

УДК 6812.5.017+62-13

Б. В. Дурняк, О. М. Сорочинський, І. А. Забрамна

**СПОСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМІЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАМОТУВАЛЬНИХ ВУЗЛІВ
РУЛОННИХ РОТАЦІЙНИХ МАШИН**

Запропоновано способи і засоби реалізації оптимізованих систем керування електроприводами намотувальних вузлів рулонних ротаційних машин. Наведено алгоритми і результати обчислень параметрів елементів системи автоматичного керування приводами намотувальних вузлів при лінійній швидкості руху стрічки 2,5 і 10 м/с.

The ways and means of realization optimize of electrical engine control systems of reeling up sites of rolled rotational machines are offered. The algorithms and results of accounts of parameters of system components of automatic control of motors of reeled up sites are submitted, at linear speed 2,5 and 10 m/s.

Синтезовані нами [1, 3] системи цифрового керування електроприводами намотувальних вузлів рулонних ротаційних машин (НВ РРМ) з двигунами постійного струму Д й асинхронними двигунами АД необхідно впроваджувати в експлуатацію, не чекаючи на виготовлення вітчизняних більш досконалих силових транзисторних (замість тиристорних) перетворювачів ТП змінного струму в постійний і перетворювачів частотних ПЧ, у т.ч. з векторним керуванням. Це сприятиме автоматизації відбору друкованої продукції і скороченню її браку. Орієнтуватися на застосування комп'ютеризованих зарубіжних електроприводів не варто, оскільки типові структури їх систем регулювання не пристосовані до вимог НВ і РРМ.

Із синтезованих нами варіантів приводів передусім доцільно реалізувати приводи постійного струму за системою ТПя–Д зі стабілізованими магнітними потоками двигунів і альтернативні їм асинхронні приводи за системою ПЧ–АД [1, 3]. Функціонально-структурні схеми цих приводів з відображенням сталих (с) і змінних (v) параметрів елементів подано на рис. 1, 2. Базові значення параметрів НВ, бобін, стрічок, двигунів і регуляторів наведено в табл. 1, 2.

У нижній частині прямокутників (рис. 1, 2), що умовно зображають елементи системи керування, вказано, якими способами ці системи інваріантизуються до варіацій параметрів параметричною компенсацією: розрахунками параметрів при граничних значеннях аргументів, від яких вони залежать (наприклад, від опорів обмоток нагрітих до 70°C електричних машин); стабілізацією (наприклад, магнітних потоків двигунів постійного струму, максимальних моментів асинхронних двигунів і коефіцієнтів передач ТПя і Пч); адаптацією регуляторів, особливо струмів статора АД, до зміни частоти f_s і напруги U_s , а також регуляторів швидкостей руху стрічок V_B до зміни радіусів R_B і моментів інерції J_B бобін. Необхідна і структурна адаптація регуляторів струму I_s АД і V_B до режимів заправки і намотування стрічок. Адаптуються й залежності електромагнітного моменту АД $M_E = f_1(\alpha, \gamma, R_2, \beta)$, до зміни $\alpha = f_s/f_{sN}$, абсолютного ковзання β відносної напруги $\gamma = U_s/U_{sN} = f_2(\alpha, \mu)$, залежності $I_s = f_3(\alpha, \gamma, \beta)$ до зміни α, β, γ і відносного моменту опору $\mu = f_3(M_{\text{опору}})$. Проблематичною є адаптація регуляторів F_C до нестабільності параметрів стрічок, особливо коефіцієнта k_C , що залежить від V_{RRM} та інших факторів [2]. Необхідно компенсувати негативний вплив інерційності стрічки з $T_C = 0,1 \dots 0,4$ с. Безлюфтовими (з $\alpha = 0$) бажані передачі від двигуна до НВ. Напруги $U_{ж}$ і $U_{мереж}$ живлення ЕОМ, ТП і ПЧ ($\Delta U_{\text{мер доп}} \approx 0,05 U_{MN}$) повинні бути стабілізовані.

У схемах керування приводами НВ застосовуються задавачі і ПІ-регулятори сил натягу стрічок F_C , ПІ-регулятори V_B і ПІ-регулятори струму якоря I_J (у системах ТП-Д) або I_s АД (у системах ПЧ-АД).

Безпосереднє вимірювання F_C створює певні проблеми. Визначення $F_C(t)$ за функцією $k_C(V_B(t) - V_{KRM}(t))/(T_C s + 1)$ недостатньо ефективне й надто інерційне. Краще визначати F_C за обчислюваним електромагнітним моментом двигунів M_{ED} з урахуванням його втрат ΔM_D і динамічних моментів $M_{дин} = d(J_s \omega_D)/dt$ ($2F_C = M_E/R_B = (M_E - \Delta M_D - M_{дин}) \cdot I_{ред}/R_B$). Однак точно виміряти радіуси бобін R_B також проблематично. Тому допустимо розраховувати R_B за формулами, поданими в схемах рис. 1, 2 і табл. 1. Частоту обертання двигунів ω_D необхідно визначати за інформацією імпульсних давачів обертів двигунів за час Δt . Лінійні швидкості V_B обчислюються за виразом $\omega_D \cdot R_B / I_{ред}$, а сумарний момент інерції привода – за формулою $J_s = J_0 + \Lambda_j \cdot R_B^4$. Отже, синтезовані приводи НВ можуть функціонувати і без давачів безпосереднього вимірювання R_B і F_C .

