

М. І. ВЕРХОЛА

МОДЕЛІ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПЕРЕНАЛАГОДЖЕННЯ ЛИСТОРІЗАЛЬНИХ РОТАЦІЙНИХ МАШИН

З аналізу технологічних нагрузок, які мають місце у виконавчих механізмах листорізальних машин, можна зробити висновок, що основним джерелом збурень є механізм різання. До його складу входять рухомий барабан *БР* із закріпленим на ньому ножом і нерухомий ніж *НН*, закріплений на балці. Режим роботи механізму різання є ударним; оскільки зусилля різання зростає від нуля до максимуму за короткий проміжок часу.

Для забезпечення більш плавного режиму роботи привода механізму різання, а також всієї машини барабан рухомого ножа повинен мати достатній момент інерції, щоб за рахунок своєї кінетичної енергії зменшити діюче на привід ударне навантаження при розрізанні стрічки. Зазначимо, що на малих робочих швидкостях збільшення маси барабана рухомого ножа *БР* незначно впливає на покращення динаміки машини тому, що кінетична енергія барабана залежить від його кутової швидкості в квадраті [5]:

$$W_{к.б.} = I_6 \omega_0^2 2, \quad (1)$$

де I_6 — момент інерції барабана ножа.

Барабан рухомого ножа, що має великий момент інерції, приводиться в рух від гольовного двигуна через пасову передачу і два послідовних валопроводи. Тому в електромеханічній системі приводу виникають крутильні коливання, які викликають шуми, вібрації, удари в передачах, інтенсивне зношення механізмів і зниження точності розрізання стрічки на формат. Ці фактори обмежують експлуатаційну швидкість листорізальних машин, яка не перевищує 78% проектної.

Проблема створення і вдосконалення ротаційних машин з метою підвищення продуктивності і якості продукції зумовлює необхідність знаходження нових підходів раціональної побудови систем приводів цих машин. Одним із найбільш ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є перехід до дводвигун-

них листорізальних машин, в яких барабан *БР* приводиться в рух індивідуальним електроприводом.

Відомим є пристрій для управління «летючими» ножицями [1], призначений для розрізання листового прокату на мірні довжини, недоліком якого є обмежена номенклатура форматів через неможливість одержати формати, не кратні цілому числу. З метою розширення номенклатури форматів і покращення

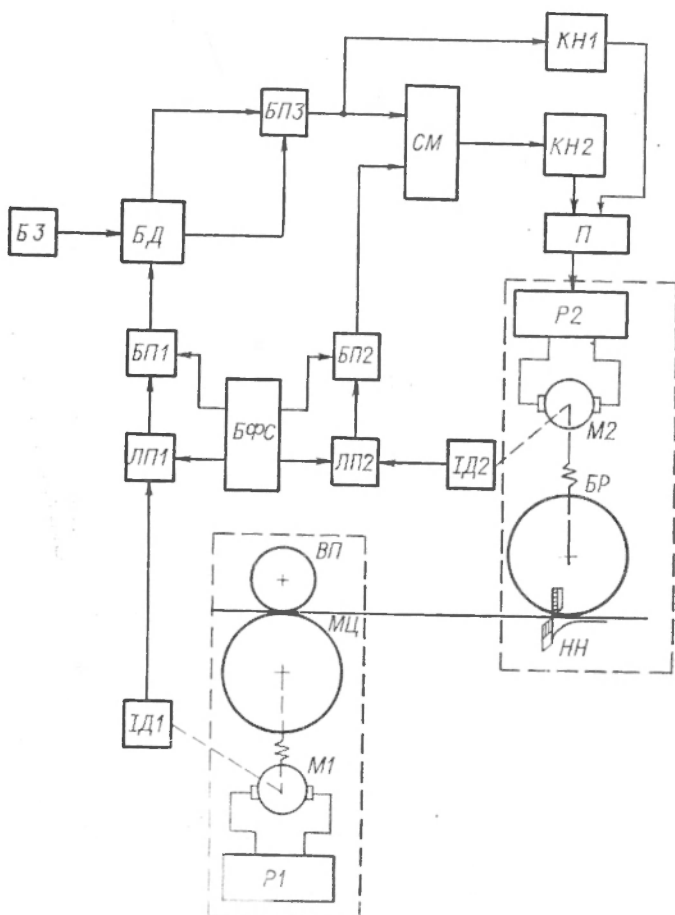


Рис. 1. Функціональна схема системи автоматичного перенастроювання листорізальної машини.

