

**В.В. Кострицький, д.т.н., проф.
Ю.О. Кириченко, асист.**

Київський національний університет технологій та дизайну

СИСТЕМА ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ НАТЯГОМ МАТЕРІАЛУ ПРИБІЗМУВАННІ В РУЛОН

Розроблена система програмного керування натягом матеріалу при змотуванні в рулон. Система забезпечує непряме керування натягом за будь-яким законом завдяки регулюванню моменту двигуна електропривода моталки, чим забезпечується висока надійність роботи та простота реалізації намотувального пристрою. Завдяки обчисленню та компенсації протягом всього процесу намотування моментів збурень, які обумовлені тертям рухомих частин, збільшенням маси рулону, аеродинамічним опором матеріалу, згинанням матеріалу на рулоні тощо, забезпечується висока точність керування натягом.

Завершальною операцією технологічних процесів виготовлення сучасних листових матеріалів в різних галузях легкої, хімічної та паперової промисловості є змотування матеріалу в рулон із заданим законом керування натягом, який забезпечує раціональний напружено-деформований стан витків за товщиною рулону. В умовах слабких натягів, а також при намотуванні тонких плівок, коли прямий вимір натягу практично неможливий, особливу перспективність становить розробка програмних методів намотування без виміру натягу, в основу яких покладена уточнена математична модель процесу намотування та сучасні принципи автоматичного керування, які забезпечують зменшення чутливості до параметричних і зовнішніх збурень. Створення простих та надійних систем керування натягом, що забезпечують одночасно високу якість керування й швидке налаштування при зміні параметрів матеріалу, є достатньо актуальною задачею.

Метою роботи є розробка системи програмного керування натягом матеріалу на основі непрямого способу керування за рахунок регулювання моменту двигуна електропривода моталки з компенсацією дії моментів збурень, що забезпечує високу точність керування за будь-яким законом.

На рис. 1 представлена розроблена авторами структурна схема намотувального пристрою, яка враховує не лінійність в'язкопружного матеріалу та взаємозалежність електроприводів моталки й роликів подачі. Необхідність якісного керування в широких межах швидкості та моменту двигунів обумовила застосування електроприводів з двигунами постійного струму. На рисунку позначено: ПП – програмний пристрій; РС1, РС2 – регулятори струмів якорів двигунів моталки і роликів подачі; РШ2 – регулятор кутової швидкості роликів; П1, П2 – силові перетворювачі; ДС1, ДС2 – датчики струмів двигунів; ДШ2 – датчик кутової швидкості двигуна роликів; $\Phi(V_1)$ – блок визначення радіуса рулону; U_{11}^* , U_{12}^* – сигнали завдання регуляторів струмів; U_{11} , U_{12} – сигнали датчиків струмів; $U_{\omega 2}^*$, $U_{\omega 2}$ – сигнал завдання та сигнал датчика швидкості двигуна роликів; $c\Phi_{n1}$, $c\Phi_{n2}$ – номінальні коефіцієнти ЕРС двигунів; $T_{я1}$, $T_{я2}$ – електромагнітні сталі часу двигунів; $R_{я1}$, $R_{я2}$ – електричні опори обмоток якорів двигунів; J_1 , J_2 – моменти інерції електропривода моталки з рулоном й електропривода роликів подачі; c , μ – коефіцієнти жорсткості й внутрішнього в'язкого тертя матеріалу; E_1 , E_2 – ЕРС двигунів; L – відстань між осями роликів подачі й вала моталки; U_1 , U_2 – напруги живлення двигунів; M_1 , M_2 – моменти двигунів; M_{c1} , M_{c2} – статичні моменти двигунів; M_{F1} , M_{F2} – пружно-в'язкі моменти; ω_1 , ω_2 – кутові швидкості двигунів; V_1 , V_2 – лінійні швидкості матеріалу в роликах подачі й на вершині рулону; r_1 , r_2 – радіуси рулону й ролика подачі; F – натяг матеріалу.

