C. Крім інформаційної SDA та тактуючої SCL ліній зв'язку, що використовуються інтерфейсом, додано ще одну лінію ENABLE для підтвердження наявності підключеного БВВ. Усі налаштування цифрової системи зберігаються у енергонезалежній пам'яті EEPROM, що з'єднана з мікроконтролером через інтерфейс SPI.

Алгоритм роботи програми керування мікроконтролером представлений на рис. 2. Спочатку відбувається ініціалізація змінних, які використовуються програмою, та налаштування усіх блоків, необхідних для реалізації алгоритму управління. Передусім для задіяних блоків програмно задаються режими роботи: для АЦП – режим безперервних перетворень, таймера TIM1 – режим генерації ШІМ сигналу, INT – генерація переривання при появі фронту імпульсу на контрольованому виводі мікроконтролера, TIM2 – режим опрацювання сигналів енкодера. Якщо не відбулося переривання від блоку INT, то програма переходить у режим налаштувань і енергозбереження; якщо ж воно відбулося, то змінна theta обнулиться (за умови, що ввімкнений режим налаштувань). Таким чином, змінна theta буде вказувати на абсолютний кут повороту приводного валу, бо імпульс на лінії Z з'являється лише один раз за повний оберт енкодера. Далі програма очікує на переривання від системного таймера, за допомогою якого задається частота виконання обчислень. Завдяки, передбаченому розробниками контролера, режиму опрацювання сигналів енкодера для таймера TIM2 можна легко визначити кут, на який повернувся вал (блок 6). Точність обчислення цього кута залежить від роздільної здатності енкодера та частоти виконання обчислень. Якщо умова 7 алгоритму управління (кут повороту валу не змінився, тобто він не обертається), то відбувається перехід у режим налаштувань, що передбачає виконання послідовності блоків 8-12, в протилежному випадку – 13-17.

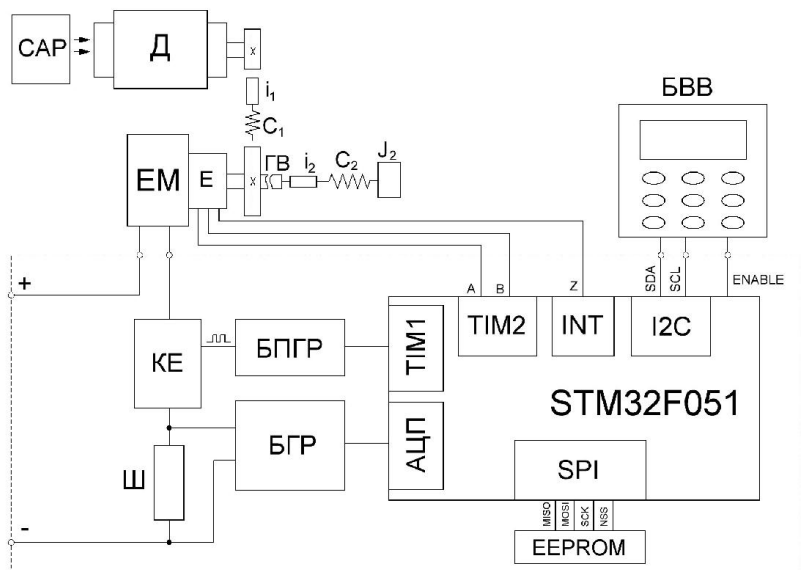


Рис. 1. Функціональна схема цифрової системи електромагнітного зрівноваження надлишкових навантажень

Режим налаштувань характеризується меншим рівнем споживання струму за рахунок відключення модулів контролера, які не використовуються, коли вал не обертається (таймер TIM1, АЦП). За наявності високого логічного рівня на лінії ENABLE, умова 10 виконується – і здійснюється обмін даними між мікроконтролером та блоком вводу-виводу, а одразу після цього отримані дані зберігаються у енергонезалежну пам'ять (блок 12). Послідовність блоків 13-17 виконується лише, коли головний вал обертається. Передусім відбувається вихід з режиму налаштувань, якщо до цього контролер у ньому знаходився. Враховуючи значення виміряного кута повороту, з масиву чисел, попередньо записаного в пам'ять контролера, вибирається елемент для завантаження у регістр порівняння CCR1 таймера TIM1. Елементи цього масиву відповідають значенням зрівноважувальних моментів для кожної позиції повороту валу. Після запису нового значення у регістр CCR1 за допомогою АЦП вимірюється величина струму, що проходить по обмотці керування муфтою i , якщо вона не відповідає очікуваному, то робиться корекція значення регістра порівняння (блоки 16-17 алгоритму).

