

УДК 621.313

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІЙ СИСТЕМІ БАГАТОДВИГУННОГО ДВОШВИДКІСНОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА

Локтіонов Г.Л., магістр, Маренич К.М., Ph. D., канд. техн. наук, доцент  
(Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна)

Ознакою сьогодення є початок виробництва і застосування двошвидкісних електроприводів шахтних скребкових конвеєрів. Такі приводи будуються на основі використання двошвидкісних асинхронних електродвигунів як українського (Первомайський електромеханічний завод) так і закордонного виробництва. Переваги двошвидкісних електроприводів є безсумнівними (програмний пуск із ступенем низької швидкості, доставка вантажів у очисній вибір шахти на поменшеній швидкості сприяють значному підвищенню безпеки експлуатації конвеєрів). Але практика експлуатації вказує на виникнення специфічних процесів в електромеханічній системі конвеєра під час переключення швидкостей, які необхідно враховувати при проектуванні відповідної силової комутаційної апаратури.

При побудові математичної моделі асинхронного двигуна при включенні його в мережу розглядаємо симетричний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором і обмотками, виконаними за схемою «зірка» (рис. 1).

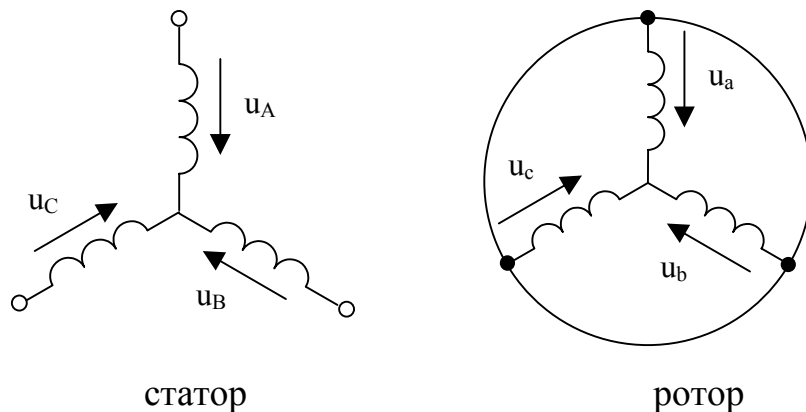


Рисунок 1 - Схема обмоток асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

При виборі рівня ідеалізації властивостей АД приймаємо наступні допущення:

- не враховуються втрати в сталі;
- робоче поле електричної машини вважається плоскопаралельним;
- враховуються тільки перші просторові гармоніки магніторушійної сили обмоток і магнітної індукції головного магнітного поля уздовж полюсного ділення;

- не враховуються насичення шляхів розсіювання і взаємний вплив потоків розсіювання і головного магнітного потоку.

Прийняті допущення приведуть лише до незначних погрешностей у кількісній оцінці процесів, що протікають в АД. Схема заміщення однієї фази АД при прийнятих допущеннях представлена на рис. 2. Виходячи з розуміння компактності і спрощення проміжних перетворень найбільш доцільною є векторно-матрична форма запису рівнянь моделі АД [1].

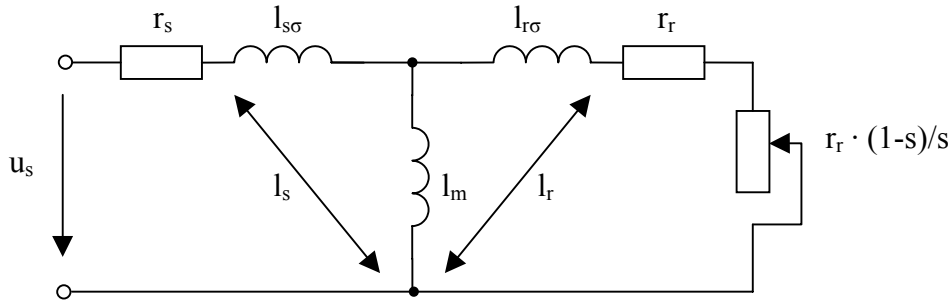


Рисунок 2 - Схема заміщення однієї фази асинхронного двигуна

Введемо алгебраїчні вектори-стовпці, складені з миттєвих значень напруг, струмів і потокозчеплень фазних обмоток статора і ротора:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_s^{Fs} &= [u_A \quad u_B \quad u_C]^T \\
 \mathbf{U}_r^{Fr} &= [u_a \quad u_b \quad u_c]^T = [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
 \mathbf{I}_s^{Fs} &= [i_A \quad i_B \quad i_C]^T \\
 \mathbf{I}_r^{Fr} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \\
 \Psi_s^{Fs} &= [\psi_A \quad \psi_B \quad \psi_C]^T \\
 \Psi_r^{Fr} &= [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^T
 \end{aligned} \tag{1}$$

