

## ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ РЕГУЛЬОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

**Вступ.** Існує широкий клас механізмів, обладнаних електроприводами (ЕП) на базі асинхронних двигунів (АД) з фазним ротором (крани, рольганги, маніпулятори, кантувачі і ін). Як правило, регулювання швидкості таких електроприводів реалізовано з використанням параметричних методів регулювання (реостатне – у роторному колі, фазове – напругою у статорному та ін.), які призводять до неефективного використання електричної енергії, що споживається (мале значення к.к.д. при глибокому регулюванні швидкості або коефіцієнта потужності при малих навантаженнях). До того ж ще й спотворюється форма напруги мережі через несинусоїдальність ЕП струмів. Тому задача розробки систем ЕП на базі таких двигунів, які були б позбавлені вказаних вище недоліків, є досить актуальною, особливо якщо розглядати це питання в плані енергозбереження.

**Постановка задачі.** Розробка та дослідження асинхронного ЕП на базі машини з фазним ротором – високодинамічного, енергозберігаючого, з широким діапазоном регулювання швидкості, електромагнітно сумісного з мережею живлення.

**Матеріали досліджень.** Функціональна схема ЕП наведена на рис. 1. До складу ЕП входять асинхронний двигун  $M$  з фазним ротором з датчиком швидкості  $BR$ , силовий перетворювач  $UM$  з системою керування  $SC$  і струмообмежувальними реакторами  $L1..3$ , датчики роторних струмів  $UA1..3$ , датчики  $UE$  е.р.с. ротора з задатчиком  $U$  форми роторних струмів, регулятори  $AA1..3$  фазних струмів ротора і швидкості  $AR$ .

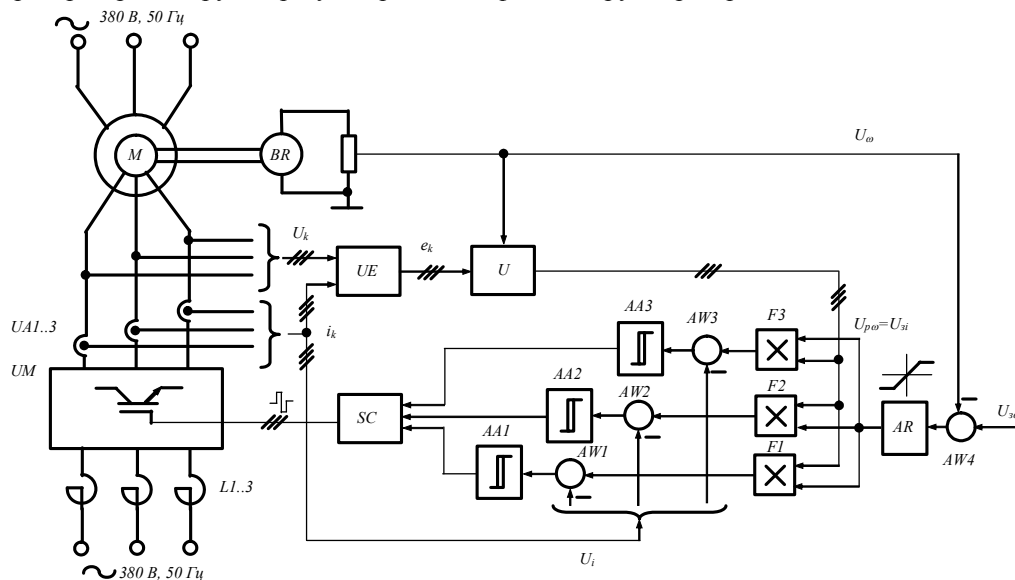


Рис. 1. Функціональна схема ЕП

Силовий перетворювач являє собою безпосередній перетворювач частоти з двостороннім обміном енергії між ротором  $M$  і мережею живлення, який працює в режимі джерела струму. Частоту роторного струму визначають роторні е.р.с., а амплітуди – аналоговий регулятор швидкості  $AR$ . Регулятори роторних струмів – релейні і забезпечують відстеження сигналу завдання синусоїдальної форми з частотою ковзання ротора. До складу  $UM$  входить і силовий активний фільтр на базі мостового модуля на  $IGBT$ -вентиліях, що забезпечує формування вхідних струмів перетворювача синусоїдальної форми, що співпадають за фазою з фазними напругами мережі.