4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ІЗ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗРІВНОВАЖЕННЯ НАДЛИШКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Із врахуванням функціональної схеми та алгоритму роботи цифрової системи електромагнітного зрівноваження надлишкових навантажень складено її математичну модель.

Для максимального наближення до реальних умов система електромагнітного зрівноваження розглядатиметься разом із приводним двигуном та системою керування ним, в котрій передбачається наявність зворотних зв'язків за швидкістю та струмом, оскільки предметом дослідження є не перехідні процеси, спричинені параметрами двигуна, а ті, що викликані періодичною зміною навантаження, яке і призводить до виникнення надлишкових моментів. Візьмемо за основу добре вивчену математичну модель системи електропривода на базі двигуна постійного струму з підпорядкованим управлінням.

Відомо, що математична модель двигуна постійного струму в операторній формі має такий вигляд [7]:

$$\begin{cases} \omega(s) = \frac{R_a / C^2}{T_M s} (M(s) - M_c(s)); \\ I(s) = \frac{1 / R_a}{T_a s + 1} (U(s) - E(s)); \\ M(s) = C I(s); \\ E(s) = C \omega(s), \end{cases} \quad (1)$$

де U – напруга на якорі двигуна; ω – кутова швидкість вала двигуна; M – момент на валові двигуна; M_c – момент статичного навантаження; T_a – стала часу якоря двигуна; $T_M = JR / C^2$ – електромагнітна стала часу (J – момент інерції якоря двигуна); C – стала двигуна, яка визначається з його номінальних паспортних даних.

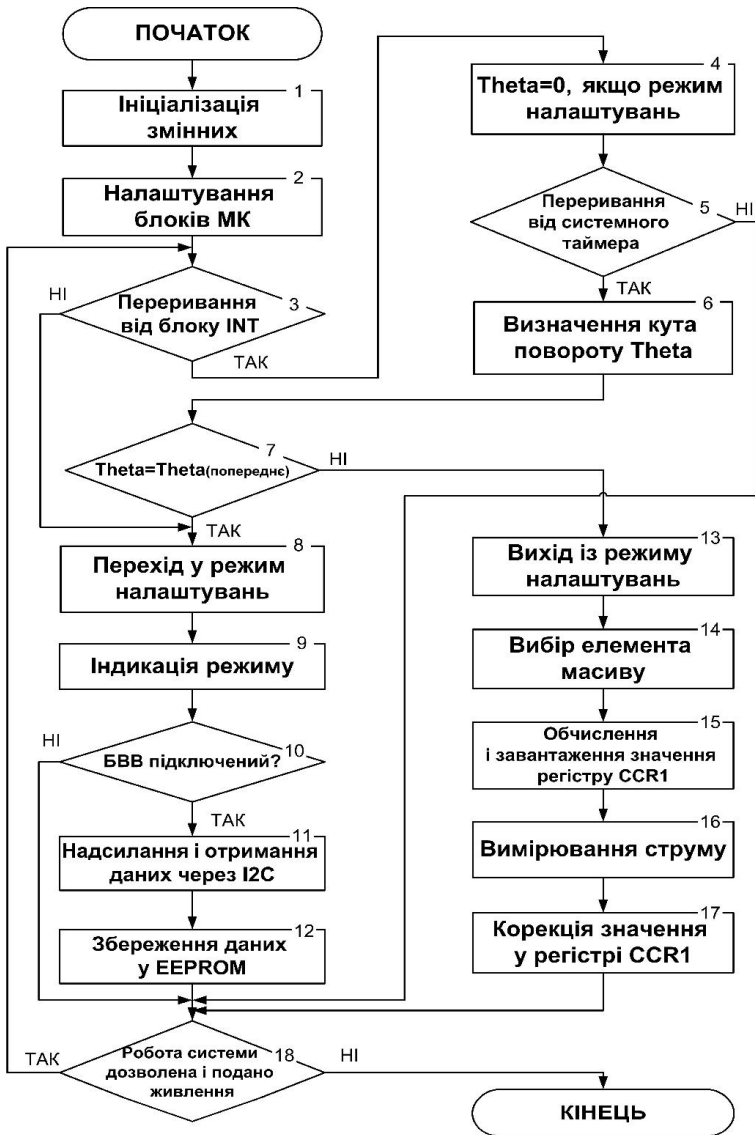


Рис. 2. Алгоритм роботи мікроконтролера цифрової системи електромагнітного зрівноваження