Електропривод роликів подачі підтримує задану кутову швидкість ω_2 і відповідно лінійну швидкість матеріалу V_2 . Електропривод моталки створює необхідний натяг матеріалу F за допомогою одноконтурної системи регулювання струму якоря I_1 при номінальному й незмінному струмі збудження, тобто при номінальному значенні $c\Phi_{n1}$. Завдяки цьому здійснюється керування моментом електродвигуна $M_1 = c\Phi_1 I_1$ і відповідно непряме керування натягом матеріалу без використання датчика натягу і замкнутого контуру керування, чим обумовлюється простота реалізації та висока надійність системи в цілому [1]. Висока якість керування натягом забезпечується програмним пристроєм ПП, який формує сигнал керування

струмом якоря електропривода моталки U_{Π}^* з урахуванням обчислених моментів збурень, що діють на систему намотування.

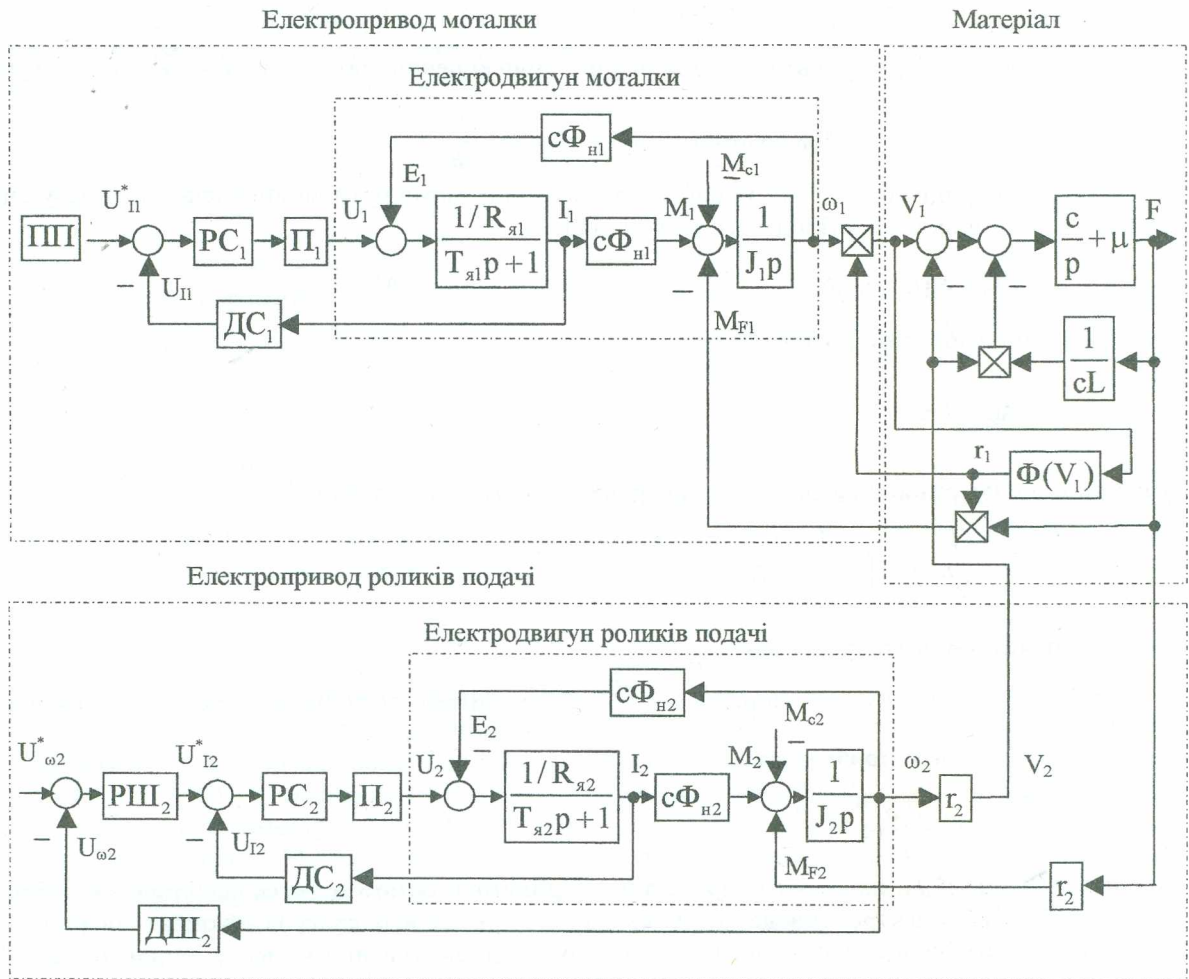


Рис. 1. Структурна схема намотувального пристрою

Момент, який створює електродвигун моталки, дорівнює:

$$M_1 = M_{F1} + M_{c1} + M_d = F r_1 + M_{c1} + J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \quad (1)$$

і складається з корисного моменту натягу намотувального матеріалу $M_{F1} = F r_1$, статичного моменту M_{c1} та динамічного моменту M_d . При цьому динамічний M_d та статичний момент M_{c1} є моментами зовнішнього збурення, що збільшують похибку $\Delta F = F^* - F$ між заданим F^* та дійсним F натягом матеріалу.

Заданий момент натягу намотувального матеріалу дорівнюватиме:

$$M_{F1}^* = F^* r_1 = N^* b h r_1 \quad (2)$$

і залежить від заданого натягу F^* , поточного значення радіуса рулону r_1 , питомого натягу N^* , ширини матеріалу b , товщини матеріалу h . Заданий питомий натяг N^* може мати довільний закон зміни відповідно до технологічних вимог формування рулону, у тому числі і бути незмінним на весь період змотування.

