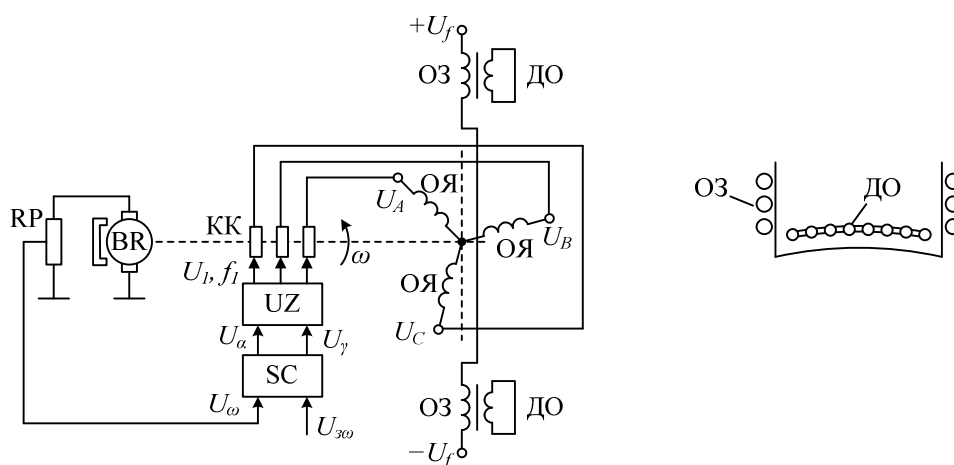


**Д. І. МОРОЗОВ**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри АЕМС, ДонДТУ, Лисичанськ;  
**І. С. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, проф., професор кафедри АЕМС, ДонДТУ, Лисичанськ

### АСИНХРОННІ РЕЖИМИ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА БАЗІ ЯВНОПОЛЮСНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ОБЕРНЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

У якірній обмотці нормальної машини постійного струму (МПС) при змінній швидкості протікають такі ж процеси, як і у якірній обмотці явнополіусної синхронної машини (СМ) оберненої конструкції при відповідному частотному управлінні останньою [1]. Відмінність лише в тому, що асинхронні режими в першій виникають тільки в динаміці, а в другій – при невідповідному управлінні частотою напруги ротора. Через те, що швидкість обертання магнітного потоку відносно якоря у першому випадку жорстко зв'язана з частотою обертання останнього завдяки колектору як перетворювачу частоти, а незалежний перетворювач частоти, що живить обмотку якоря, яка розміщена на роторі СМ, може мати частоту не жорстко пов'язану з частотою обертання ротора. Функціональна схема безколекторної машини постійного струму (БКМПС) показана на рисунку 1.



$U_{\omega 0}, U_{\omega}$  – сигнали завдання на рівень швидкості ротора та фактичної швидкості відповідно;

$U_{\alpha}, U_{\gamma}$  – сигнали управління частотою ( $U_{\alpha}$ ) та амплітудою ( $U_{\gamma}$ ) якірних напруг МПС;

$U_1$  ( $U_A, U_B, U_C$ ) – якірні напруги;  $U_f$  – напруга збудження;

SC – система керування; UZ – перетворювач частоти; BR – датчик швидкості ротора;

KK – контактні кільця; O3, OYA, DO – обмотки збудження, якоря, демпферна на полюсах відповідно

Рис. 1 Функціональна схема БКМПС

Асинхронні режими у двигуні протікають коли роторний магнітний потік (обмотки якоря) не є нерухомим у просторі, тобто рухається відносно ротора у зворотному напрямку або повільніше, ніж сам ротор.

У цих режимах на валу машини генерується декілька моментів, а саме:

1) взаємодією (трансформаторною) магнітного потоку якірних обмоток, що рухається у просторі, з обмоткою збудження (O3) і демпферними (DO), які знаходяться на нерухомих полюсах – так званий **асинхронний** момент;

2) взаємодією магнітних потоків полюсів і якірної обмотки – так званий **синхронний** момент;

3) взаємодією магнітного потоку якірної обмотки з явнополіусною конструкцією полюсів на статорі – так званий **реактивний** момент;

4) взаємодією магнітного потоку полюсів з замкненою рухомою якірною обмоткою – так званий момент **динамічного гальмування**.