Наведені вище вектори статорних перемінних стану представлені в базисі  $F_s$ , нерухомому щодо статора (рис. 3, а), а вектори роторних - у базисі  $F_r$ , фіксованому щодо ротора (рис. 3, б).

Рівняння рівноваги ЕРС на обмотках статора і ротора у відповідності з другим законом Кірхгофа в матричній формі мають вигляд [1]:

Для статора:

$$\mathbf{U}_s^{Fs} = r_s \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + p \cdot \Psi_s^{Fs}; \tag{2}$$

Для ротора:

$$\mathbf{U}_r^{Fr} = r_r \cdot \mathbf{I}_r^{Fr} + p \cdot \Psi_r^{Fr}, \tag{3}$$

де  $r_s, r_r$  – активні опори відповідно обмоток статора і ротора, Ом;  $p = d/dt$  – оператор диференціювання перемінних за часом  $t$ .

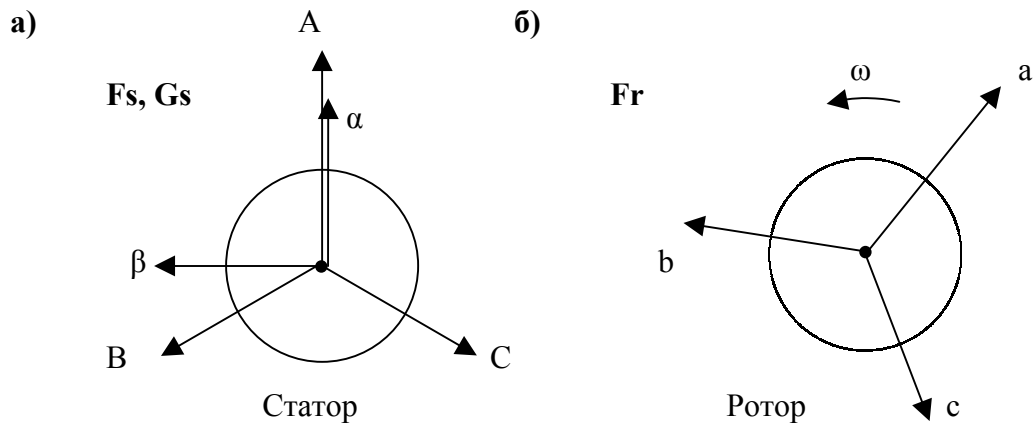


Рисунок 3 - Системи координат, використовувані для представлення векторів змінних стану електродвигуна

Взаємозв'язок поточозчеплень обмоток зі струмами, що протікають по них, визначається за законом Ампера. Для поточозчеплення фази А статора [2;3]:

$$\Psi_A = L_s i_A + M_s i_B + M_s i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c \quad (4)$$

де  $L_s$  – власна індуктивність обмоток статора, Гн;

$M_s$  – взаємна індуктивність між обмотками статора, Гн;

$M_{Aa}, M_{Ab}, M_{Ac}$  – взаємні індуктивності між фазною обмоткою статора й обмотками відповідних фаз ротора, Гн.

Аналогічно записуються поточозчеплення для п'яти інших обмоток статора і ротора. При обертанні ротора АД взаємні індуктивності між обмотками статора і ротора змінюються по періодичному закону. Це викликає появу у виразах для поточозчеплень (4) періодичних коефіцієнтів, значно ускладнюючих рівняння моделі АД.