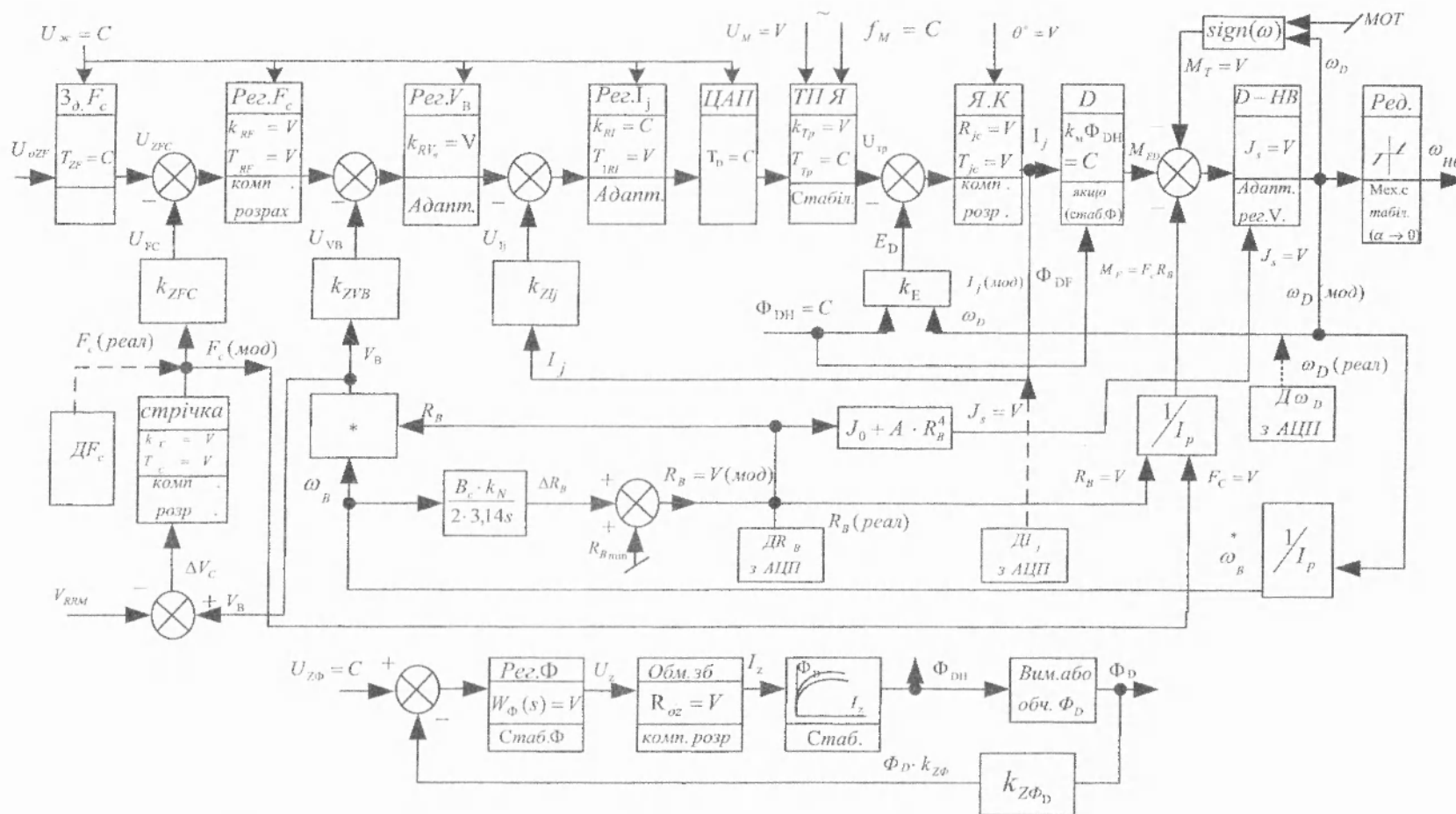


Рис. 1. Функціонально-технічна схема електропривода постійного струму НВ з індивідуальним джерелом якоря двигуна і зі сталими (с) та змінними (v) параметрами елементів

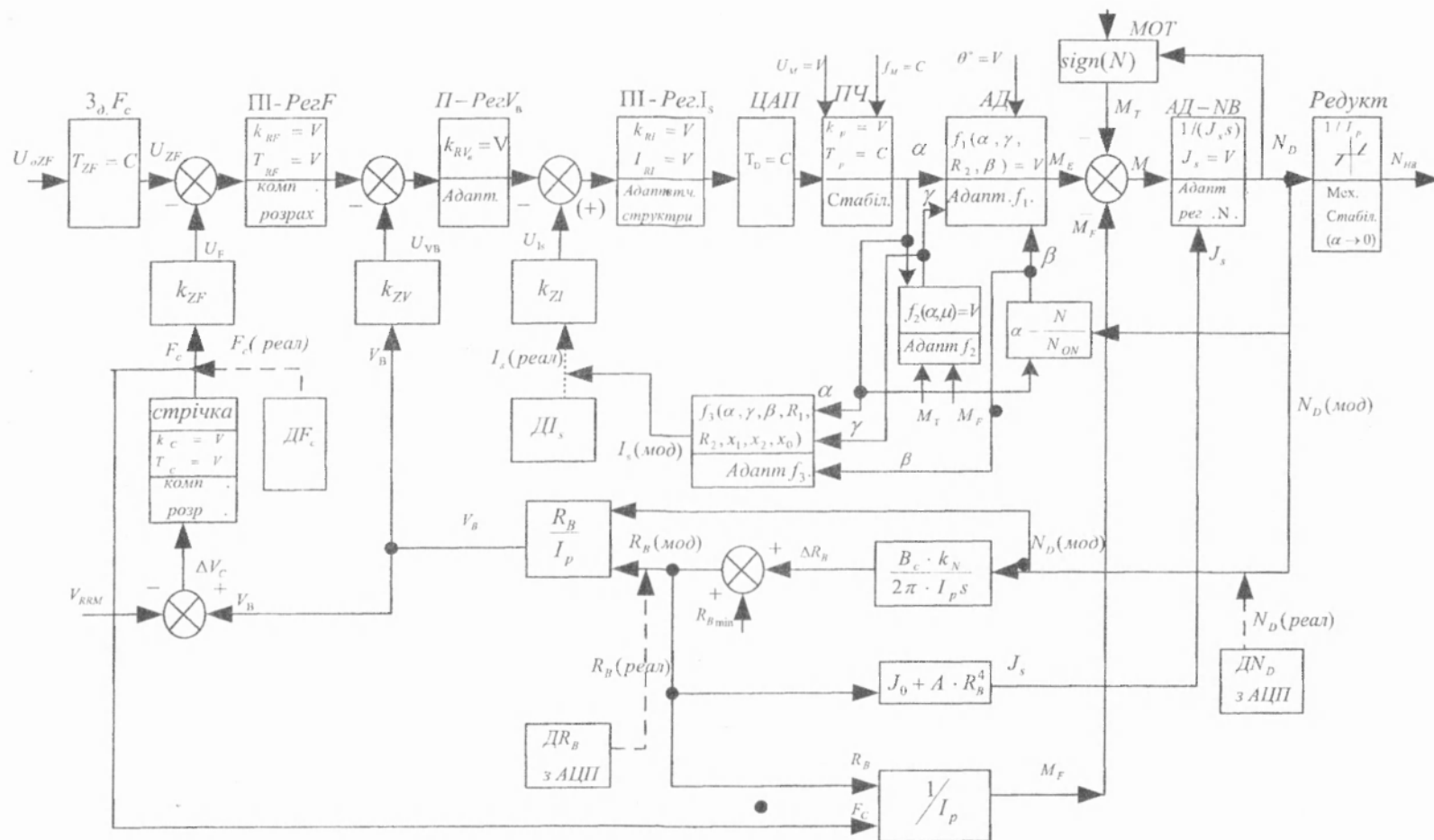


Рис. 2. Функціонально-структурна схема частотно-регульованого асинхронного привода НВ зі сталими (с) і змінними (v) параметрами елементів

Магнітні потоки Φ_D двигунів постійного струму повинні бути стабілізовані додатковими САР струмів їх збудження, а їх діючі значення в АД слід обчислювати за допомогою розроблених нами підпрограм процедур з іменами SPARAD, VRAPAD і KOORAD. Для стабілізації Φ_D двигунів постійного струму необхідна інформація про їх величину. Використовувати для вимірювання Φ_D вмонтовані в полюси двигунів давачі Холла не бажано, оскільки Φ_D є нелінійною функцією струму збудження I_z і залежить від реакції якоря, тобто від струму якоря I_j . Тому треба експериментально визначити функцію $\Phi_D = k_1 I_z - k_2 I_j$ для реалізації вимірювача резисторно-мостового типу [3] або програми обчислювання. Змінний магнітний потік АД може вимірюватись давачами Холла, тоді як вектор (його діюче значення Φ_{AD}) з двома проекціями на рухомі осі, що використовується у векторно-матричних моделях електромагнітної частини АД, доцільно вираховувати за формулою

$$\Phi_D = U_{SN} \cdot \gamma / (c_m \cdot f_{SN}) \cdot \sqrt{B(\beta) / A(\alpha, \beta)}, \quad (1)$$

де U_{SN} і f_{SN} – номінальна напруга і частота струму фази статора; $\gamma = U_s / U_{SN}$; $c_m = 4,44 W_s \cdot k_w$; W_s – кількість витків фазної обмотки статора; k_w – коефіцієнт намотування обмотки; $B = r_r^2 + x_r^2 \cdot \beta^2$; r_r і x_r – активний та індуктивний опір фазної обмотки ротора; $\beta = \alpha - \omega / \omega_{ON}$; $\alpha = \bar{I} / \bar{I}_{SN}$; ω і ω_{ON} – частота обертання ротора і магнітного поля (при $f = f_{SN}$); $A = (k_1^2 + k_2^2 \cdot \alpha^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot r_s \cdot r_r \cdot \alpha \cdot \beta + (k_3^2 + k_4^2 \cdot \alpha^2) \cdot r_r^2$; $k_1 = r_s (1 + x_r / x_0)$; $k_r = x_s + x_r + x_s \cdot x_r / x_0$; $k_3 = r_s / x_0$; $k_4 = 1 + x_s / x_0$; r_s і x_s – опори фазної обмотки статора; x_0 – опір контура намагнічування. Формула (1) враховує розсіювання Φ_D .