При аналізі цих складових моменту приймемо такі спрощуючі припущення:

1) усі обмоткові параметри незмінні;

2) напруги перетворювача частоти синусоїдальні перемінної частоти  $f_1 = f_{1H} \cdot \alpha$  та амплітуди  $U_m(f_1)$ , де  $\alpha = f_1/f_{1H}$  – відносне значення цієї частоти;

3) магнітна система машини ненасичена;

4) магнітні потоки полюсів і якоря розподілені у просторі синусоїдально.

При прийнятих припущеннях вирази для вказаних складових моменту можна одержати, використовуючи принцип суперпозиції.

**Асинхронний момент** визначається активними втратами в замкненій обмотці збудження і демпферних від рухомого у просторі якірної потоку. Виходячи з теорії двох реакцій, вторинну систему ОЗ та ДО при розрахунках можна подати різними опорами по повздожній і поперечній осях відповідно:  $r_f$ ;  $x_f \cdot \alpha$ ;  $r_{Dd}$ ;  $x_{Dd} \cdot \alpha$ ;  $r_{Dq}$ ;  $x_{Dq} \cdot \alpha$ . Схема заміщення для цього випадку наведена на рисунку 2. Ключ К забезпечує замкнений або розімкнений стан ОЗ (без струму збудження). На схемі позначено:

$r_1$ ,  $x_1$  – активний та реактивний (від потоку розсіяння при номінальній частоті  $f_{1H}$ ) опір якірної обмотки;

$x_{ad}$ ,  $x_{aq}$  – реактивні опори якірної обмотки від робочого потоку по повздожній та поперечній осях відповідно ( $f_1 = f_{1H}$ );

$r_f$ ,  $x_f$  – активний та реактивний опори обмотки збудження;

$r_{Dd}$ ,  $x_{Dd}$ ,  $r_{Dq}$ ,  $x_{Dq}$  – активні та реактивні опори демпферної обмотки по повздожній і поперечній осях відповідно.

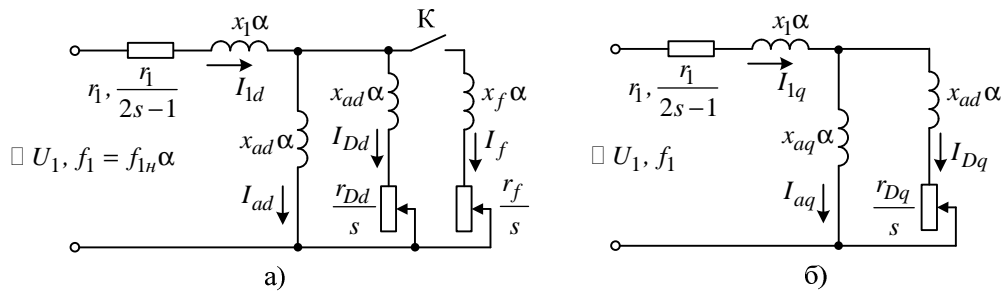


Рис. 2 Схема заміщення для розрахунку асинхронного моменту:  
а – по повздожній осі «d»; б – по поперечній осі «q»

Оскільки вторинна система (ОЗ, ДО) несиметрична, то пульсуючі поля цих обмоток приходиться розкласти на рухомі поля з прямим слідуванням і зворотнім та розглядати їх дію окремо. Опори  $r_1$  і  $r_1 / (2s - 1)$  якраз і відповідають такому підходу (перше – прямому, друге – зворотному).

Необхідно наголосити, що оскільки реалізується частотне регулювання двигуном, то раціонально використовувати не відносне ковзання  $s = \Delta\omega / \omega_0$ , а абсолютне  $\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{0H}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0 / \alpha} = s\alpha$ .