Кутова швидкість рулону зв'язана з лінійною швидкістю матеріалу залежністю $\omega_1 = V_1 / r_1$. Її похідна дорівнює

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{r_1} \frac{dV_1}{dt} - \frac{V_1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dt},$$

і тому динамічний момент має дві складові:

$$M_d = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{J_1}{r_1} \frac{dV_1}{dt} - \frac{J_1 V_1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dt} = M_{d1} + M_{d2} . \quad (3)$$

Перша складова M_{d1} обумовлена виникненням прискорення матеріалу $a_1 = \frac{dV_1}{dt}$ в перехідних процесах, а друга M_{d2} - збільшенням радіуса рулону $\frac{dr_1}{dt}$.

Зв'язок між радіусом рулону і швидкістю матеріалу може бути встановлений з виразу зміни об'єму рулону в залежності від його радіуса [2]:

$$\Delta Q = \pi (r_1^2 - r_{10}^2) b$$

і від довжини змотаного матеріалу l_1 :

$$\Delta Q = b h l_1 = b h \int_0^t V_1 dt .$$

Після прирівнювання виразів для ΔQ визначається шукана залежність:

$$r_1 = \sqrt{r_{10}^2 + \frac{h}{\pi} \int_0^t V_1 dt} = \sqrt{r_{10}^2 + \frac{h l_1}{\pi}} , \quad (4)$$

де r_{10} - початковий радіус рулону.

Похідна радіуса рулону дорівнює $\frac{dr_1}{dt} = \frac{h V_1}{2\pi r_1}$, після чого вираз для другої складової динамічного моменту приймає вигляд:

$$M_{d2} = - \frac{J_1 h V_1^2}{2\pi r_1^3} . \quad (5)$$

Момент інерції J_1 , що входить до складових динамічних моментів, складається з незмінного моменту інерції електропривода J_0 (момент інерції електродвигуна, момент інерції вала моталки, момент інерції муфт тощо) та змінного в ході змотування моменту інерції рулону J_r :

$$J_1 = J_0 + J_r = J_0 + \frac{\pi \rho b}{2} (r_1^4 - r_{10}^4) , \quad (6)$$

де ρ - питома маса матеріалу.