Струм фази статора

$$I_s = U_{SN} \cdot \gamma \cdot \sqrt{C(\beta) / A(\alpha, \beta)}, \quad (2)$$

де $C(\beta) = r_r^2 / x_0^2 + (1 + x_r / x_0)^2 \cdot \beta^2$.

Електромагнітний момент АД визначається за формулою

$$M_E = 3 U_{SN}^2 \cdot \gamma^2 \cdot r_r \cdot \beta / (\omega_{ON} \cdot A(\alpha, \beta)). \quad (3)$$

У процесі пусків та розгонів НВ до $V_{роо}$ (після заправки стрічок) $M_{опору} \approx \text{const}$ і прийняте регулювання ω_D за законом $U_s / f_s = \text{const}$, зокрема, коли $\gamma = \alpha$. При тому регулятор I_s функціонує з від'ємним зворотним зв'язком за I_s з коефіцієнтом k_{zls} і обмежує його величину до $I_{s\max} \approx 10 / k_{zls}$. В основному режимі – намотування стрічок $M_{опору} = R_s = \text{var}$, $P_{опору} \approx 2F_c \cdot V_B \approx \text{const}$, і необхідно забезпечувати $M_{АД\max} \geq 2F_c \cdot R_{B\max} / I_p$ при $\omega_{роб\min}$ і $\alpha_{роб\min}$. Цього можна досягти, змінивши знак зворотного зв'язку за I_s на додатний і значення його параметрів k_{RI} і T_{RI} на нові базові (з подальшою їх адаптацією) або не змінювати від'ємний зворотний зв'язок на додатний і регулювати U_s за формулою γU_{SN} , де $\gamma = f_2(\alpha, M_{от}, M_{кор})$:

$$\gamma = \sqrt{\frac{r_s \cdot \alpha + \sqrt{(k_1^2 + k_2^2 \alpha^2) \cdot (k_3^2 + k_4^2 \alpha^2)}}{r_s + \sqrt{(k_1^2 + k_2^2) \cdot (k_3^2 + k_4^2)}}} \cdot \sqrt{M_{от} / M_N + \frac{M_{кор}}{M_N} (\alpha_{роб\min} - \beta_N) / (\alpha - \beta_N)}, \quad (4)$$

де M_N і β_N – номінальні моменти й абсолютне ковзання АД; $M_{кор} = 2F_c \cdot R_{вi}/I_{ред}$; $M_{от}$ – втрати моменту M_D ; $\alpha_{роб. min} = \omega_{роб. min}/\omega_{DN} = V_{роб} \cdot I_p / (R_{вmax} \cdot \omega_{DN})$; $\beta_N = \alpha_N \cdot S_N$.
 $\alpha_i = \omega_i/\omega_{DN}$; $\omega_i = V_{роб} \cdot I_p / R_{вi}$.

Тому аргументи функцій f_1, f_2 і f_3 у схемі (рис. 2) підлягають зміні, і повинен адаптуватися регулятор I_s , у т.ч. структурно (якщо змінюється знак зворотного зв'язку за I_s).

Для практичних розрахунків базових параметрів регуляторів I_s і V_b , що підлягають адаптації в динамічних режимах руху АД і НВ, необхідні базові значення $k_{АД}$ і k_{ADM} , які визначаються за формулами

$$k_{АД} = I_s/U_s = \sqrt{C(\beta)/A(\alpha, \beta)}, \quad (5)$$

$$\text{де } \alpha_i = \omega_i/\omega_{DN}; \beta_i = \alpha_i \cdot S_i = \alpha_i - \omega_i/\omega_{DN}; \omega_i = V_{роб} \cdot I_p / R_{вi};$$

$$k_{ADM} = M_E/I_s = 3U_{SN} \cdot \gamma \cdot r_r \cdot \beta / (\omega_{ON} \sqrt{C(\beta)/A(\alpha, \beta)}). \quad (6)$$

Базові значення $k_{АД}$ і k_{ADM} доцільно визначати для основного робочого режиму – у процесі намотування стрічок на бобіни з R_b , близьким до $R_{вmax}$, тобто при $\alpha = \alpha_{роб. min}$; $\beta = \alpha_{роб. min} - \omega_{роб. min}/\omega_{ON}$; $\omega_{роб. min} = V_{роб} \cdot I_p / R_{вmax}$; $\gamma = f_2(\alpha_{роб. min}, \beta_N, M_{max})$. При застосуванні додатного зворотного зв'язку за I_s параметри регулятора I_s встановлюються графоаналітичним методом. Формули обчислення параметрів k_{RI} і T_{IRI} регулятора I_s (також нестабільні) наведено в табл. 2. У розрахунках допустимо брати наближені значення сталих часу T_s і T_r обмоток АД. Адаптувати k_{RI} і T_{IRI} ПІ-регулятора I_s при змінах α, β, γ і $M_{кор}$ вигідно за допомогою коригуючого коефіцієнта $K_{T_{IRI}}$, через n -вибраних тактів циклічних повторень програми керування приводом. Базове значення сталої часу інтегрування T_{IRI} регулятора I_s , а отже, і k_{RI} , що дорівнює T_{2RI}/T_{IRI} , де $T_{2RI} \approx T_s$, може бути сталим при розгоні після заправки й намотування стрічок. Оскільки (див. табл.2)

$$T_{IRI баз} = 2T_{\mu} \cdot k_{ПЧЗ} \cdot \gamma_{баз} \cdot U_{SN} \cdot k_{АД баз} \cdot k_{ZI}, \quad k_{T_{IRI}} = \gamma_i \cdot k_{АД i} / (\gamma_{баз} \cdot k_{АД баз}), \quad (7)$$

то $T_{IRI i} = T_{IRI баз} \cdot k_{T_{IRI i}}$, а $k_{RI i} = k_{RI баз} / k_{T_{IRI i}}$, де γ_i і $k_{АД i}$ розраховується за (4) і (5) при α_i, β_i і $M_{кор i}$. Аналогові регулятори адаптувати інструментально (змінюючи ємності конденсаторів і опори резисторів) практично неможливо. Тому аналогові регулятори I_s можуть функціонувати при $k_{RI баз}$ і $T_{IRI баз}$ без адаптації (неточно).

У системах цифрового керування асинхронними приводами НВ доцільно періодично через НІ або пНІ знаходити M_{Fi} для визначення $M_{Fi} = 2F_{ci} \cdot R_{вi}/I_p$, а отже, і F_{ci} . Для цього потрібно обчислювати $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ і I_{si} . Тому в робочих програмах можуть встановлюватися біжучі значення $T_{IRI i}$ і $k_{RI i}$ коригуючого коефіцієнта $K_{T_{IRI}}$. Однак початкові значення параметрів регуляторів I_s повинні бути задані за умов пускових режимів.

У приводах НВ за системою ТП-Д стала інтегрування ПІ-регулятора I_j вираховується за формулою $2T_{\mu} \cdot k_{TPJ} \cdot K_{ZIJ}/R_{JC}$ (див. табл. 1). Може визначатися при

$R_{JC} = R_{JC20^\circ} (1 + 0,04 \cdot 50^\circ)$ і не змінюватися в усіх режимах руху приводів. Коефіцієнт пропорційного регулювання k_{RII} дорівнює T_{2RI}/T_{1RI} і при зміні температури нагріву двигунів не змінюється, оскільки $T_{2RI} = L_{JC}/R_{JC}$, а $T_{1RI} = 1/R_{JCa}$.