Виходячи із схеми заміщення (рис. 2), напруги на намагнічувальному контурі якірної обмотки машини (ЕРС  $E_d$ ,  $E_q$ ), а значить, і на еквівалентних обмотках полюсів по відповідних осях, що приведені до числа витків і частоти двофазної обмотки якоря, можна подати так:

$$\begin{cases} \dot{E}_d = \dot{E}_1 + \dot{E}_3 = Z_{ad1} \cdot \dot{I}_1 + jZ_{ad3} \cdot \dot{I}_3; \\ \dot{E}_q = -j\dot{E}_1 + j\dot{E}_3 = -j\dot{I}_1 \cdot Z_{aq1} + j\dot{I}_3 \cdot Z_{ad3}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\dot{E}_1$ ,  $\dot{I}_1$ ,  $Z_{ad1}$  – ЕРС, струм і опір прямого слідування;

$\dot{E}_3$ ,  $\dot{I}_3$ ,  $Z_{ad3}$  – ЕРС, струм і опір зворотного слідування;

$$Z_{ad1} = Z_{ad3} = Z'_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{ad} \cdot \alpha} + \frac{1}{\frac{r_a}{s} + jx_{ad} \cdot \alpha} + \frac{1}{\frac{r_{Dd}}{s} + jx_{Dd}}}; \quad (2)$$

$$Z_{aq1} = Z_{aq3} = Z'_{aq} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq} \cdot \alpha} + \frac{1}{\frac{r_{Dq}}{s} + jx_{Dq} \cdot \alpha}}. \quad (3)$$

Тоді складові якірної струму одержимо у такому вигляді:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_d + j\dot{I}_q}{2}; \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{I}_d - j\dot{I}_q}{2}, \quad (4)$$

а ЕРС

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = i_1 \frac{Z'_{ad} + Z'_{aq}}{2} + i_3 \frac{Z'_{ad} - Z'_{aq}}{2}; \\ \dot{E}_3 = i_1 \frac{Z'_{ad} - Z'_{aq}}{2} + i_3 \frac{Z'_{ad} + Z'_{aq}}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Напряга  $\dot{U}_1$ , що підводиться до яірної (роторної) обмотки, має, природно, пряме слідування, частоту  $f_1 = f_{1H} \cdot \alpha$  синусоїдального характеру та врівноважена ЕРС  $\dot{E}_1$  і падінням напруги від струму  $\dot{I}_1$  прямого слідування:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1 \cdot \alpha). \quad (6)$$

Падіння ж напруг від струму зворотного слідування  $\dot{I}_3$ , що мають частоту  $f_1(2s-1)$ , врівноважені ЕРС  $\dot{E}_3$ , тобто:

$$0 = \dot{E}_3 + \dot{I}_3 \left( \frac{r_1}{2s-1} + jx_1 \cdot \alpha \right). \quad (7)$$

Використовуючи (1–6), виразам складових струмів яірних обмоток, можна надати такого вигляду:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{Z'_{d3} + Z'_{q3}}{Z'_{d1}Z'_{q3} + Z'_{d3}Z'_{q1}}; \\ \dot{I}_3 = -\frac{Z'_{d1} - Z'_{q1}}{Z'_{d3} + Z'_{q3}} \dot{I}_1, \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{де } Z'_{d1} = Z'_{ad} + r_1 + jx_1 \cdot \alpha; \quad Z'_{q1} = Z'_{aq} + r_1 + jx_1 \cdot \alpha; \quad (9)$$

$$Z'_{d3} = Z'_{ad} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_1 \cdot \alpha; \quad Z'_{q3} = Z'_{aq} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_1 \cdot \alpha. \quad (10)$$

Момент на валу машини є сумою двох складових:

$$M_a = M_1 + M_2 = I_1^2 \frac{r'_{2e}}{s} + I_3^2 \frac{r_1}{2s-1}, \quad (11)$$

де  $r'_{2e}/s$  – дійсна частина комплексу еквівалентного опору  $Z'_{2e}$  обмоток на головних полюсах машини:

$$Z'_{2e} = \frac{1}{2} \left[ (Z'_{ad} + Z'_{aq}) - \frac{(Z'_{ad} - Z'_{aq})^2}{Z'_{d3} + Z'_{q3}} \right].$$

**Взаємодію** магнітних потоків яірної обмотки та збудження (так званий **синхронний момент**) можна описати відомою формулою

$$M_{cx} = \frac{3}{2} p_n \frac{x_{ad}}{\omega_{0H}} \bar{I}_1 \cdot \bar{I}_2, \quad (12)$$

де  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  – узагальнені вектори струмів вказаних обмоток відповідно.