Оскільки роторні струми формуються зовнішнім по відношенню до машини джерелом струму і вони співпадають за фазою з е.р.с. роторних обмоток, тобто є чисто «активними» (що формують момент), то АД можна розглядати як двигун постійного струму з незалежним збудженням.

У цьому випадку момент АД, не враховуючи втрату напруги збудження від протікання приведенного роторного струму  $I_p$  по обмотці статора ( $r_s, x_s$ ), можна записати так:

$$M = 3(C\Phi)_0 I_p = \frac{\sqrt{3}E_{pn}}{\omega_0} I_p, \quad (1)$$

де  $E_{pn}$  - номінальне значення лінійної роторної е.р.с., В;

$\omega_0$  - швидкість обертання магнітного поля,  $c^{-1}$ ;

$(C\Phi)_0$  - величина магнітного потоку в режимі холостого ходу, Вс.

У режимі навантаження АД магнітний потік зменшується за рахунок падіння напруги на активному  $r_1$  та індуктивному  $x_1$  опорах обмотки статора від роторного струму.

З достатньою точністю магнітний потік можна визначити так:

$$C\Phi \cong \frac{\left[ \left( \frac{E_{pH}}{\sqrt{3}} - I_p r_1' \right)^2 - (I_p x_1')^2 \right]^{1/2}}{\omega_0}, \quad (2)$$

де  $r_1'$ ,  $x_1'$  - приведені до роторних опори статорних обмоток ( $r_1' = r_1 / k_r$ ,  $x_1' = x_1 / k_r$ ), Ом;

$k_r$  - коефіцієнт приведення опорів ( $k_r = k_e k_i$ );

$k_e, k_i$  - коефіцієнти трансформації е.р.с. і струмів АД.

Механічні характеристики (МХ) АД мають вигляд «вертикальних» ліній, що зніходяться від осі швидкості на відстані:

$$M = 3C\Phi(U_{zi} / k_{\delta i}), \quad (3)$$

де  $U_{zi}$  - величина завдання на вході релейного регулятора струму, В;

$k_{\delta i}$  - коефіцієнт передачі датчика роторного струму, В/А.

При замиканні системи керування ЕП зворотнім зв'язком за швидкістю рівняння МХ буде мати вигляд (рис.2):

$$\omega = \frac{U_{3\omega}}{k_{\delta\omega}} - \frac{Mk_{\delta i}}{C\Phi k_{p\omega} k_{\delta\omega}}, \quad (4)$$

де  $k_{p\omega}$ ,  $k_{\delta\omega}$  - величини коефіцієнтів підсилення регулятора та датчика швидкості, Вс,

$U_{3\omega}$  - величина завдання на рівень швидкості, В.