Коефіцієнти пропорційного регулювання k_{RVB} П-регуляторів лінійних швидкостей руху стрічок на периферії бобін залежать від R_B і J_S (табл. 1, 2):

$$k_{RVB} = \frac{J_S \cdot k_{ZIJ} \cdot I_P}{2T_{\mu} \cdot k_M \cdot \Phi_{DN} \cdot R_B \cdot k_{ZVB}} \quad (8)$$

Оскільки R_B змінюється від 0,05 до 0,25 м, а $J_S = J_0 + A_J R_B^4 \cong A_J R_B^4$ ($J_0 \ll A_J R_B^4$), то величина $k_{RVB} = R_B^3$ повинна змінюватися і в динаміці – у $5^3=125$ разів (від k_{RVBmin} при R_{Bmin} до k_{RVBmax} при R_{Bmax}). Невідповідність значення k_{RVB} умові оптимізації контуру регулювання V_B може призвести не тільки до збільшення похибки регулювання, але й до нестійкого руху привода і НВ (структурної нестійкості системи). Базове значення k_{RVB} доцільно визначати при R_{Bmax} та J_{Smax} і коригувати його коефіцієнтом k_{KRVB} :

$$k_{KRVB} = R_{Bmax} \cdot J_{Si} / (R_{Bi} \cdot J_{Smax}); k_{RVBi} = k_{RVBbaz} \cdot k_{KRVB} \quad (9)$$

Без коригування регулятори V_B , наприклад аналогові, можуть використовуватися при середніх величинах k_{RVB} . Оскільки k_{RVB} залежить від магнітного потоку Φ_D , його необхідно стабілізувати. На рис. 1 зображена структурна схема стабілізації Φ_D двигуна постійного струму, що може визначатися давачем Холла або посередньо-мостовою резисторною схемою (рис. 3). Надійніше і точніше обчислювати Φ_D відповідною програмою за апроксимованими поліноміальними або кусочно-лінійними функціями (рис. 4) з урахуванням реакції якоря методом її трикутника.

Для підвищення точності і стабілізації параметрів ТПя і ПЧ (k_{TP} і $k_{ПЧ}$) застосовуються додаткові регулятори вихідних напруг і частоти струму (у схемах на рис. 1, 2 не показані).

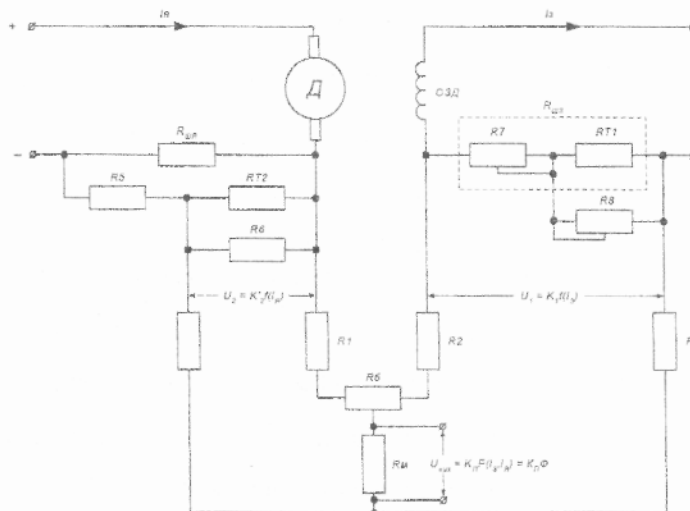


Рис. 3. Схема вимірювача магнітного потоку машини постійного струму

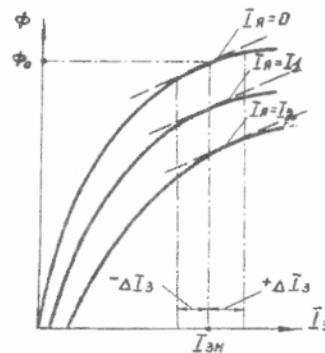


Рис. 4. Характеристики намагнічування машини постійного струму

Вихідною величиною оптимізованого контуру регулювання $\bar{I}_s$ АД є $\bar{I}_s$. Момент $M_{EAD} = k_{ADM} \cdot \bar{I}_s$, де $k_{ADM} = VAR$, і визначається за формулою (6). Коефіцієнт пропорційного регулювання V у системі керування АД

$$k_{RV} = J_s \cdot k_{ZI} \cdot I_p / (4T_\mu \cdot k_{ADM} \cdot R_B \cdot k_{ZV}), \quad (10)$$

і його базову величину можна визначити при R_{Bmax} , J_{Smax} і базовому значенні k_{ADM} , що дорівнює:

$$k_{ADM баз} = 3U_{SN} \cdot \gamma_{баз} \cdot r_t \cdot \beta_{баз} / (\omega_{ON} \sqrt{C(\beta_{баз}) \cdot A(\alpha_{баз}, \beta_{баз})}), \quad (11)$$

$$\text{де } \gamma_{баз} = f_2(\alpha_{роб min}, M_{кор max}); \alpha_{баз} = \alpha_{роб min}; \beta_{баз} = \alpha_{роб min} (1 - \omega_{роб min} / \omega_{ON});$$

$$\omega_{роб min} = V_{роб} \cdot I_p / R_{Bmax}.$$

Миттєве значення

$$k_{RVi} = k_{RV баз} \cdot k_{kRV} = k_{RV баз} \cdot \frac{J_{Si} \cdot R_{Bmax}}{J_{Smax} \cdot R_{Bi}} \cdot \frac{k_{ADM баз}}{k_{ADMi}}, \quad (12)$$

де k_{kRV} адаптує регулятор до змін R_B , J_s , α , β , γ і $M_{кор}$. На величину k_{RV} впливає в основному нестабільність R_B . Тому допустимо адаптувати регулятор V лише до зміни R_B , а їхні аналогові типи застосовувати з $k_{RV баз}$, визначеним при J_{Smax} , R_{Bmax} і $k_{ADM баз}$.

У схемах приводів НМ (рис.1, 2) відображено лише один спосіб визначення сили F_c за передавальною функцією стрічки $W_c(s) = k_c / (T_c s + 1)$; $\Delta V(t) = (V_B(t) - V_{RRM}(t))$;

$$F_c(t) = W_c(s) \cdot \Delta V(t). \quad (13)$$

Моделюванням приводів і НВ підтверджена недостатня ефективність цього способу. В схемах умовно зображено інші давачі (тензометричні, магнітоанізотропні, за провисанням стрічок) або обчислювальні засоби визначення F_c . З них на даний період найбільш прийнятними є програмні засоби (у формі підпрограм процедур) обчислення M_r на валах НВ за $(M_E - \Delta M_{втрат} - M_{дин}) \cdot I_p$ і R_B . У розроблених програмах цифрового моделювання приводів передбачено досить точне обчислення M_E і $M_{дин}$. Алгоритми визначення змінних втрат потужностей і моментів у двигунах постійного струму відомі. Відомі й методи, у т.ч. експериментальні, визначення втрат ΔP і ΔM_E в асинхронних двигунах.

Оскільки потужність двигунів НВ не більша 4 кВт, вони можуть бути досліджені в лабораторних умовах у режимах х.х. і завантажень, адекватних моментам опору НВ. Для цього потрібний навантажувальний пристрій НП потужністю близько 4 кВт (рис. 5), здатний імітувати типові закони зміни моментів опору $M_{оп}$ ($M_{оп} = const$; $M_{оп} = M_0 + k_1 \cdot \omega$; $M_{оп} = M_0 + k_2 \omega^2$; $M_{оп} = f(t)$; $M_{оп} = f(d\omega/dt)$). Подібні НП з аналоговою і мікропроцесорною системами керування МПСК великої потужності (до 150 кВт) створені та використовуються для досліджень двигунів внутрішнього згоряння і гідромеханічних передач автобусів у Львівському конструкторсько-експериментальному інституті автобусобудування, а малої потужності описані в [2]. Проблематично імітувати безперервну зміну моментів інерції бобін (дискретно імітують їх дисками, насаджуваними на вали НП). У намотувальних механізмах РРМ динамічні моменти, пропорційні $J_{нм}$ і $d\omega/dt$, не є домінуючими, оскільки $\omega_{нм}$ зменшується й радіуси бобін зростають відносно повільно. Тому допустимо імітувати $J_{сер}$ відповідними дисками на валах ЕП або НП.