динаміки листорізальної машини розроблена система автоматичного перенастроювання на формат [2] (рис. 1).

Сигнал від імпульсного датчика *ІД1* швидкості двигуна *М1* привода мірного циліндра *ЦМ* надходить на лічильник-перетворювач *ЛП1*. Результат з виходу останнього у вигляді двійкового коду *N₁* записується в блок пам'яті *БП1* за командою

від блоку формування синхроімпульсів *БФС*, а лічильник *ЛП1* зразу ж після запису повергається у вихідне становище за командою від *БФС*. Код, зафіксований в *БП1*, подається на вхід блоку ділення *БД*, де відбувається ділення коду N_1 на число A , яке виражене також в двійковому коді і задане цифрокодним блоком задання *БЗ*. Завдяки діленню кодів можна отримати число в двійковій формі $N_3 = N_1/A$, яке буде не обов'язково кратним заданому і може бути більшим за N_1 , якщо $A < 1$. За допомогою *БЗ* задають будь-яке необхідне співвідношення швидкостей двигунів M_1 і M_2 , а відповідно, і будь-яку довжину формата. Зазначимо, що передавальні числа від валів двигунів M_1 і M_2 до валів мірного циліндра і барабана рухомого ножа повинні бути однаковими. Результат N_3 , одержаний на виході *БД*, який задає швидкість двигуна M_2 , записується в блок пам'яті *БПЗ* за командою від самого блоку ділення. З виходу *БПЗ* код N_3 надходить на вхід перетворювача код-напряга *КН1* і одночасно на один із входів суматора *СМ*, де сумується з кодом N_2 . Результат з виходу *СМ* подається на вхід перетворювача *КН2*, де перетворюється в напругу, яка надходить на вхід підсилювача *П* (на другий вхід підсилювача надходить сигнал від *КН1*). Перетворювач *КН1* служить для вибору робочої швидкості. Сумарний сигнал з виходу *П* подається на вхід регулятора швидкості *Р2*. Для точного регулювання швидкості двигуна M_2 і, відповідно, підвищення точності розрізання стрічки, в систему введений зворотний зв'язок за швидкістю. Швидкість двигуна M_2 вимірюється датчиком *ІД2*, сигнал з виходу якого через лічильник *ЛП2* і блок пам'яті *БП2* надходить на другий вхід суматора *СМ*. Вважаємо, що двигуни постійного струму M_1 і M_2 мають лінійну механічну характеристику, яка описується рівнянням [5]

$$M_{дi} = \beta_i (\omega_{зi} - \omega_{дi}), \quad (2)$$

де β_i — коефіцієнт жорсткості механічної характеристики двигуна; $\omega_{зi}$ — задана стала кутова швидкість; $M_{дi}$ — рушійний момент двигуна.

Пружні валопроводи описуються диференціальним рівнянням [4]

$$dM_{прi}/dt = C_i (\omega_{дi} - \omega_i). \quad (3)$$

де $M_{прi}$ — момент, прикладений до пружного валу; C_i — жорсткість пружного валопроводу; $\omega_{дi}$, ω_i — кутові швидкості валів електроприводів і валів окремих механізмів (мірного циліндра і барабана рухомого ножа). Мірний циліндр і прижимний валик *ВП* разом зі своїм приводом створюють подаючу секцію, а механізм різання з індивідуальним електроприводом — різальну. Технологічні моменти та моменти сил в'язкого тертя у секціях вважаємо пропсційними відповідним кутовим швидкостям ω_i :

$$M_{ci} = \alpha_i \omega_i, \quad (4)$$

де α_i — коефіцієнт, що враховує сили тертя і технологічні навантаження.

На основі цих рівнянь запишемо рівняння руху довільної секції

$$J_i d\omega_i/dt = M_{дi} - \alpha_i \omega_i - M_{прi}, \quad (5)$$

де I_i — зведений момент інерції обертових мас секції.