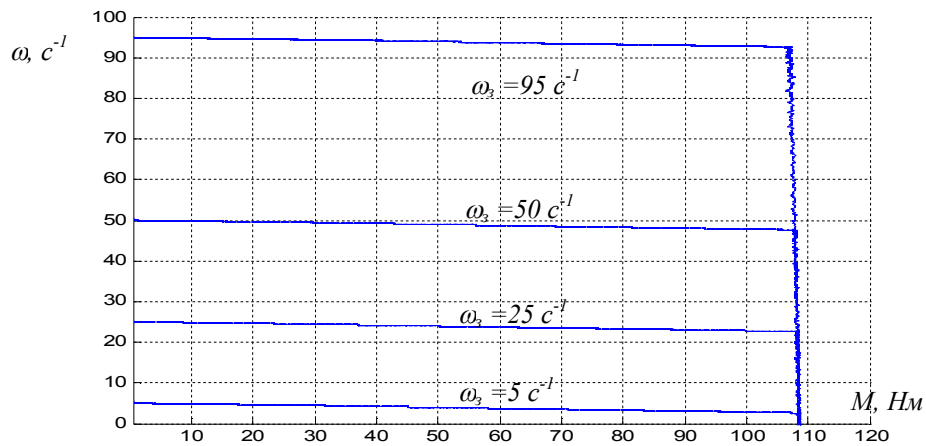


Рис.2. Механічні характеристики системи ЕП

При використанні ПІ-регулятора швидкості механічні характеристики будуть прямими, паралельними осі моменту ( $\omega = U_{3\omega} / k_{\delta\omega}$ ).

Математична модель такого ЕП має вид:

$$\left. \begin{aligned} U_j &= i_j r_1 + \frac{d\Psi_j}{dt}, \quad j = A, B, C \\ U_k &= i_k r_2 + \frac{d\Psi_k}{dt}, \quad k = a, b, c \\ M &= \frac{\partial W_e}{\partial \varphi_M} = \frac{3}{2} p_n \dot{\Psi}_1 \dot{I}_2 \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt} \\ U_k &= U_m \text{sign}[U_{p\omega} k_{\delta i} - i_k] \\ \dot{\Psi}_1 &= \dot{\Psi}_A + a \dot{\Psi}_B + a^2 \dot{\Psi}_C \\ \dot{I}_2 &= \dot{i}_a + a \dot{i}_b + a^2 \dot{i}_c \\ U_{p\omega} &= k_{p\omega} (U_{3\omega} - k_{\delta\omega} \omega) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $U_k$  – додаткові напруги, що вводяться в роторні кола релейними регуляторами струмів,  $B$ ;

$U_m$  – максимальне значення лінійної напруги мережі живлення,  $B$ ;

$\dot{\Psi}_1, \dot{I}_2$  – узагальнені вектори потокозчеплення статора і струму ротора,  $Bc, A$ ;

$a = e^{-j2\pi/3}$  – поворотний вектор;

$p_n$  – число пар полюсів обмоток АД;

$\Psi_j$  – повне потокозчеплення кожної з обмоток статора,  $Bc$ , наприклад:

$$\Psi_A = L_A i_A + M_1 i_B + M_1 i_C + M_{12} \cos \varphi \cdot i_a + M_{12} \cos(\varphi + 2\pi/3) \cdot i_b + M_{12} \cos(\varphi - 2\pi/3) \cdot i_c; \quad (6)$$

$L_A$  – повна індуктивність обмотки статора,  $Гн$ ;

$M_1$  – взаємна індуктивність обмотки статора з двома іншими обмотками статора,  $Гн$ ;

$M_{12}$  – взаємна індуктивність обмотки статора з обмоткою ротора при співпаданні їх осей,  $Гн$ ;

$\varphi = \int p_n \omega dt$  – електричний кут повороту роторних обмоток,  $рад$ .

Математичне моделювання повністю підтвердило усі теоретичні положення, що були покладені в основу розробки такого ЕП.

На рис. 3 подані результати моделювання динамічних режимів ЕП за математичною моделлю (5). У пускогальмівних режимах регулятори роторних струмів за завданням  $U_{zi} = U_{p\omega}$  на виході регулятора швидкості формують динамічний момент  $ЕП$ , якщо на вході  $AR$  вмикається задатчик інтенсивності швидкості. При цьому слід наголосити, що максимальний момент двигуна значно збільшується ( $M_m=110$  Нм при  $M_k=65$  Нм) і обмежується тільки можливостями вентильного перетворювача  $UM$ .

По суті запропонований ЕП є машиною подвійного живлення з прямим синхронним векторним керуванням без контролю просторового положення векторів потокозчеплень статора та ротора, оскільки вектори роторних е.р.с. «прив'язані» до вектора сумарного потоку у зазорі АД, а роторні струми – до відповідних е.р.с.