Робочою програмою МПСК НП (з електромагнітною муфтою ковзання або машиною постійного струму з напівпровідниковими джерелами їх живлення [2]) необхідно формувати керуючу напругу на вході регулятора моменту опору $M_{оп}$ за законом $U_{кер} = U_0 + kR_v$, щоб забезпечити $M_{оп} = M_{от} + 2F_{сн} \cdot R_v / I_p$ (з від'ємним знаком на валу досліджуваного електропривода ЕП). У програмах моделювання досліджуваними приводами нами використовувались обчислення R_v за алгоритмом, наведеним у табл. 1. Необхідна також інформація про фактичне значення моменту опору навантажувального пристрою $M_{нп}$. Величину $M_{нп}$ навантажувальної машини постійного струму, що працюватиме з $\omega_{нм} = \omega_{сн} / I_p$ у генераторному режимі (за умови, якщо $I_p \geq 1$ і частота обертання ідеального х.х. $\omega_{онм} < \omega_{осп} / I_p$ (рис. 6), можна визначити за формулою

$$M_{нп} = M_{снм} + \Delta M_{нм} + M_{дин.нм} + \Delta M_{ред}, \quad (14)$$

де $M_{снм} = k_{м.нм} \Phi_{нм.н} \cdot I_{j.н}$; $\Delta M_{нм}$ і $\Delta M_{ред}$ – втрати моменту в НМ і редукторі; $M_{дин.нм} = d(J_{снп} \cdot \omega_{нм})$; $J_{снп}$ – момент інерції НМ і додаткових мас (дисків) на її валу. Момент

опору на валу досліджуваного електропривода $M_{оп} = M_{нп} / I_p$, а його сумарний момент інерції $J_{снп} = J_D + J_{ред} + J_{нп} / I_p^2$; $J_{ред} \approx 1,2 J_D$. Високоточна імітація $M_{оп}$, J_s і $M_{дин}$ намотувальних вузлів не обов'язкова, оскільки лише досліджувані їх приводи повинні з високою точністю ви-

значати фактичні значення $M_{оп}$ і регулювати ω_D за законом $P = M_{оп} \cdot \omega_D = const$ у процесі намотування стрічок; а в процесі розгону НВ момент опору наближено повинен дорівнювати $M_{оп.нм} \approx 2F_{сн} \cdot R_{в.нп} + M_{втрат}$. Важливо в лабораторних умовах експериментально дослідити

роботоздатність програм цифрового керування приводами. Для цього може бути використаний навантажувальний пристрій у двигунному режимі роботи та з додатковим генератором постійного струму на його валу й спрощеними засобами регулювання напруги і струму, наприклад, резисторними в якорному колі та колі обмотки збудження. Вигідними є завантажувальні машини, у т.ч. асинхронні з механічно незакріпленими статорами та важільно з'єднаними з ними гальмівними масами. Кут відхилення статорів таких машин від вертикальної осі пропорційний гальмівному моменту. Використовуються для завантажень і електромагнітні муфти ковзання, нормально обертаний статор яких частково загальмований. Однак у такому режимі муфти потрібно охолоджувати проточною водою.

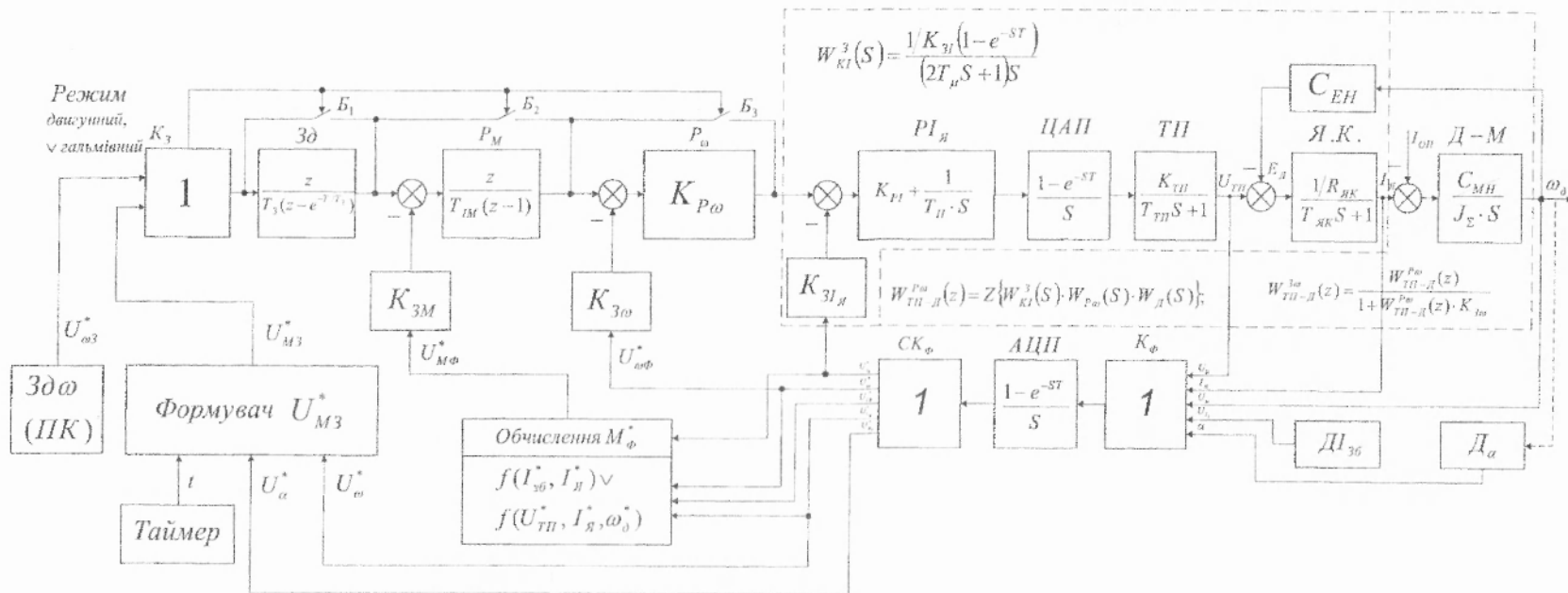


Рис. 5. Структурна схема навантажувального пристрою за системою ТП-Д з цифровою системою керування

У схемі універсального НП з цифровою системою керування (рис. 5) передбачено три регулятори – якорного струму, частоти обертання і моменту, інерційний задавач моменту або частоти обертання (якщо регулятор моменту заблокований). При імітації $M_{оп}$ намотувальних механізмів блокується регулятор частоти обертання, яку задає і регулює досліджуваний привод. При збільшенні R_v і $M_{оп}$ зменшується $\omega_{оep}$ і ω_{en} , що має дорівнювати $V_v/R_v \cdot I_p$ ($V_v = 1,01 V_{ккм}$), а також $\omega_{онм}$ у такій мірі, щоб забезпечити $M_{оп} = \frac{2F_{сн}}{R_v} \cdot \frac{I_p}{I_p}$ з від'ємним знаком (у генераторному режимі – рис. 6).

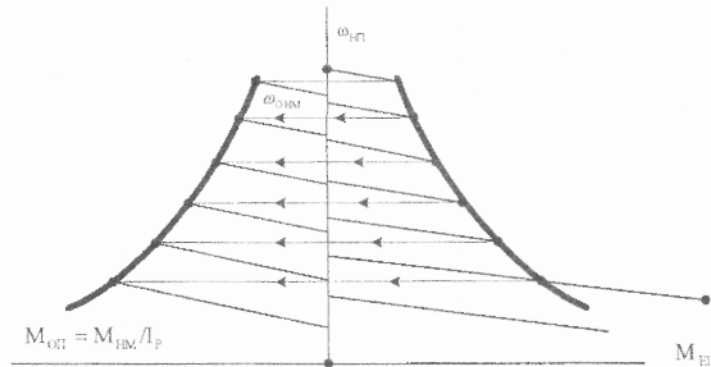


Рис. 6. Механічні характеристики досліджуваного електропривода НВ і НП

Крім намотування стрічок з $V_{роб}$, важливими є їх заправки й початковий пуск з розгоном і сповільненням НВ (від $\omega_{вроб min}$ при $R_{v max}$) до $\omega_{взапр}$. Після заправки стрічок НВ розганяються до $\omega_{вроб max}$, що дорівнює $V_{роб}/R_{v min}$. У всіх вказаних перехідних режимах необхідно регулювати струми якорів I_j або статорів I_s двигунів і швидкості руху стрічок V_v на периферії бобін, а після заправки стрічок – їх сили натягу F_c . При регулюванні струмів I_j або I_s , V_v і F_c використовуються від'ємні зворотні зв'язки за їх величинами, при тому k_{zi} і k_{zf} можуть мати такі ж значення, як і в режимах намотування ($k_{zi} = U_{пер.N}/(2I_N)$; $k_{zf} = U_{пер.N}/(2F_c)$ – двох стрічок), а k_{zv} до заправки повинно дорівнювати $U_{пер.N}/(1,01 V_{RRM запр})$, де $V_{RRM запр} \approx 0,2 \div 0,3$ м/с.