Складовими частинами системи керування двигуном є тиристорний перетворювач ТП, ПІ-регулятор швидкості та ПІ-регулятор струму. Передавальна функція керованого ТП в операторній формі:

$$W_{\alpha'}(s) = \frac{K_I}{T_I s + 1}, \quad (2)$$

де K_I – коефіцієнт підсилення перетворювача за напругою; T_I – стала часу ТП. Коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку за швидкістю обчислюється за виразом $K_{\emptyset} = U_{\zeta\emptyset MAX} / \omega_{U_{\zeta\emptyset MAX}}$, де $U_{\zeta\emptyset MAX}$ – максимальна напруга завдання, а $\omega_{U_{\zeta\emptyset MAX}}$ – відповідне їй значення швидкості на виході системи.

Передавальна функція ПІ-регулятора швидкості в операторній формі:

$$W_{D\emptyset}(s) = K_{P\emptyset} + \frac{1}{T_{D\emptyset} s}, \quad (3)$$

де $K_{P\emptyset}$ і $T_{D\emptyset}$ – коефіцієнт передачі і стала часу ПІ-регулятора швидкості відповідно.

Коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку за струмом $K_C = U_{\zeta C MAX} / I_{U_{\zeta C MAX}}$, де $U_{\zeta C MAX}$ – максимальна напруга на вході регулятора струму, а $I_{U_{\zeta C MAX}}$ – відповідне їй значення струму якоря двигуна.

Передавальна функція ПІ-регулятора струму в операторній формі матиме наступний вигляд:

$$W_{DC}(s) = K_{PC} + \frac{1}{T_{DC} s}, \quad (4)$$

де K_{PC} і T_{DC} – коефіцієнт передачі і стала часу ПІ-регулятора струму відповідно.

При налаштуванні електропривода на технічний оптимум сталі часу інтегрування і передавальні коефіцієнти пропорційних частин ПІ-регуляторів струму і швидкості визначаються за виразами:

$$K_{PC} = \frac{RT_a}{2T_I K_I K_C}, \quad T_{PC} = T_a, \quad K_{P\emptyset} = \frac{T_M C K_C}{4T_I R_a K_{\emptyset}}, \quad T_{P\emptyset} = 8T_I. \quad (5)$$

Враховуючи, що система керування електромагнітним пристроєм для зрівноваження надлишкових сил побудована на основі мікроконтролера, тобто є цифровою, бажаним вважаємо представлення усіх передавальних функцій елементів системи у дискретному вигляді. Щоб отримати дискретні передавальні функції ланок системи автоматичного регулювання та двигуна, використаємо метод Z-перетворення [8]:

$$\omega(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{R_a / C^2}{T_M s^2} (M - M_c) \right\} = \frac{R_a / C^2}{T_M} \cdot \frac{T_0 z}{z-1} (M - M_c);$$

$$I(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{1 / R_a}{s(T_a s + 1)} (U - E) \right\} = \frac{1}{R_a} \left(\frac{e^{(T_0/T_a)} - 1}{e^{(T_0/T_a)} z - 1} \right) (U - E);$$

$$M(z) = CI(z); \quad E(z) = C\omega(z);$$

$$W_{\dot{\alpha}}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{K_I}{s(T_I s + 1)} \right\} = K_I \left(\frac{e^{(T_0/T_I)} - 1}{e^{(T_0/T_I)} z - 1} \right); \quad (6)$$

$$W_{D\theta}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{1}{s} \left(K_{P\theta} + \frac{1}{T_{D\theta} s} \right) \right\} = K_{P\theta} \cdot \left(1 + \frac{T_0 / (8T_I)}{z-1} \right);$$

$$W_{DC}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{1}{s} \left(K_{PC} + \frac{1}{T_{DC} s} \right) \right\} = K_{PC} \cdot \left(1 + \frac{T_0 / T_a}{z-1} \right).$$

де T_0 – стала часу дискретизації системи, значення якої для реальних систем залежить від обчислювальних можливостей мікроконтролера.