**Висновки.** Розроблений ЕП має дуже високу перевантажувальну здатність, тобто є високодинамічним. Він забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості. При цьому ЕП електромагнітно сумісний з мережею живлення, оскільки споживає практично синусоїдальні струми.

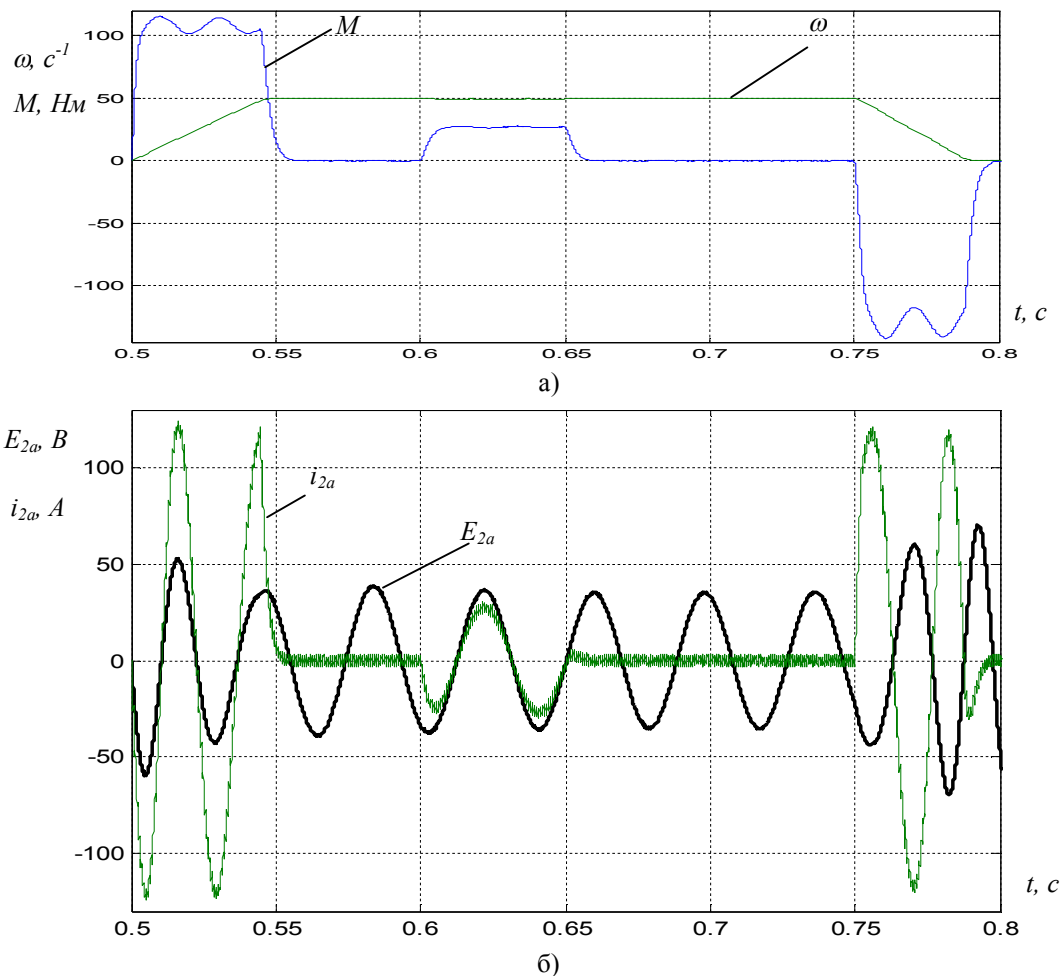


Рис. 3. Результати цифрового моделювання системи ЕП  
а) осцилограми моменту та швидкості; б) осцилограми роторних струмів та е.р.с.