Оскільки Φ_D двигунів приводів за системою ТП-Д стабілізовані ($\Phi_D \sim \Phi_{DN}$), то значення T_{IRI} і k_{RI} регуляторів I_j можуть бути сталими і такими ж, як при намотуванні стрічок. Однак параметри регуляторів I_s АД необхідно обчислювати і змінювати, тому що вони залежать від k_{ADIs} , а $k_{ADIs} = f_3(\alpha, \beta, \gamma) = var$. Базові значення k_{ADIs} для пуску, розгону НВ і заправки стрічок доцільно обчислювати при $\alpha_{зaпр} = \omega_{D запр}/\omega_{DN}$, $\gamma_{зaпр} = \alpha_{зaпр}$ і $\beta_{зaпр} = \alpha_{зaпр} - \omega_{D запр}/\omega_{ON}$, а при сповільненні АД від $\omega_{D роб min}$ до $\omega_{D запр}$ використати $k_{ADIs баз}$, визначене для основного робочого режиму намотування стрічок. Базові значення T_{IRI} і k_{RI} залежать від k_{ADIs} і встановлюються за формулами (7). Їх величину допустимо не змінювати в

періоди пуску, розгону, сповільнення руху НВ і заправки стрічок. Після заправки стрічок базові і миттєві значення T_{IRI_i} і k_{RI_i} потрібно коригувати за допомогою k_{TIRI_i} .

Особливо важливо адаптувати регулятори V_B і F_c до перехідних процесів пуску і розгону НВ до $\omega_{B \text{ запр}}$ й подальшого їх розгону до $V_{\text{запр}}$, а також до сповільнення руху НВ від $V_{\text{роб}}/R_{B \text{ max}}$ до $V_{\text{запр}}/R_{B \text{ min}}$. У цих режимах регулятори F_c необхідно блокувати і використовувати їх задавачі на входи регуляторів V_B зі зменшеною напругою, величиною $V_{\text{запр}} \cdot I_p / (I_{R_{B \text{ min}}} \cdot \omega_{DN}) \cdot U_{\text{пер N}}$. Разом з тим потрібно збільшити коефіцієнт від'ємного зворотного зв'язку за V_B до $U_{\text{пер N}} / (1.01 V_{RRM \text{ запр}})$. У приводах за системою ТП-Д базове значення k_{RV_i} у режимах пуску і зміни ω_{NB} до $\omega_{NB \text{ запр}}$ становитиме $k_{RV \text{ баз}} = J_{\text{min}} \cdot k_{Zij} \cdot I_p / (4 \Gamma_{\mu} \cdot C_{MN} \cdot R_{B \text{ min}} \cdot k_{ZV \text{ запр}})$ і може використовуватись в період заправки як миттєві k_{RV_i} . При сповільненні руху НВ з максимально намотаними бобінами $J_s = J_{s \text{ max}}$, що, однак, лише збільшить час гальмування. Після заправки слід збільшити $k_{RV \text{ оаз}}$, оскільки $k_{ZV \text{ роб}} = U_{\text{пер N}} / V_{\text{роб}} < k_{ZV \text{ запр}}$, і в подальшому адаптувати регулятор V_B до зміни R_B .

У приводах за системою ПЧ-АД у перехідних процесах, пов'язаних з заправкою стрічок, $k_{ADM} = M_E / I_s$ і за $f_4(\alpha, \beta, \gamma) = \text{var}$. У періоди пуску, розгону і сповільнення руху НВ до $\omega_{NB \text{ запр}}$ може бути використане $k_{ADM \text{ запр}}$, визначене як $f_4(\alpha_{\text{запр}}, \beta_{\text{запр}}, \gamma_{\text{запр}})$ (11), де $\alpha_{\text{запр}} = \omega_{D \text{ запр}} / \omega_{DN} = \gamma_{\text{запр}}$, $\beta_{\text{запр}} = \alpha_{\text{запр}} - \omega_{D \text{ запр}} / \omega_{ON}$. Миттєві значення k_{ADM} у найбільш важливому режимі – заправки стрічок – наближено дорівнюють $k_{ADM \text{ оаз}}$. У режимах пуску і зміни α і ω_D миттєві значення k_{ADM} можуть значно відрізнитися від $k_{ADM \text{ баз}}$, але ці перехідні процеси здійснюються без стрічок (для більшої точності можна коригувати $k_{ADM \text{ оаз}}$). Отже, у перехідних процесах і при заправці стрічок k_{RV} має становити

$k_{RV \text{ запр}} = J_{\text{min}} \cdot k_{Zis} \cdot I_p / (4 \Gamma_{\mu} \cdot k_{ADM \text{ запр}} \cdot R_{B \text{ min}} \cdot k_{ZV \text{ запр}})$. Після заправки змінюється J_s, k_{ADM}, R_B і k_{ZV} і адаптуються регулятори до режиму намотування стрічок за формулами (11 і 12). Вступають у дію регулятори F_c , а на входи давачів F_c подається напруга, пропорційна F_c (10В при F_{CN}).

З вищевикладеного випливає, що необхідну точність (з похибкою $\leq 1\%$) стабілізації і синхронізації заданих швидкостей руху стрічок на периферіях бобін ($V_B = 1.01 \cdot V_{RRM}$) можна практично досягти за умов:

наявності ще більш точної інформації про частоти обертання, радіуси бобін і струми якорних I_j або статорних I_s обмоток двигунів НВ PPM;

програмної реалізації функцій задавачів і регуляторів сил натягу F_c і V_B стрічок, I_j (або I_s), алгоритмів обчислень V_B , моментів інерції J_B бобін і F_c за електромагнітними моментами двигунів з урахуванням втрат і динамічних моментів;

стабілізації магнітних потоків двигунів постійного струму і коефіцієнтів передачі напівпровідникових джерел живлення якірних або статорних обмоток двигунів НВ за допомогою додаткових САР;

точного обчислення базових значень сталих інтегрувань T_R і коефіцієнтів передачі k_R регуляторів оптимізованих контурів регулювання F_c, V_B і I_J (або I_s) з урахуванням нестабільності опорів обмоток і коефіцієнтів передач k_D двигунів (особливо асинхронних), а також I_B , параметрів k_c і T_c намотувальних стрічок;

коригування T_R і k_R у динаміці руху двигунів і НВ та адаптації (структурної й параметричної) регуляторів до режимів заправки і намотування стрічок, зміни параметрів двигунів, НВ і стрічок (особливо до $k_{AD} = \text{var}$, $R_B = \text{var}$, $J_B = \text{var}$ і $k_c = \text{var}$). При відсутності високоточних давачів R_B і F_c їх величини можуть обчислюватися з урахуванням статистично визначених товщин R_c , коефіцієнтів щільності намотування k_H і k_c стрічок.