Величина зрівноважувального моменту, який створює муфта на валу, залежить від величини притиску P між дисками муфти:

$$M = P k_{\delta\delta} r_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} N_p, \quad (7)$$

де $k_{\delta\delta}$ – коефіцієнт тертя (залежить від матеріалу поверхонь тертя та швидкості обертання валу); $r_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ – ефективний радіус тертя ($r_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = (r_0 + r_1) / 2$, r_0 і r_1 – зовнішній та внутрішній радіуси фрикційного кільця муфти відповідно); N_p – число поверхонь тертя (для багатодискових муфт).

В свою чергу сила притиску описується залежністю, виведеною з рівнянь Максвелла та Біо-Савара:

$$P = \mu_*^2 \mu_0 \frac{I^2 w^2 S_\delta}{8r^2}, \quad (8)$$

де μ_0 – магнітна проникність повітря/вакууму ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \tilde{A}i / i$); μ_* – відносна магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлений магнітопровід; w та r – кількість витків та

середній радіус обмотки муфти відповідно; S_δ – площа перерізу магнітопроводу; I – струм в обмотці керування муфтою.

Однак управління муфтою здійснюється шляхом зміни напруги U_k , що подається на обмотку керування, тому, враховуючи характер зміни струму у електричному колі з індуктивним навантаженням та рівності (7) і (8), отримаємо спрощену передавальну функцію електромагнітної фрикційної муфти:

$$M(s) = k_{\delta\delta} r_{\delta\delta} N_p \cdot \mu_*^2 \mu_0 \frac{w^2 S_\delta}{8r^2} \cdot \frac{U_k / L}{s}, \quad (9)$$

Застосувавши метод Z-перетворень, знаходимо дискретну передавальну функцію електромагнітної фрикційної муфти:

$$M(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ K_m \cdot \frac{U_k / L}{s^2} \right\} = K_m \cdot \frac{U_k}{L} \frac{T_0 z}{z-1}, \quad (10)$$

де L – індуктивність обмотки керування муфтою, $K_m = k_{\delta\delta} r_{\delta\delta} N_p \cdot \mu_*^2 \mu_0 w^2 S_\delta / (8r^2)$ – коефіцієнт муфти, який визначається її конструктивними параметрами.

Нехтуючи пружністю С1, розглядаємо механічну частину привода на прикладі двомасової моделі [9], що описується такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1(s) = \frac{1}{J_S} (M_1(s) - M_{12}(s)); \\ M_{12}(s) = C_{12} \varphi(s); \\ \varphi(s) = \frac{1}{J_S} (\omega_1(s) - \omega_2(s)); \\ \omega_2(s) = \frac{1}{J_2 s} (M_{12}(s) - M_{C_2}(s)); \end{array} \right. \quad (11)$$

Аналогічним чином приводимо (11) до дискретного вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_1(z) &= \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{1}{J_1 s^2} (M_1 - M_{12}) \right\} = \frac{T_0 / J_1 z}{z-1} (M_1(z) - M_{12}(z)); \\ M_{12}(z) &= C_{12} \varphi(z); \\ \varphi(z) &= \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{1}{J_2 s^2} (\omega_1(s) - \omega_2(s)) \right\} = \frac{T_0 z}{z-1} (\omega_1(z) - \omega_2(z)); \\ \omega_2(z) &= \frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{1}{J_2 s^2} (M_{12} - M_{C2}) \right\} = \frac{T_0 / J_2 z}{z-1} (M_{12}(z) - M_{C2}(z)), \end{aligned} \right. \quad (12)$$

де ω_1, ω_2 – кутові швидкості двигуна та приводного валу відповідно; J_1, J_2 – моменти інерції двигуна та навантаження; M_1 – рушійний момент; M_{12} – пружний момент; M_{C2} – статичний момент навантаження; C_{12} – пружність механічної системи передачі руху від вала двигуна до робочого органу; φ – кут скручування вала.

5. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗРІВНОВАЖЕННЯ НАДЛИШКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

На основі математичних моделей електропривода та системи електромагнітного зрівноваження надлишкових навантажень складемо відповідну структурну схему у середовищі структурного моделювання Matlab Simulink 7.6 (рис. 3). При цьому усі математичні вирази і залежності для обчислення коефіцієнтів передавальних функцій вводимо у параметри відповідних блоків побудованої структурної схеми, використовуючи змінні з логічно підібраними іменами. Потім усі змінні оголошуються за допомогою вікна Model Explorer (вкладка Model Workspace) середовища Matlab Simulink. Таким чином, можна побудувати універсальну структурну модель системи, у котрій легко замінити двигун чи муфту, що використовуються, шляхом коригування значень відповідних змінних у вкладці Model Workspace.

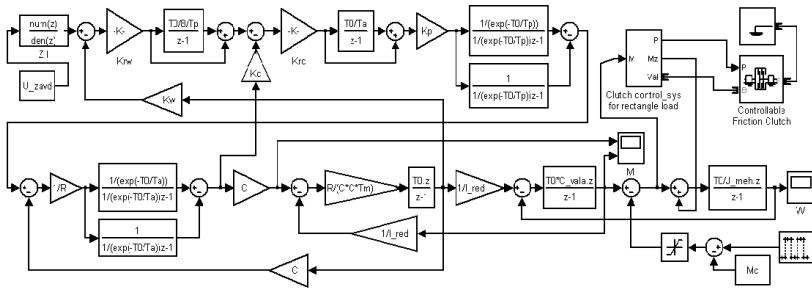


Рис. 3. Структурна схема системи електромагнітного зрівноваження у середовищі Matlab Simulink

Зрівноважувальний пристрій представлений блоком Controlable Friction Clutch з бібліотеки Simscape/SimDriveline та створеної авторами підсистеми Clutch_control_sys. Вказаний блок відображає механічну частину електромагнітної фрикційної муфти, і вхідним керуючим сигналом для нього є величина сили притиску дисків муфти. Електромагнітна частина та система керування муфтою об'єднані у складі підсистеми Clutch_control_sys.

Навантаження, що прикладається до головного вала машини, має імпульсний періодичний характер. У першу половину періоду дається навантаження, яке відповідає номінальному для вибраного двигуна, у другій половині навантаження відсутнє.

Проведемо моделювання, задавши мінімальну робочу швидкість роботи двигуна $\omega_3 = 15,7$ рад/с. На рис.4(а,б) зображені графіки перехідних процесів моменту на головному валу машини: з відімкненим (а) та увімкненим (б) пристроєм електромагнітного зрівноваження. За графіками, коливання моменту після досягнення усталеного режиму роботи для першого випадку є значними – діапазон коливань рівний 157 Н·м. Після підключення зрівноважувального пристрою перехідні характеристики суттєво покращилися (рис.4(б)), зокрема діапазон коливань зменшився до 9,5 Н·м., тобто більше, ніж у 16 разів. Значне зменшення амплітуди коливань спостерігається також на інших робочих швидкостях. Так, для $\omega_3 = 78,5$ рад/с, діапазон коливань моменту зменшився більше, ніж у 8 разів (рис. 4(в, г)). Шестикратне зниження величини коливань моменту спостерігається і при номінальній швидкості роботи двигуна $\omega_3 = 157$ рад/с (рис. 4(д, е)). Час виходу системи на усталений режим роботи в усіх випадках, залежно від заданої швидкості, складає від 3 до 3,5 с.