Рівняння руху електропривода відповідної секції

$$J_{\Sigma i} d\omega_{\Sigma i}/dt = M_{\Sigma i} - M_{ci}, \quad (6)$$

де M_{ci} — сумарний момент сил опору окремих механізмів; $I_{\Sigma i}$ — зведений момент інерції електроприводу секції.

Зазначимо, що відповідні параметри секцій зведені до своїх двигунів.

Використання цифрової елементної бази для побудови системи автоматичного переналадження вносить свої особливості в дослідження систем такого типу. Це зумовлено тим, що цифрові пристрої є дискретними, оперують дискретними сигналами (послідовностями чисел), тобто сигналами, які приймають певне значення тільки в дискретні моменти часу.

Аналоговий вихідний сигнал $\omega_{дi}$ (швидкість двигуна MI) за допомогою імпульсного датчика $ІДІ$ і лічильника $ЛПІ$ перетворюється в дискретну послідовність чисел N_i , виражену в двійковій формі, яку можна визначити за формулою

$$N_i = N_a \omega_{дi} T_{ц}/2\pi, \quad (7)$$

де N_d — це кількість імпульсів, яка отримується на виході $ІДІ$ за один оберт двигуна; $T_{ц}$ — період квантування (циклу).

Послідовність N_i , або, що рівноцінно, послідовність $\omega_{дi}(kT_{ц})$, подається на вхід цифрового обчислювального пристрою, в нашому випадку — блоку ділення. В блоці ділення $БД$ вона перетворюється відповідно до закладеного там алгоритму в синхронну послідовність чисел $N_3 = \omega_{з2}(kT_{ц})$ яка запам'ятовується в блоці пам'яті $БПЗ$ і перетворюється в неперервний сигнал в цифро-аналоговому перетворювачі.

Чергове дискретне значення вихідного сигналу $\omega_{з2}(kT_{ц} + \tau)$ формується на значеннях вхідного сигналу, який визначається в момент часу $t = kT_{ц}$ і зсунутий в часі на τ . Це можна описати лінійним рівнянням [6]

$$\omega_{з2}(kT_{ц} + \tau) = c_0 \omega_{дi}(kT_{ц}). \quad (8)$$

де $c_0 = K_c$ — коефіцієнт співвідношення швидкостей електродвигунів MI і $M2$; τ — час обробки інформації в блоці ділення.

Якщо нам на виході блоку ділення $БД$ необхідно мати інформацію в моменти часу $kT_{ц}$, тоді рівняння (8) набере вигляду

$$\omega_{з2}(kT_{ц}) = c_0 \omega_{дi}(kT_{ц} - \tau). \quad (9)$$

Та обставина, що дискретні сигнали являють собою послідовності чисел, не дає змоги застосовувати до них математич-

ний апарат інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є. Але ці труднощі можна подолати, перейшовши до перетворення моделей цих сигналів. Оскільки дискретна послідовність чисел визначає маттєве значення неперервного сигналу в дискретні моменти часу, за модель такої послідовності відповідно [6] можна прийняти послідовність нескінченно коротких імпульсів, яку називають модульованою дельта-імпульсною послідовністю і позначають зірочкою.

Після виконання розглянутої заміни сигналів рівняння (9) матиме вигляд

$$\omega_{32}^*(t) = c_0 \omega_{д1}^*(t - \tau), \quad (10)$$

Таким чином, при поданні на вхід *БД* послідовності дельта-імпульсів на виході також одержуємо послідовність дельта-імпульсів, тільки модульовану за певним законом, який визначається рівнянням (10). Для опису отриманої неперервної моделі (10) дискретного рівняння (9) можна використати звичайний апарат передаточних функцій, перетворених за формулою *z*-зображення.