Для серійного виготовлення вітчизняних транзисторних джерел живлення двигунів, у т.ч. перетворювачів частоти для АД, можуть використовуватися ТП серій ЕТ6, ЕТ3, ЕПУ1 і ПЧ серій ТПТР і АТЕ з аналоговими системами імпульсно-фазового керування. Їх аналогові задавачі і регулятори необхідно замінити й доповнити розробленими та апробованими нами підпрограмами цифрового керування. Орієнтуватися на застосування зарубіжних комп'ютеризованих перетворювачів не доцільно, оскільки їх програмне забезпечення не здатне реалізувати керування синтезованими приводами НМ РРМ. Прийнятними є вітчизняні двигуни загальнопромислового призначення серій ПБСТ і 4А, потужність яких необхідно обґрунтовувати для конкретних РРМ. Для цифрового керування двома приводами НМ може бути застосована сучасна мікро-ЕОМ будь-якого типу з 12 – 14-ма входами для аналогових напруг давачів і 4 – 6-ма виходами для керуючих напруг. Для керування приводами варто скористатися розробленими й апробованими нами програмами. Цифровим моделюванням підтверджена робоздатність синтезованих систем керування приводами НМ з регуляторами V_B і недостатня точність стабілізації F_c , якщо їх обчислювати за $F_c(t) = k_c [V_B(t) - V_{RRM}(t)] / (T_c s + 1)$.

Таблиця 1
ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ НАМОТУВАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ І ЇХ ПРИВОДІВ

Елемент системи і їх $W(s)$	Характеристики і формули обчислень параметрів елементів	Параметри	Од. вим.	Параметр при V_{RRM}		Пояснення базові
				2,5 м/с	10 м/с	
1	2	3	4	5	6	7
Намотув. механізм (вузли НВ), бобіна В, стрічки С $F_c(t) = k_c * 1/(T_c s + 1) * (V_B(t) - V_{RRM}(t))$	Два НМ з двома В на валах і $R_{Bmin}/R_{Bmax} = 0,05/0,25$ м/м; швидкість стрічки на бобині $V_B = 1,01 V_{RRM}$; сила натягу стрічок $F_c = k_c (V_B - V_{RRM})$; стала часу інерції $T_c = L_D / V_{RRM}$ ділянки стрічки між стрічкоживильною секцією і НВ. Момент натягу двох стрічок при R_{Bmax} $M_F = 2 F_c \cdot R_{Bmax}$; $P_{Fmax} = 2 F_c \cdot V_B$; $\omega_B = V_B / R_B$; діапазон $D_\omega = \omega_{max} / \omega_{min} = 1 = (12,5 \div 50) : 1$; у т.ч. при $P_F = \text{const}$ $D_\omega = R_{Bmax} / R_{Bmin} = 5 : 1$. Ширина $L_c = 0,25$ м і товщина $B_c = 0,0001$ м стрічки. Коеф. щільності намотування стрічок	V_B	м/с	2,52 5	10,1	$V_{запр} = 0,2$ м/с
		F_c	Н	20 ÷ 50	20 ÷ 50	базова 2,5 Н
		k_c	Н-с/м	200 0	500	
		T_c	с	0,4	0,1	при $L_D = 0,1$ м
		M_{Fmax}	Нм	12,5	12,5	при $F_c = 25$ Н
		P_{Fmax}	Вт	125	500	Корисна
		ω_{Bmax}	рад/с	50	200	при R_{Bmin}
		ω_{Bmin}	рад/с	4	4	при $V_{запр}$

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
	$k_{\text{нн}} = 1,05 \div 1,2$ Густина папе- $\rho_{\text{у}} = 700 \text{ кг/м}^3$. Радіус бобіни $R_{\text{вн}} = R_{\text{внн}} + \Delta R_{\text{вн}}$; $\Delta R_{\text{вн}} = \kappa_{\text{вн}} \cdot \frac{B_{\text{с}} \cdot k_{\text{н}}}{2\pi} \int \omega_{\text{н}} dt$ Момент інерції: НВ з валом і бобінами $J_{\text{нв}} = J_{\text{нво}} + A_{\text{нв}} R_{\text{в}}^4$; $J_{\text{нво}} = 0,01 \text{ кгм}^2$; $A_{\text{нн}} = 550 \text{ кгм}^{-2}$; сумарний з приводом: $J_{\text{с}} = 1,1 J_{\text{Д}} + J_{\text{нв}} I_{\text{р}}^2 = J_{\text{о}} + A_{\text{ж}} R_{\text{в}}^4$	$J_{\text{нвmax}}$ $I_{\text{р}}$ $J_{\text{о}}$ $A_{\text{ж}}$ $J_{\text{сmax}}$	кгм^2 — кгм^2 кгм^2 кгм^2	2,15 3 0,021 61 0,24 0,535	2,15 2 0,055 137 0,535	при $R_{\text{в}} = 0,25 \text{ м}$ $I_{\text{р}} = \omega_{\text{Д}} / \omega_{\text{нв}}$ $J_{\text{Д}} \approx 0,025$ $\div 0,05 \text{ кгм}^2$
Двигуни при- водів ТПя-Д	типу ПБС32 (33 і 43); $P_{\text{Н}} = 1,2(2,35, 4,3) \text{ кВт}$; $U_{\text{Н}} = 220 \text{ В}$ (усіх типів); $I_{\text{Н}} = 6,5(12,5, 22) \text{ А}$; $M_{\text{Н}} = 17,8(7,6, 14) \text{ А}$; $\omega_{\text{Н}} = 157(314, 314) \text{ рад/с}$; $J_{\text{Д}} = 0,025(0,032, 0,057) \text{ кгм}^2$; $R_{\text{ж}} = 2(0,42, 0,35) \text{ Ом}$; $I_{\text{max}}/I_{\text{Н}} = M_{\text{max}}/M_{\text{Н}} \approx 3$; $C_{\text{ЕН}} = C_{\text{МН}} / (U_{\text{Н}} - I_{\text{Н}} \cdot R_{\text{ж}}) \omega_{\text{Н}}$	тип	—	ПБ С32	ПБС 33 (або 43)	У дужках парамет- ри ПБС33 і 44
		$C_{\text{ЕН}} =$ / $C_{\text{МН}}$ /	В с Нм/А	1,32	0,685 (0,675)	ПБС43- для РРМ 3
		$T_{\text{ж}}$	с	0,01 5	0,033 (0,025)	$V_{\text{с}} = 15 \text{ м/с}$ ПБС33- для РРМ 3
		$\Phi_{\text{Н}}$	Вб	0,00 33	0,004	$V_{\text{с}} = 5 \text{ м/с}$ Стабілі- зований
		$I_{\text{ЗН}}$	А	0,3	0,25	3 САР $\Phi_{\text{Д}}$
ТПя; $W_{\text{ТР}}(s) = k_{\text{ТР}} / (T_{\text{ТР}} s + 1)$	Серій ЕТ3, ЕТ6, ЕПУ-1 3 $k_{\text{ТР}} = U_{\text{ТРН}} / U_{\text{керН}}$; $U_{\text{мН}} = 230 \text{ В}$; $U_{\text{ТР}}(t) = W_{\text{ТР}}(s) \cdot U_{\text{кер}}(t)$	$k_{\text{ТР}}$	В/В	25	25	В АСК $U_{\text{керН}} = 10 \text{ В}$
		$T_{\text{ТР}}$	с	0,005 ÷ 0,01		
Регулятор $I_{\text{ж}}$; $W_{\text{Рж}}(s) = k_{\text{Рж}}$ + $1 / T_{\text{ІРж}} s$	$T_{\text{ІРж}} = 2 T_{\mu} \cdot k_{\text{ТР}} \cdot k_{\text{ЗІ}} / R_{\text{жс}}$; $T_{\mu} = 0,005 \text{ с}$ $R_{\text{жс}} \approx 1,5 R_{\text{ж}}$; $k_{\text{Рж}} = T_{\text{2Рж}} / T_{\text{ІРж}}$; $T_{\text{2Рж}} = T_{\text{жс}} \approx 1,5 T_{\text{ж}}$; $k_{\text{ЗІ}} = i_{\text{ж}} / i_{\text{перН}} = 2 I_{\text{Н}}$; $U_{\text{перН}} = 10 \text{ В}$	$T_{\text{ІРж}}$	с	0,06 6	0,15 (0,1)	
		$k_{\text{Рж}}$	В/В	0,4	3,3 (0,4)	
		$k_{\text{ЗІ}}$	В/А	0,77	0,4 (0,22)	
Регулятор $V_{\text{Б}}$; $W_{\text{РВБ}}(s) = k_{\text{РВБ}}$	$k_{\text{РВБбаз}} = J_{\text{сmax}} \cdot k_{\text{ЗІ}} \cdot I_{\text{р}} /$ $/ (4 T_{\mu} \cdot C_{\text{МН}} \cdot R_{\text{Бmax}} \cdot k_{\text{ЗВБ}})$; $k_{\text{РВБ}} = k_{\text{РВБбаз}} \cdot k_{\text{КРВ}}$; $k_{\text{КРВ}} = J_{\text{с}} \cdot R_{\text{Бmax}} / (J_{\text{сmax}} \cdot R_{\text{Б}}) = \text{var}$	$k_{\text{ЗВБ}}$	В·с/м	3,96	0,99	3 адеп- тацією за допомо- гою $k_{\text{КРВ}}$
		$k_{\text{РВбаз}}$	В/В	22	125 (70)	
Регулятор $F_{\text{с}}$; $W_{\text{РФ}}(s) = k_{\text{РФ}}$ + $1 / T_{\text{ІРФ}} s$	$T_{\text{ІРФ}} = 8 T_{\mu} \cdot k_{\text{с}} \cdot k_{\text{ЗФ}} / K_{\text{ЗДВ}}$; $k_{\text{ЗФ}} = 10 / (2 F_{\text{сН}})$; $k_{\text{ЗДВ}} = 10 / \Delta V_{\text{Б}}$; $\Delta V_{\text{Б}} = 0,01 V_{\text{РРМ}}$; $k_{\text{РФ}} = T_{\text{с}} / T_{\text{ІРФ}}$	$k_{\text{ЗФ}}$	В/Н	0,2	0,2	при $F_{\text{с}} = 25 \text{ Н}$
		$k_{\text{ЗДВ}}$	В·с/м	400	100	Адапту- ється
		$T_{\text{ІРФ}}$	с	0,04	0,04	до $k_{\text{с}} = \text{var}$
		$k_{\text{РФ}}$	В/В	10	2,5	і $T_{\text{с}} = \text{var}$