Статичний момент M_{c1} визначається моментом тертя в опорах M_{to} , моментом аеродинамічного опору матеріалу M_a і моментом деформації матеріалу на рулоні M_{def}

$$M_{c1} = M_{to} + M_a + M_{def} .$$

Момент тертя в опорах дорівнює [3]:

$$M_{to} = \frac{\eta d}{2} \sqrt{[G_0 + \pi b \rho g (r^2 - r_0^2)]^2 + F^2} + 2[G_0 + \pi b \rho g (r^2 - r_0^2)] F \sin \alpha , \quad (7)$$

де η - коефіцієнт тертя в опорах вала моталки; d - діаметр опор вала моталки; G_0 - вага вала моталки; g - прискорення вільного падіння; $\alpha = \arctg \frac{r_{max} + a_1 + r}{r_{max} + b_1}$ - кут намотування; r_{max} - кінцевий радіус рулону; $a_1 = (0,25-0,5) r_{max}$, $b_1 = (0,2-0,6) r_{max}$ - конструктивні сталі моталки.

Момент аеродинамічного опору визначається наступним виразом [4]:

$$M_a = 2 \left[0,664 \pi \rho_n (r_{xp}^4 - r^4) \sqrt{\frac{v_0 V^2}{r^3}} + 0,0196 \rho_n R_z^{0,2} \frac{V^2}{r^2} (r_{max}^{4,8} - r_{xp}^{4,8}) \right] + 0,664 b V^2 r \eta_0 \sqrt{Re_{xp}} + \quad (8)$$

$$+ 0,0187 \rho_n V^2 b r \left(R_z + \frac{0,83 v_0}{V} \right)^2 \left[(2\pi)^{0,8} - (2\pi r_0)^{0,8} \right] + 0,32 V^2 \rho_n b r b_1 / \sqrt{Re_{xp}} ,$$

де $\rho_{\text{п}} = 1,22 \text{ кг/м}^3$ – питома маса повітря; $r_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{Re_{\text{кр}} \nu_0 r}{V}}$ – критичний радіус; $Re_{\text{кр}} = 10^5 + 816V - 16,6 \cdot 10^5 D_{\text{max}} + 47V^2 + 8,8 \cdot 10^4 V D_{\text{max}} + 2,3 \cdot 10^6 D_{\text{max}}^2$ – число Рейнольдса; D_{max} – кінцевий діаметр рулону; $\nu_0 = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ – кінематична в'язкість повітря; $\eta_0 = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамічна в'язкість повітря; R_z – шорсткість матеріалу.

Момент деформації матеріалу на рулоні визначається наступним виразом [3]:

$$M_{\text{деф}} = \frac{Eh^3b}{24r^2}, \tag{9}$$

де E – модуль пружності матеріалу.

В усталеному режимі лінійна швидкість матеріалу в роликах подачі дорівнює лінійній швидкості матеріалу на вершині рулону $V_2 = V_1$, тому лінійна швидкість матеріалу під час намотування визначається за сигналом датчика кутової швидкості роликів:

$$V_1 = V_2 = \omega_2 r_2 = U_{\omega_2} r_2 / k_{\omega_2}, \tag{10}$$

де k_{ω_2} – коефіцієнт передачі датчика швидкості.

Для програмного керування натягом матеріалу в програмному пристрої розраховується згідно з виразом (1) з урахуванням (2) необхідний момент електродвигуна моталки M^*_{F1} і відповідний сигнал керування електропривода:

$$U^*_{\text{п}} = \frac{k_{\text{п}}}{c\Phi_{\text{п1}}} M^*_1. \tag{11}$$

На рис. 2 представлена функціональна схема ПП, на якій позначено: $\Phi 1$ – блок формування заданого закону керування питомого натягу N^* ; $\Phi 2$ – блок визначення лінійної швидкості матеріалу V_1 відповідно до формули (10); $\Phi 3$ – блок обчислення радіуса рулону r_1 за виразом (4); $\Phi 4$ – блок розрахунку заданого моменту натягу M^*_{F1} за формулою (2); $\Phi 5$ – блок обчислення моменту тертя $M_{\text{тo}}$ відповідно до формули (7); $\Phi 6$ – блок обчислення динамічного моменту M_d за виразом (3); $\Phi 7$ – блок обчислення моменту аеродинамічного опору матеріалу M_a за виразом (8); $\Phi 8$ – блок визначення моменту деформації $M_{\text{деф}}$ відповідно до формули (9); $\Phi 9$ – блок обчислення сигналу завдання електропривода моталки $U^*_{\text{п1}}$ за виразом (11).