Перехід від дискретних сигналів $\omega_{д1}(RT_{ц})$ і $\omega_{32}(kT_{ц})$ до їх моделей $\omega_{д1}^*(t)$ і $\omega_{32}^*(t)$ вимагає відповідної заміни аналого-цифрового перетворювача *АЦП*, що складається з *ІДІ* і *ЛПІ* і цифро-аналогового перетворювача *ЦАП*, побудованого на базі *БПЗ* і *КН2*. *АЦП* на вході блоку ділення *БД* повинен бути замінений дельта-імпульсним модулятором, а *ЦАП* — демодулятором. Реакція такого демодулятора на одиночний дельта-імпульс повинна співпадати з реакцією *ЦАП* на окреме число рівне одиниці. З врахуванням цього легко можна отримати передаточну функцію демодулятора

$$W_{дм} = \int_0^{T_{ц}} e^{-st} dt = (1 - e^{-T_{ц}s})/s. \quad (11)$$

На основі наведених рівнянь та функціональної схеми (рис. 1) на рис. 2 побудована структурна модель системи автоматичного переналагодження лнсторізальної машини. За структурною схемою знайдемо залежність кутової швидкості двигуна *М2* приводу барабана рухомого ножа від задаючої швидкості двигуна *М1* в *z*-зображеннях. Передавальна функція $W_3(z)$ замкненої імпульсної системи автоматичного переналагодження визначається як відношення спектрів дискретних сигналів $\omega_{32}^*(t)$ і $\omega_{д2}^*(t)$ на її вході і виході:

$$\omega_{д2}(z) = W_3(z) \cdot \omega_{32}(z), \quad (12)$$

де $\bar{W}_3(z)$ виражається через передавальну функцію розімкнутої системи $\bar{W}_p(z)$ аналогічно тому, як це має місце в неперервних ситемах:

$$W_3(z) = W_p(z)/(1 + W_p(z)). \quad (13)$$

Визначимо за структурною схемою (рис. 2) передавальну функцію розімкнutoї системи [3]:

$$W_p(z) = z \left\{ \frac{1 - e^{-T_{\text{н}} s}}{s} W_{\text{н.ч.}}(s) \right\}. \quad (14)$$

Передавальну функцію неперервної частини можна виразити за структурною схемою таким чином:

$$W_{\text{н.ч.}}(s) = \frac{\beta_2 (1 + W_6(s)) / J_{\text{н}2} s}{1 + W_4(s) + W_5(s) + W_4(s) W_6(s)}, \quad (15)$$

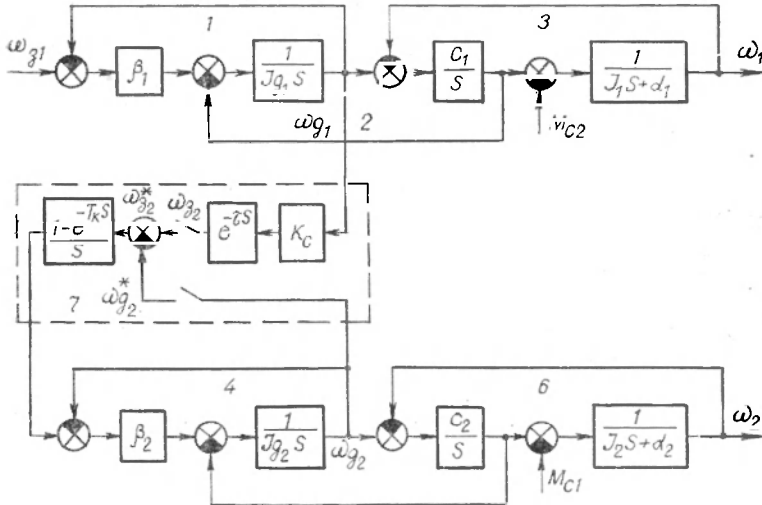


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного переналагодження листорізальної машини.

де передавальні функції контурів

$$W_4(s) = \beta_2 / I_{\text{н}2} s; \quad W_5(s) = c_2 / I_{\text{н}2} s^2; \quad \bar{W}_6 = c_2 / s (I_2 s + \alpha_2) \quad (16)$$

Сигнал на вході системи можна визначити з такого виразу:

$$W_3(z) = z \left\{ \frac{\beta_1 K_c e^{-\tau s} / I_{\text{н}1} s}{1 + W_1(s) + W_2(s) + W_3(s) + W_1(s) W_3(s)} \omega_{\text{з}1}(s) \right\}, \quad (17)$$

де функції контурів

$$W_1(s) = \beta_1 / I_{\text{н}1} s; \quad W_2(s) = c_1 / I_{\text{н}1} s^2; \quad W_3(s) = c_1 / (I_1 s + \alpha_1) s. \quad (18)$$

Підставивши вирази (13)–(18) у рівняння (12), отримаємо залежність кутової швидкості двигуна M_2 від задаючої швидкості двигуна M_1 в z -зображеннях. Через громіздкість кінцевий вираз не наводимо.