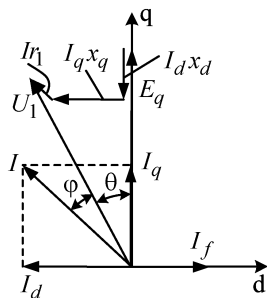


Рис. 3 Векторна діаграма БКМПС з врахуванням активного опору статора

Оскільки векторний добуток вимагає знання просторового кута між потоками, то його можна визначити з векторної діаграми (рис. 3). З неї можна визначити величини струмів яірної обмотки по осях «d» і «q» [2]:

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{Z_d} [U_1 \cos(\theta + \delta) - E_0 \cos \delta]; \\ I_q = \frac{1}{Z_q} [U_1 \sin(\theta + \delta) - E_0 \sin \delta], \end{cases} \quad (13)$$

де  $E_0$  – величина ЕРС, що наводиться в обмотці якоря потоком ОЗ;

$Z_d$  – величина опору яірної обмотки по осі «d» в режимі к.з.,

$$Z_d = \sqrt{r_1^2 + (x_d \alpha)^2}, \quad \sin \delta = r_1 / Z_d, \quad \cos \delta = x_d \alpha / Z_d.$$

Величину кута  $\delta$  можна сприйняти як показник впливу  $r_1$  на синхронний момент. В реальних БКМПС ця величина не перевищує  $15^\circ \div 20^\circ$  при номінальній частоті.

Фактично величина моменту  $M_{cx}$  визначається електромагнітною потужністю, що «працює» в зазорі:

$$M_e = P_e / \omega_0; P_e = P_\delta - \Delta P_1 = mU_1 I_1 \cos \phi_1 - mI_1^2 r_1, \quad (14)$$

де  $P_\delta$ ,  $\Delta P$  – активна потужність, що споживається машиною від джерела та втрати в її якірній обмотці відповідно,

$$\Delta P = \frac{3}{Z_d} [U_1^2 - E_0^2 - 2U_1 E_0 \cos \theta] \sin \delta; \quad (15)$$

$$M_{cx} = \frac{3}{Z_d} [U_1 E_0 \sin(\theta + \delta) - E_0^2 \sin \delta]. \quad (16)$$

Як видно з (16) кут  $\delta$ , тобто наявність  $r_1$ , «зсовує» криву  $M_{cx}(\theta)$  вліво та вниз в область генераторних (гальмівних) моментів. Враховуючи, що максимальний генераторний момент за рахунок втрат в якірній обмотці більший ніж двигунний, середнє значення  $M_{cx}$  за кожний оберт ротора буде мати гальмівний характер. Необхідно наголосити, що кут  $\theta$  при асинхронному русі ротора є функцією не тільки навантаження, а й швидкості ротора ( $\theta = p_n \omega t$ ) та часу. Тому  $M_{cx}$  машини при перемінній швидкості буде мати пульсуючий характер зі змінною частотою  $f_m = p_n \omega / 2\pi = var$  (рис. 4). На рисунку 4 наведені залежності змінення синхронного момента від часу при різних фіксованих частотах напруги живлення і швидкостях з забезпеченням незмінного абсолютного ковзання. При розрахунку якости електричних параметрів БКМПС прийняті значення параметрів синхронного двигуна СМ 136-8 ( $P_n = 146$  кВт,  $n_n = 750$  об/мин,  $U_n = 380$  В,  $I_n = 312$  А,  $J = 21,75$  кгм<sup>2</sup>). Струм обмотки збудження машини прийнято номінальним (тобто ЕРС  $E_0$  пропорційна швидкості обертання ротора,  $\omega^* = \alpha - \beta$ ). Закон змінення напруги якоря прийнято пропорційним частоті  $U_1 \equiv \alpha$ .