Для того, щоб виключити періодичні коефіцієнти, приводимо змінні стану АД до єдиної системи координат  $F_s$ , нерухомої щодо статора (рис. 3, а). Рівняння рівноваги ЕРС і вираження для поточозчеплень АД у базисі  $F_s$  мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} U_s^{Fs} &= r_s \cdot I_s^{Fs} + p \cdot \Psi_s^{Fs} \\ U_r^{Fs} &= r_r \cdot I_r^{Fs} + p \cdot \Psi_r^{Fs} - z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_3 \cdot \Psi_r^{Fs} \\ \Psi_s^{Fs} &= l_s \cdot I_s^{Fs} + l_m \cdot I_r^{Fs} \\ \Psi_r^{Fs} &= l_m \cdot I_s^{Fs} + l_r \cdot I_r^{Fs} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $z_p$  – число пар полюсів обмотки статора;  $\omega$  – кутова швидкість ротора АД, рад/с;  $\mathbf{B}_3$  – матриця ортогонального повороту;  $l_s, l_r$  – повна індуктивність відповідно обмоток статора і ротора, Гн;  $l_m$  – взаємна індуктивність між статорними і роторними обмотками, Гн.

Вираз для матриці повороту:

$$\mathbf{B}_3 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Рівняння електромеханічного перетворення енергії в АД [1;2]:

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot l_m \cdot \text{mod}(\Psi_r \times \Psi_s)}{2 \cdot k}, \quad (7)$$

де  $M$  - електромагнітний момент, що розвивається АД, Н·м;  $k$  – коефіцієнт, що обчислюється за формулою:

$$k = l_s l_r - l_m^2 \quad (8)$$

Для повного опису електромеханічних процесів у АД рівняння (5) і (7) доповнюємо рівнянням механічної рівноваги моментів на валу АД:

$$p \cdot \omega = (M - M_c) / J_n \quad (9)$$

де  $M_c$  – приведений до вала ротора сумарний момент опору привода, Н·м;  $J_n$  – приведений до вала ротора момент інерції елементів привода, кг·м<sup>2</sup>.

Зважаючи на те, що фазні напруги мережі лінійно залежні, для подальшого спрощення моделі АД перейдемо від тривимірного базису  $F_s$  до двовимірного базису  $G_s$ , що лежить у площині поперечного перерізу АД (рис. 3, а). У базисі  $G_s$  вектора розкладаються по осі  $\alpha$ , що збігається з магнітною віссю фази "А", і ортогональній їй осі  $\beta$ . Перетворення координат векторів здійснюється множенням їх на матрицю перетворення  $\mathbf{A}_{FG}$  [1]:

$$\mathbf{A}_{FG} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Вектор напруги статора в базисі  $G_s$ :

$$\mathbf{U}_s^{G_s} = \mathbf{A}_{FG} \cdot \mathbf{U}_s^{F_s} = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta} \quad 0]^T. \quad (11)$$

Зворотнє перетворення здійснюється за допомогою матриці  $\mathbf{A}_{GF} = \mathbf{A}_{FG}^{-1}$ :

$$\mathbf{U}_s^{F_s} = \mathbf{A}_{GF} \cdot \mathbf{U}_s^{G_s} \quad (12)$$

Аналогічно здійснюються пряме і зворотне перетворення координат векторів інших змінних стану АД. Надалі будемо оперувати двомірними векторами змінних вигляду:

$$\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Система рівнянь математичної моделі АД у системі координат  $G_s$ , жорстко зв'язаної зі статором має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_s &= r_s \cdot \mathbf{I}_s + p \cdot \Psi_s \\ \mathbf{U}_r &= r_r \cdot \mathbf{I}_r + p \cdot \Psi_r - z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r \\ \Psi_s &= l_s \cdot \mathbf{I}_s + l_m \cdot \mathbf{I}_r \\ \Psi_r &= l_m \cdot \mathbf{I}_s + l_r \cdot \mathbf{I}_r \\ M &= \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} \\ p \cdot \omega &= (M - M_c) / J_n \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де  $\mathbf{B}_2$  – матриця ортогонального повороту двомірного вектора:

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Виразивши струми з перших двох рівнянь системи (14) і підставивши отримані вирази в третє і четверте рівняння, одержимо математичну модель АД у змінних  $\Psi_s - \Psi_r$ . Після підстановки виразу електромагнітного моменту в рівняння механічної рівноваги і перетворення отриманих рівнянь до вигляду, зручному для рішення чисельними методами, одержуємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} p \cdot \Psi_s &= \mathbf{U}_s - \frac{r_s \cdot l_r}{k} \Psi_s + \frac{r_s \cdot l_m}{k} \Psi_r \\ p \cdot \Psi_r &= z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r - \frac{l_s \cdot r_r}{k} \Psi_r + \frac{l_m \cdot r_r}{k} \Psi_s \\ p \cdot \omega &= \left( \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} - M_c \right) / J_n \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Початкові умови для системи рівнянь (16) при пуску двигуна:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_r \Big|_{t=0} &= \Psi_{r0}; \\ \Psi_s \Big|_{t=0} &= \Psi_{s0}; \\ \omega \Big|_{t=0} &= \omega_0, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

де  $\Psi_{r0}, \Psi_{s0}, \omega_0$  - параметри АД, що відповідають попередньому до включення режиму.

При пуску двигуна:

$$\Psi_{r0} = [0 \ 0]^T, \Psi_{s0} = [0 \ 0]^T, \omega_0 = 0 \quad (18)$$

Вирази для знаходження струмів за значеннями потокозчеплень:

$$\mathbf{I}_s = \frac{l_r}{k} \cdot \Psi_s - \frac{l_m}{k} \cdot \Psi_r \quad (19)$$

$$\mathbf{I}_r = \frac{l_s}{k} \cdot \Psi_r - \frac{l_m}{k} \cdot \Psi_s \quad (20)$$

При розгляді процесу відключення АД приймаємо допущення про те, що розрив усіх фаз статора відбувається одночасно.

Потокозчеплення ротора після відключення АД від мережі [2]:

$$\Psi_{r1} = \Psi_{r0} - r_r \cdot \int_0^{t_l} \mathbf{I}_r dt, \quad (21)$$

де  $\Psi_{r0}, \Psi_{r1}$  – вектори потокозчеплення ротора до і після комутації кола статора;  $t_l$  – тривалість комутації кола статора, с.

Завдяки тому, що відключення АД відбувається дуже швидко (наприклад, при використанні вакуумних контакторів) а величина активного опору ротора незначна, другим членом правої частини рівняння (21) можна зневажити. Таким чином, приймаємо:

$$\Psi_{r1} = \Psi_{r0}, \quad (22)$$

По закінченні вимикання струм статора дорівнює нулю, отже, з рівнянь (14) одержуємо:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{s1} &= l_m \cdot \mathbf{I}_{r1} \\ \Psi_{r1} &= l_r \cdot \mathbf{I}_{r1} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Підставляючи вираз (22) в систему рівнянь (23), одержуємо вирази для потокозчеплення статора після відключення АД:

$$\Psi_{s1} = k_r \Psi_{r0} = k_r \Psi_{r1}, \quad (24)$$

де  $k_r$  – коефіцієнт зв'язку ротора:

$$k_r = \frac{l_m}{l_r} \quad (25)$$

Підставляючи (24) в (16) одержуємо систему рівнянь математичної моделі АД після його відключення від мережі:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_s &= k_r \cdot \Psi_r \\ p \cdot \Psi_r &= z_p \cdot \omega \cdot B_2 \cdot \Psi_r - \frac{r_r}{l_r} \Psi_r \\ p \cdot \omega &= \left( \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} - M_c \right) / J_{\Pi} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Початкові умови для системи рівнянь (26):

$$\left. \begin{aligned} \Psi_r \Big|_{t=0} &= \Psi_{r0}; \\ \Psi_s \Big|_{t=0} &= k_r \cdot \Psi_{r0}; \\ \omega_r \Big|_{t=0} &= \omega_{r0} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Для дослідження перехідних процесів при пуску і переключенні швидкостей двошвидкісного асинхронного електродвигуна пропонується наступна математична модель двошвидкісного АД, яка у залежності від режиму живлення включає системи рівнянь статора і ротора відповідають поточному числу пар полюсів і змінюються при їхньому переключенні.