Оскільки в системі автоматичного переналагодження період квантування $T_{\text{н}} = 0,0078$ с набагато менший від сталої часу об'

екта $T_{06}=0,117$ с, замкнуту імпульсну систему можна розглядати як замкнуту неперервну систему з передавальною функцією розімкнутої системи [3]

$$W_p(s) = W_{п.н.ч.}(s) \quad (19)$$

де передавальна функція наведеної неперервної частини

$$W_{п.н.ч.}(s) = \frac{1 - e^{-T_u s}}{s} W_{н.ч.}(s). \quad (20)$$

З урахуванням цих умов запишемо залежність швидкості електродвигуна $M2$ приводу барабана рухомого ножа від задаючої швидкості двигуна $M1$ в зображеннях

$$\begin{aligned} \omega_{n2}(s) = & \left[\frac{(1 - e^{-T_u s}) \beta_2 (1 + W_6(s))}{I_{a2} s^2 (1 + W_4(s) + W_5(s) + W_6(s) + W_4(s) W_6(s))} \right] \times \\ & \times \left[1 + \frac{(1 - e^{-T_u s}) \beta_2 (1 + W_6(s))}{I_{a2} s^2 (1 + W_4(s) + W_5(s) + W_6(s) + W_4(s) W_6(s))} \right]^{-1} \times \\ & \times \left[\frac{\beta_1 K_c e^{-\tau s} (1 + W_3(s))}{I_{a1} s (1 + W_1(s) + W_2(s) + W_3(s) + W_1(s) W_3(s))} \omega_{31}(s) \right]. \quad (21) \end{aligned}$$

Після перетворень з урахуванням (16), (18) отримуємо

$$\omega_{n2}(s) = \frac{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_7 s^7 + a_6 s^6 + \dots + a_1 s + a_0} \omega_{31}(s). \quad (22)$$

Через громіздкість наведемо тільки перший і останній коефіцієнти знаменника (22):

$$a_7 = I_{a1} I_{a2} I_1 I_2; \quad a_0 = (1 - e^{-T_u s}) c_1 c_2 \beta_2 \alpha_1 + (1 - e^{-T_u s}) c_1 c_2 \beta_1 \beta_2$$

Власний оператор $A_1(s)$, що дорівнює знаменнику (22), знаходять з визначника $\Delta_1(s)$, який, в свою чергу, дорівнює знаменнику (21):

$$\begin{aligned} \Delta_1(s) = & 1 + W_1(s) + W_2(s) + W_3(s) + W_4(s) + W_5(s) + W_6(s) + \\ & + W_7(s) + W_1(s) W_3(s) + W_1(s) W_4(s) + W_1(s) W_5(s) + W_1(s) \times \\ & \times W_6(s) + W_1(s) W_7(s) + W_2(s) W_4(s) + W_2(s) W_5(s) + \\ & + W_2(s) W_6(s) + W_2(s) W_7(s) + W_3(s) W_4(s) + W_3(s) W_5(s) + \\ & + W_3(s) W_6(s) + W_3(s) W_7(s) + W_4(s) W_6(s) + W_6(s) W_7(s) + \\ & + W_1(s) W_3(s) W_4(s) W_6(s) + W_1(s) W_3(s) W_5(s) + W_1(s) W_3(s) \times \\ & \times W_6(s) + W_1(s) W_3(s) W_6(s) + W_1(s) W_3(s) W_7(s) + W_1(s) \times \\ & \times W_4(s) W_6(s) + W_2(s) W_4(s) W_6(s) + W_3(s) W_4(s) W_6(s) + \\ & + W_1(s) W_6(s) W_7(s) + W_2(s) W_6(s) W_7(s) + W_3(s) W_6(s) \times \\ & \times W_7(s) + W_1(s) W_3(s) W_4(s) W_6(s) + W_1(s) W_3(s) W_6(s) W_7(s), \quad (23) \end{aligned}$$