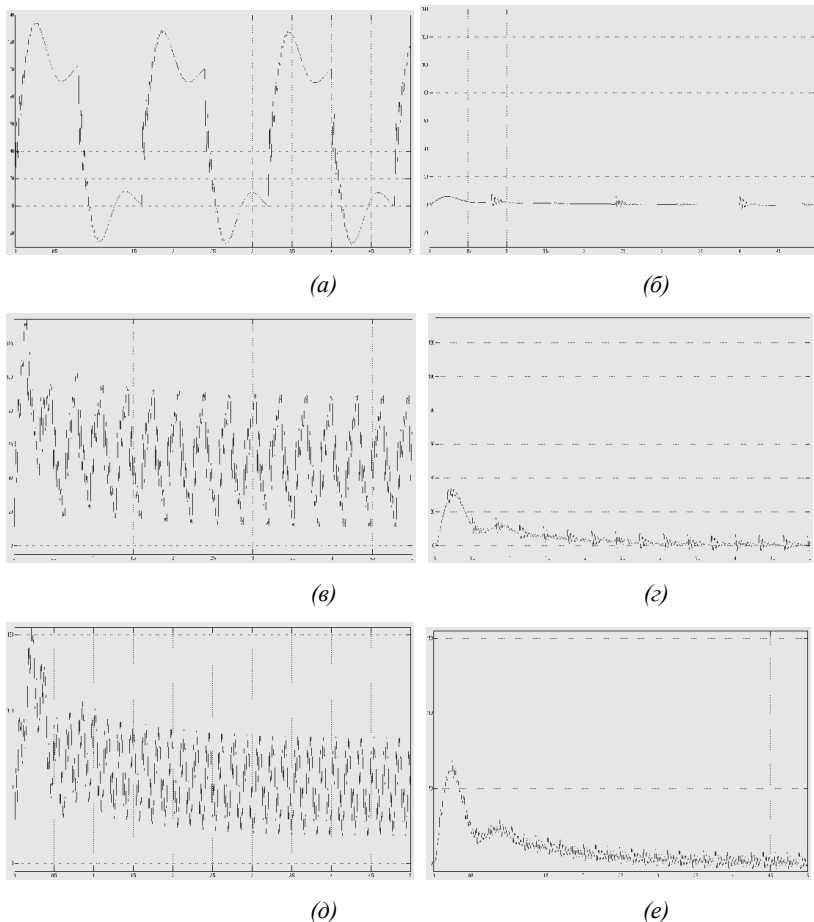


Рис. 4. Перехідні характеристики моменту на ваді виконавчого механізму для різних робочих швидкостей машини

6. ВИСНОВКИ

1. Наявні системи зрівноваження надлишкових навантажень з автоматичним регулюванням їх технологічних параметрів є досить складними у реалізації та управлінні, мають великі габарити та недостатню точність, що обмежує область їх застосування.

2. В роботі побудована на основі найсучаснішого мікроконтролера STM32F051 цифрова система електромагнітного зрівноваження надлишкових навантажень.

3. Розроблений алгоритм та запропонована цифрова математична модель системи електромагнітного зрівноваження з інтегрованими елементами привода виробничої машини.

4. На основі математичної моделі та функціональної схеми системи електромагнітного зрівноваження побудовано структурну імітаційну модель у середовищі Matlab Simulink.

5. Результати моделювання підтверджують ефективність розробленої системи зрівноваження в усьому діапазоні робочих швидкостей. А це дає підстави стверджувати, що система електромагнітного зрівноваження має значний потенціал як альтернатива класичним кулачковим зрівноважувальним механізмам.

1. Полюдов А.Н. Уравновешивающие кулачковые механизмы с пружинными нагрузителями: Метод. разраб., 1974, Вып. 12. – С. 133-152. 2. Полюдов О.Н. Синтез зрівноважу вальних кулачкових механізмів з урахуванням пружності веденої системи. / Полюдов О.Н., Лаптев В.О. // Поліграфія і видавнича справа, 1975, №11. – С. 70-76. 3. Полюдов А.Н. Программные разгрузатели цикловых механизмов. /Полюдов А.Н.// – Львов, 1979. 4. Котолюз Е.И. Уравновешивающие кулачковые механизмы с пневматическими нагрузителями // Критериальные методы расчета цикловых механизмов / Котолюз Е.И., Полюдов А.Н. // Львов, 1974, №13, С. 113-128. 5. Лаптев В.О. Система автоматического регулирования тиску у пневмокулачковому зрівноважу вальному механізмі /Лаптев В.О. // Поліграфія і видавнича справа, 1982, №18. – С. 57-60. 6. М. Верхола. Мікроконтролерна система автоматичного регулювання тиску в пневмоциліндрі зрівноважуючого кулачкового механізму /М. Верхола, В. Лаптев. // Комп'ютерні технології друкарства: Збірник наукових праць, 2008, №19. – С. 32-46. 7. Волощак І. А. Автоматизований електропривод поліграфічних машин. / Волощак І.А., Стрєнко І.Т. // – Львів: Фенікс, 1998.-198с. 8. М.Г. Попович. Теорія автоматичного керування. /М.Г. Попович, О.В. Ковальчук// – К.: «Либідь», 2007. – С. 506-516. 9. Костинюк Л.Д. Моделювання електроприводів/ Костинюк Л.Д., Мороз В.І., Паранчук Я.С.// – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – С. 113-114.