У даній роботі досліджувалася математична модель двошвидкісного АД типу ЕДКФВ315М12/4. Технічна характеристика цього двигуна наведена в таблиці 1, а параметри математичної моделі – в таблиці 2. В процесі пуску розглянутого АД значною мірою виявляється ефект витиснення струму ротора, тому активний опір  $r_r$  і індуктивність  $l_r$  обмотки ротора є функціями ковзання. При лінійній апроксимації експериментальних залежностей для розрахунку параметрів обмотки ротора були отримані вирази виду:

$$\left. \begin{aligned} r_r &= a_r \cdot |s| + b_r; \\ l_r &= a_l \cdot |s| + b_l, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

де  $a_r, a_l, b_r, b_l$ , - постійні коефіцієнти (табл. 2);  $s$  – ковзання АД.

Для розв’язання диференціальних рівнянь моделі був використаний метод Рунге-Кутта четвертого порядку з фіксованим кроком. Крок інтегрування був прийнятий рівним  $1/10$  періоду сіткової напруги:

$$h_i = \frac{1}{10 \cdot f_s} \quad (29)$$

Усі розрахунки й обробка результатів моделювання провадилися в програмі Mathcad.

На рисунку 4 наведені залежності електромагнітного моменту, фазного струму статора і частоти обертання від часу, а на рисунку 5 динамічна механічна

характеристика, що отримана в результаті моделювання прямого пуску двошвидкісного АД. Параметри моделі в процесі пуску є такими:

- 1) тривалість роботи на низькій швидкості:  $t_n = 0,4$  с;
- 2) тривалість безструмової паузи :  $t_0 = 0,05$  с;
- 3) тривалість роботи на високій швидкості:  $t_6 = 0,55$  с;
- 4) приведений момент інерції приводу  $J_n = 4$  кг·м<sup>2</sup>,
- 5) момент опору:  $M_c = 1200$  Н·м

Включення АД на високу швидкість провадилося в несприятливий момент часу при куті між векторами незагаслого потокозчеплення статора і напруги мережі  $\alpha \approx -\pi/2$  ел.град. Тривалість безструмової паузи приймалася виходячи зі швидкодії комутаційної апаратури.

Таблиця 1 - Технічна характеристика АД типу ЕДКВФ315М12/4

Найменування параметра	Од. вим.	Число полюсів	
		$2p = 12$	$2p = 4$
Номінальна потужність	кВт	65	200
Номінальна напруга	В	1140	1140
Номінальний струм	А	81	155
Частота струму	Гц	50	50
К.К.Д.	%	83,8	93,2
Сos φ	відн.одиниць	0,52	0,86
Частота обертання (номінальна)	хв <sup>-1</sup>	485	1485
$I_{пуск}/I_{ном}$	відн.одиниць	3,8	7,4
$M_{пуск}/M_{ном}$	відн.одиниць	2,8	2,3
$M_{макс}/M_{ном}$	відн.одиниць		3
$M_{мін}/M_{ном}$	відн.одиниць	2	2
З'єднання фаз статора		Y	Y

Таблиця 2 – Параметри математичної моделі електродвигуна ЕДКФВ315М12/4

Найменування параметра	Умовне позначення	Число полюсів	
		$2p = 12$	$2p = 4$
Амплітуда фазної напруги мережі, У	$U_{sm}$	660	
Частота мережі, Гц	$f_s$	50	
Активний опір обмотки статора, Ом	$r_s$	1,1	0,2
Коефіцієнти для розрахунку активного опору обмотки ротора, Ом	$a_r$	1,94	0,305
	$b_r$	0,4	0,085
Повна індуктивність обмотки статора, Гн	$l_s$	0,052	0,06
Коефіцієнти для розрахунку повної індуктивності обмотки ротора, Гн	$a_l$	-0,0161	-0,0025
	$b_l$	0,067	0,0625
Взаємна індуктивність статора-ротора, Гн	$l_m$	0,047	0,059
Момент інерції ротора, кг·м <sup>2</sup>	$J_r$	1,45	