З огляду на обсяг обчислень, програмний пристрій раціонально реалізувати на основі засобів мікропроцесорної техніки, що дозволить оперативно змінювати програму намотування в залежності від параметрів матеріалу й технологічних вимог, а також автоматизувати технологічну лінію.

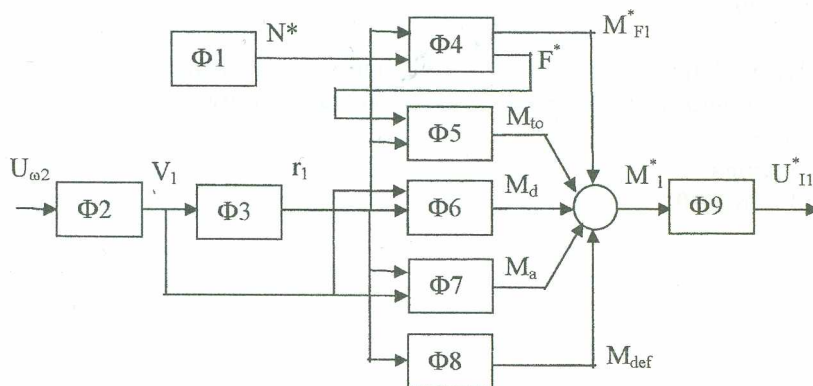


Рис. 2. Функціональна схема програмного пристрою

Проведений огляд літературних джерел дозволяє зробити висновок про те, що в даний час питання забезпечення високої якості намотування в умовах неможливості одержання повної інформації про параметри технологічного процесу стосовно матеріалів, що не допускають

значних натягів, остаточно не вирішений. Перспективними для рішення поставленої задачі представляються системи [5–7], побудовані на основі таких принципів керування, які дозволяють при синтезі керуючого пристрою розглядати об'єкт керування у всій його складності з метою досягнення оптимальних якісних показників. При проведенні досліджень необхідно приділити увагу питанням впливу нелінійностей об'єкта та різноманітних збурюючих факторів і лише після цього вирішити питання про можливість спрощення математичної моделі об'єкта та інших елементів системи автоматичного керування.

Представлена система програмного керування натягом матеріалу при змотуванні в рулон дозволяє отримати високу якість керування, бо враховує в законі керування моменти збурення, обумовлені тертям в елементах механізму, аеродинамічним опором матеріалу, зміною маси рулону, прискоренням матеріалу у перехідних процесах. Система дозволяє реалізувати будь-які закони керування, в т.ч. з постійним натягом, з постійним корисним моментом натягу, з незмінним напруженим станом витків рулону тощо. Завдяки реалізації непрямого способу керування натягом забезпечується висока надійність та простота реалізації системи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Борцов Ю.В., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – С.-Пб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
3. Иванов Г.М., Никитин Б.К. Автоматизированный электропривод агрегатов непрерывного действия. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
4. Матюшев И.И., Тарасенко Л.Н., Троцановский А.А. Аэродинамическое сопротивление при наматывании паковок химических нитей: Автоматизация процессов и устройств текстильной и легкой промышленности. – Л., 1980. – С. 43-46.
5. Иванов Г.М. и др. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.; ил.
6. Иванов Г.М., Никитин Б.К. Автоматизированный электропривод агрегатов непрерывного действия. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.; ил.
7. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. М.: Высш. школа, 1977. – 391 с.; ил.

КОСТРИЦЬКИЙ Валерій Всеволодович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

– електромеханіка.

Тел.: (8044) 290-16-03.

КИРИЧЕНКО Юрій Олексійович – асистент кафедри електромеханічних систем Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

– електромеханіка.

Тел.: (8044) 256-29-03.

Подано 10.04.2004