Таблиця 2

Елементи системи і їх $W(s)$	Характеристики і формули обчислень параметрів елементів	Пара- метри	Од. вим.	Параметри при V_{RRM}		
				2,5 м/с	10 м/с	
Асинхронні дви- гуни АД серії 4А. Може викорис- товува-тись АД т. А42-6: $P_N = 1,7кВт$; $U_k = 220В$; $I_N = 3,7А$; $\omega_N = 98с^{-1}$; $M_N = 17,5 Нм$; $J_D = 0,015$ $r_s = 3,57 Ом$; $x_s = 6,7 Ом$; $r_r = 3,57 Ом$; $x_r = 11,2 Ом$; $x_o = 82,5 Ом$; $T_s \sim 0,08с$; $T_r \approx 0,083с$; $r_{rn} = 4,10 Ом$; $x_{,n} = 5 Ом$; $x_{,r} = 8,3 Ом$;	$P_N = 3U_{FN} \cdot I_{FN} \cdot \cos \varphi_N \cdot \eta_N$; $U_{FN} = 220 В$ (фази); $S = 1 - \omega / \omega_0$ (ковзан- ня); $\alpha = f / f_N$; $\beta = S \cdot \alpha$ (абсолютне ковзання); $\gamma = U_F / U_{FN}$; $\cos \varphi_N = 0,85; 0,87; (0,89)$; $I_{II} = (6 \div 6,5) I_N$; (абсолютні опори фазних обмоток статора r_s, x_s і ротора (приведені до статора) r_r, x_r ; $r_s = R'_1 \cdot U_{FN} / I_{FN}$; $r_r = R'_2 \cdot U_{FN} / I_{FN}$ (аналогічно x_s, x_r); $x_o \sim x_\mu \cdot U_{FN} / I_{FN}$. Ста- лі параметри (CPARAD): $k_1 = r_s(1 + x_r / x_o)$; $k_2 = x_s + x_r + x_r \cdot x_s / x_o$; $k_3 = r_s / x_o$; змінні параметри (VPARAD): $B = r_r^2 + x_r^2 \cdot \alpha^2$; $A = (k_1^2 + k_2^2 \cdot \alpha^2) \beta^2 + 2r_s \cdot r_r \cdot \alpha \cdot \beta + (k_3^2 + k_4^2 \cdot \alpha^2) r_r^2$; $C = r_r^2 / x_o^2 + (1 + x_r / x_o) \cdot (1 + x_r / x_o) \cdot \beta^2$; $D = r_r^2 / x_o^2 + x_r^2 / (x_o^2 \cdot \beta^2)$. Координати (КООПАРAD): $\Phi_s = U_{FN} \cdot \gamma \cdot \sqrt{B / A} / (C_m \cdot \Phi_{sN})$; Вб; $I_r = U_{FN} \cdot \gamma \cdot \beta \sqrt{A}$; А; $I_{k_{намаг}} = U_{FN} \cdot \gamma \sqrt{D / A}$; А; $k_{ADI} = I_s / U_{FN} = \gamma \sqrt{C / A}$; А / В; $k_{DM} = M_E / I_s = 3U_{FN} \cdot \gamma \cdot r_r \cdot \beta / (\omega_{ON} \sqrt{C \cdot A})$;	P_N I_{FN} ω_N M_N M_{MAX} M_{II} J_D R'_1 x'_1 R'_2 x'_2 x_μ x_o $c_m = 4,44 \cdot W_s \cdot k_w$ $E_s = U_{FN} \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \sqrt{B / A}$; В; $I_s = U_{FN} \cdot \gamma \cdot \sqrt{C / A}$; А; $M_E = 3U_{FN}^2 \cdot \gamma^2 \cdot r_r \cdot \beta / (\omega_{ON} \cdot A)$; Нм;	кВт А рад/с Нм Нм Нм кг·м ² В/о В/о В/о В/о Ом	V_{RRM} 2,5 м/с 10 м/с	1,5 3,2 145 10,7 2,6 22 0,002 0,12 0,078 0,069 0,12 1,9 $f(x_\mu, x_s, U_s, I_s)$ 440	2,2 4,7 290 7,4 18,5 15,5 0,003 0,076 0,05 0,049 0,087 2,7
	$\gamma = \sqrt{\frac{r_s \cdot \alpha + \sqrt{(k_1^2 + k_2^2 \cdot \alpha^2)(k_3^2 + k_4^2 \cdot \alpha^2)}}{r_s + \sqrt{(k_1^2 + k_2^2)(k_3^2 + k_4^2)}}} \cdot \sqrt{\frac{M_{втрм} + \frac{M_{кор}}{\alpha_{\text{поб min}} - \beta_N}}{M_{DN}}}$					

- Дурняк Б. В., Стрепко І. Т., Сорочинський О.М. Оптимізація систем керування намотувальними вузлами рулонних ротаційних машин: 36. наук. пр. ІПМС НАН України. К., 2003. Вип. 21. С. 189 – 201. 2. Сорочинський О., Дурняк Б., Стрепко І., Забрамний І. Оптимізовані системи керування приводами постійного струму намотувальних вузлів рулонних ротаційних машин // Комп'ютерні технології друкарства. Львів: УАД. 2004. №11, С. 3 – 19. 3. Сиротюк В., Сиротюк С., Забрамна І., Кравчук С. Обладнання і система керування стендовими дослідженнями двигунів внутрішнього згоряння і передач мобільних машин // Віс. Львів. держ. аграр. ун-ту. Агроінженерні дослідження. 2002. С. 286 – 297 4. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности: Пер. с сербск. и англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина М., 1972.