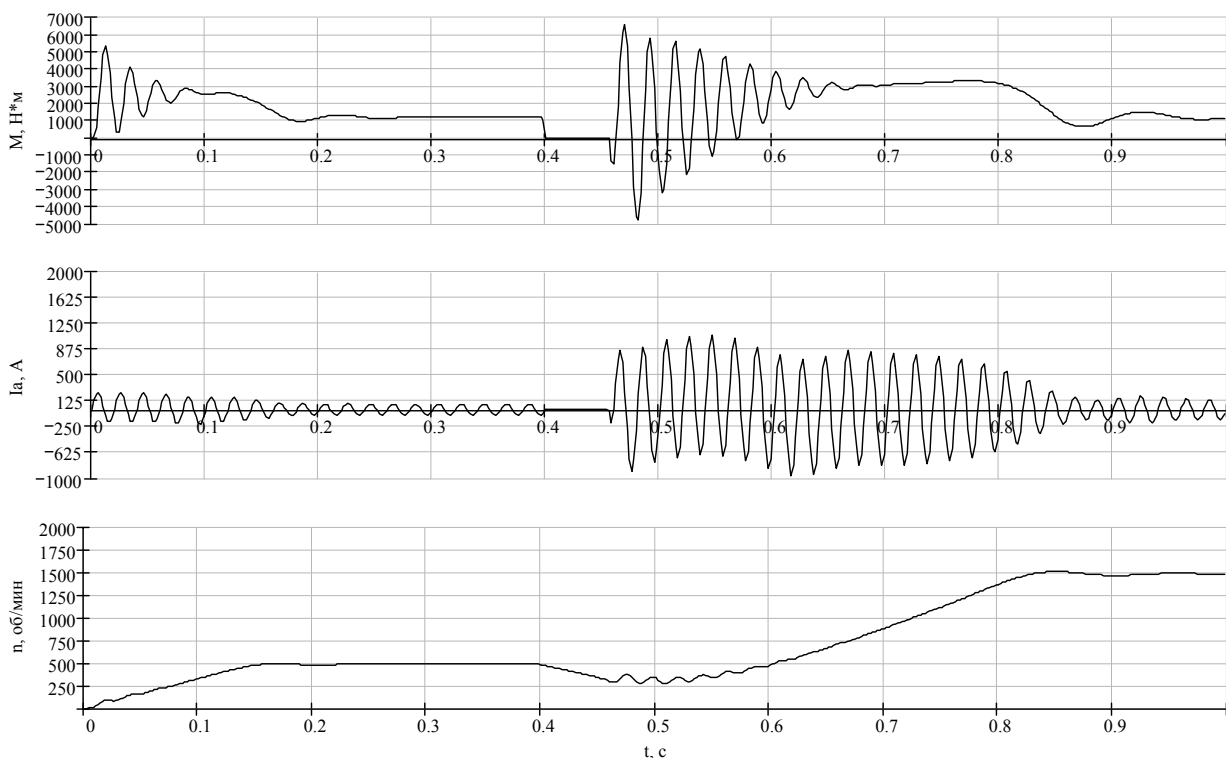


Рисунок 4 – Розрахункові осцилограми прямого пуску двошвидкісного асинхронного електродвигуна