де передавальна функція схеми контура, який враховує цифрову частину системи переналагодження, має вигляд

$$W_7(s) = (1 - e^{-T_u s}) \beta_2 / I_{d2} s^2.$$

Коефіцієнти чисельника виразу (22)

$$\begin{aligned} b_4 &= (1 - e^{-T_u s}) \beta_1 \beta_2 I_{d2} I_1 I_2 K_c e^{-\tau s}; & b_3 &= [(1 - e^{-T_u s}) \beta_1 \beta_2 I_{d2} I_1 \alpha_2 + \\ &+ (1 - e^{-T_u s}) \beta_1 \beta_2 I_{d2} \alpha_1 I_2] K_c e^{-\tau s}; & b_2 &= [(1 - e^{-T_u s}) \beta_1 \beta_2 I_{d2} \alpha_1 \alpha_2 + \\ &+ (1 - e^{-T_u s}) c_1 \beta_1 \beta_2 I_2 + (1 - e^{-T_u s}) \beta_1 \beta_2 c_2 I_1] K_c e^{-\tau s}; \\ b_1 &= [(1 - e^{-T_u s}) c_1 \beta_1 \beta_2 \alpha_2 + (1 - e^{-T_u s}) \beta_1 \beta_2 c_2] K_c e^{-\tau s}; \\ b_0 &= (1 - e^{-T_u s}) \beta_1 \beta_2 c_1 c_2 K_c e^{-\tau s}. \end{aligned}$$

Отримана передавальна функція (22) дає змогу визначити власний рух мірного циліндра і барабана рухомого ножа, значення крутильних коливань і вплив параметрів секції (α , I , c) на їх параметри.

Прийнявши оператор s рівним нулеві, отримуємо залежність кутової швидкості ω_{d2} від задаючої ω_{31} в усталеному режимі:

$$\omega_{d2} = \frac{\beta_1 K_c}{\alpha_1 + \beta_2} \omega_{31}. \quad (24)$$

Таким чином, кутова швидкість двигуна $M2$ залежить від задаючої двигуна $M1$, його коефіцієнта жорсткості, коефіцієнта, що враховує сили тертя, технологічних навантажень і співвідношення швидкостей двох двигунів K_c .

Запишемо залежність кутової швидкості барабана рухомого ножа від моменту сил опору, які діють на мірний циліндр в зображеннях

$$\omega_2(s) = \left[\frac{c_1 K_c e^{-\tau s} (1 - e^{-T_u s}) \beta_2 C_2}{I_{d1} I_{d2} s^2 (I_1 s + \alpha_1) (I_2 s + \alpha_2)} \right] \Delta^{-1}_1(s) M_{c1}(s). \quad (25)$$

Після перетворень

$$\omega_2(s) = \frac{b_0}{a_7 s^7 + a_6 s^6 + \dots + a_1 s + a_0} M_{c1}(s), \quad (26)$$

де $b_0 = c_1 K_c e^{-\tau s} (1 - e^{-T_u s}) \beta_2 C_2$.

Статичний коефіцієнт передачі системи за моментом сил опору M_{c1}

$$K_M = \omega_2 / M_{c1} = K_c / (\alpha_1 + \beta_1). \quad (27)$$

Отже, статичне відхилення швидкості барабана рухомого ножа викликане зміною моменту сил опору на мірному циліндрі й залежить від коефіцієнта співвідношення швидкостей двох двигунів, коефіцієнта жорсткості електродвигуна $M1$, а також параметру α_1 подаючої секції.

На основі рис. 2 можна виконати синтез системи автоматичного переналагодження на формат листорізальних ротаційних машин і розрахунок перехідних процесів за моментом сил опору та швидкості.

1. А. с. 1224029 СССР // Бюл. изобрет. 1985, № 14. 2. *Верхола М. И.* и др. Устройство для управления барабаном реза листорезальной ротационной машины. Решение о выдаче авторского свидетельства от 20 мая 1988 г. по заявке № 4225388/28-12. 3. *Гольдфарб Л. С.* и др. Теория автоматического управления. М., 1976. 4. *Егоров В. Н., Шестаков В. М.* Динамика систем электропривода. Л., 1983. 5. *Ключев В. Н.* Теория электропривода. М., 1985. 6. *Рстач В. Я.* Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М., 1985.

Стаття надійшла до редколегії 29.02.89