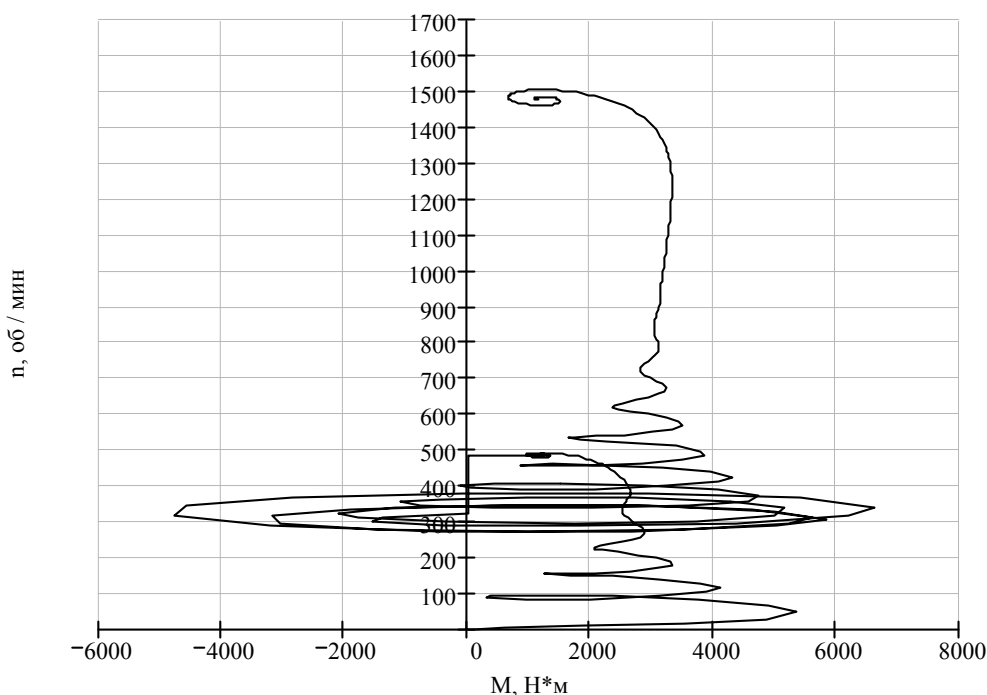


Рисунок 5 – Розрахункова динамічна механічна характеристика прямого пуску двошвидкісного АД

Характеристики (рис. 4; 5) показують, що процес переключення швидкостей двошвидкісного АД супроводжується значними коливаннями електромагнітного моменту. Амплітуда максимального піка моменту досягає 6,8 кН·м, що складає  $5,4M_{ном}$ . При великому приведеному моменті інерції ці

коливання мало відбиваються на динаміці приводу в цілому. Проведені дослідження показали, що включення АД на високу швидкість у більш слушний момент часу при  $\alpha \approx \pi/2$  ел.град приводить до незначного зменшення амплітуди максимального піка перехідного моменту до 5,2 кН·м.

Процес пуску АД при малому значенні приведенного моменту інерції приводу  $J_n = 1,45 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  і умовах, аналогічних попередньому дослідженню, показаний на характеристиках (рис. 6). У даному випадку після відключення двигуна від мережі уповільнення ротора АД йде більш інтенсивно, а також підвищена динаміка процесу переключення.

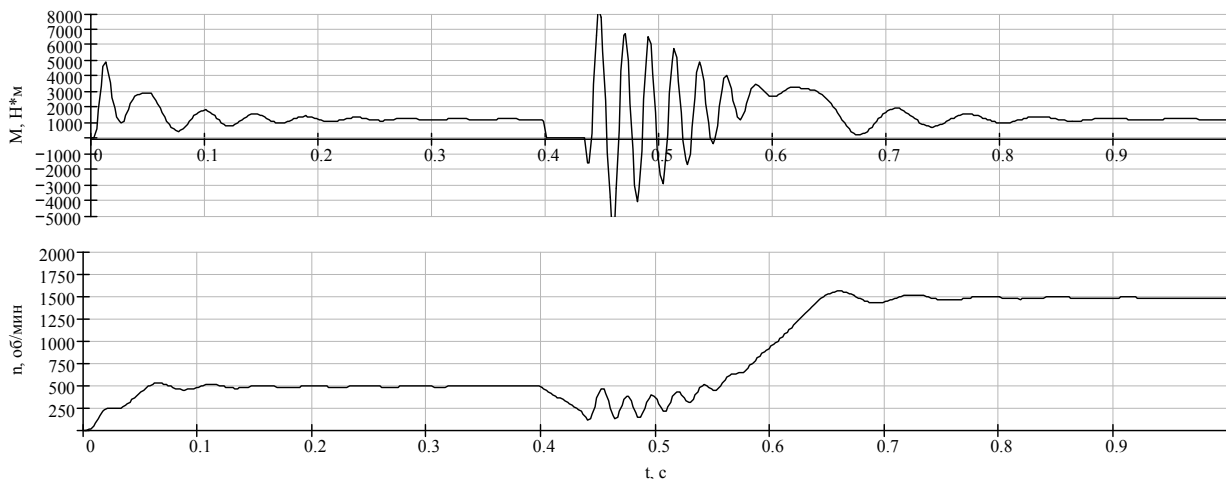


Рисунок 6 – Розрахункові осцилограми прямого пуску двошвидкісного асинхронного електродвигуна при малому моменті інерції приводу

Для обмеження перехідних моментів асинхронного електродвигуна при пуску і переключенні можна використовувати описаний раніше спосіб, що полягає в зменшенні швидкості наростання прикладеної напруги. Результати моделювання процесу пуску при реалізації даного способу наведені на рисунку 7. Прийнятий експонентний закон зміни прикладеної напруги з постійною часу  $T = 0,03\text{с}$ . Параметри моделювання:

- 1)  $U_s = U_{s0}(1 - e^{-t/0,03})$ ;
- 2) тривалість роботи на низькій швидкості:  $t_n = 0,4 \text{ с}$ ;
- 3) тривалість безструмової паузи :  $t_0 = 0,05 \text{ с}$ ;
- 4) тривалість роботи на високій швидкості:  $t_v = 0,55 \text{ с}$ ;
- 5) приведений момент інерції приводу  $J_n = 4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,
- 6) момент опору:  $M_c = 1200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Діаграми (рис. 7) підтверджують ефективність застосованого способу зниження перехідних моментів. Перехідні моменти при пуску практично відсутні, а їхня максимальна амплітуда при переключенні швидкостей знижується на 40%. Пусковий процес відбувається більш плавно, а тривалість розгону практично не змінюється, завдяки чому швидкість обертання ротора після переключення обмоток статора не знижується.

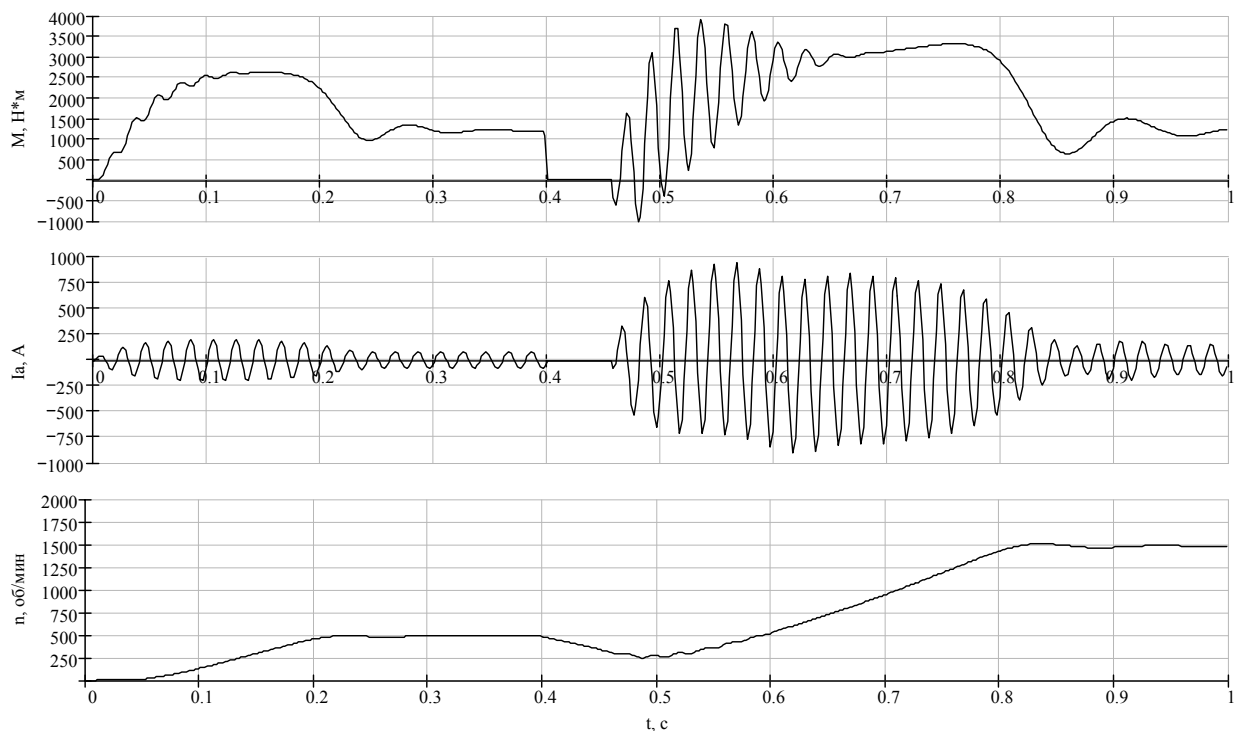


Рисунок 7 – Розрахункові осцилограми пуску двошвидкісного асинхронного електродвигуна при керуванні швидкістю наростання прикладеної напруги

#### Перелік посилань

1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000, -654с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320с.