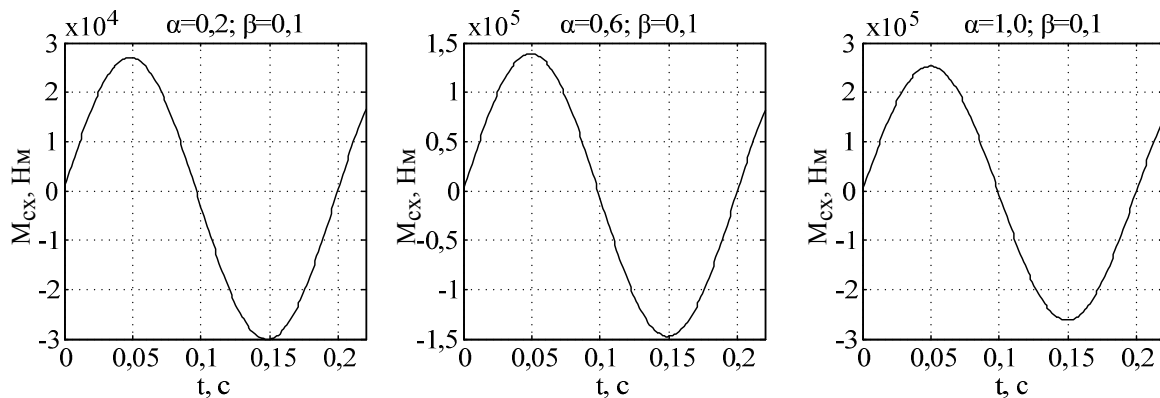


Рис. 4 Процеси змінення синхронного моменту при  $\beta = 0,1$  і різних  $\alpha$

**Реактивний момент  $M_p$** , що генерується взаємодією потоку якоря з магнітопроводом статора машини, що має явнополюсну конструкцію, визначається також електромагнітною потужністю в зазорі. Використовуючи попередній підхід, після перетворень маємо

$$M_p = \frac{3}{\omega_0} \left[ \left( \frac{E_{qq}}{Z_q} - \frac{E_0}{Z_d} \right) U_1 \sin(\theta + \delta) - \left( \frac{E_{qq}^2}{Z_q} - \frac{E_0^2}{Z_d} \right) \sin \delta \right], \quad (17)$$

де  $Z_q$  – величина головного опору якірної обмотки по поперечній осі в режимі к.з.,

$$Z_q = \sqrt{r_1^2 + (x_q \alpha)^2};$$

$E_{qq}$  – еквівалентна ЕРС явнополюсної БКМПС, якщо розглядати її як неявнополюсну з синхронним опором, що дорівнює  $x_q$  реальної явнополюсної машини,

$$E_{qq} = E_0 + I_d (x_d - x_q) \alpha = E_0 \left( \frac{x_q}{x_d} \right) + \left( 1 - \frac{x_q}{x_d} \right) U_1 \cos \theta. \quad (18)$$

Якщо підставити  $E_{qq}$  в (17), то у виразі  $M_p$  з'являється складова, яка змінюється з подвійною частотою по відношенню до кута  $\theta$ , що спостерігається і при нехтуванні втратами в  $r_1$ .

При відсутності магнітної асиметрії ( $x_d = x_q$ ,  $E_{dq} = E_0$ ) реактивний момент відсутній. Якщо нехтувати втратами в обмотці якоря ( $r_1 = 0$ ,  $\delta = 0$ ), вираз (17) трансформується у загальновідомий (при  $\alpha = 1$ ) для реактивного моменту:

$$M_p = \frac{3U_1^2}{2\omega_{0H}\alpha^2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (19)$$

**Четверта складова** моменту генерується взаємодією магнітного потоку полюсів статора з наведеними ним струмами в замкненій обмотці якоря – так званий момент динамічного гальмування  $M_{\partial z}$ . У цьому випадку магнітна система ротора (якірної обмотки) є симетричною відносно полюсів індуктора (статора), і можна скористатися схемою заміщення рис. 2,а, замкнувши накоротко якірну обмотку ( $U_1 = 0$ ), ліквідувавши гілку демпферної обмотки ( $r_{\partial o} = x_{\partial o} = \infty$ ), оскільки остання нерухома відносно полюсів, і замінивши обмотку збудження з опором  $r_f, x_f$  джерелом струму  $I_f = const$ . Скориставшись традиційним підходом ( $M_e = P_e / \omega_0$ ) одержимо відомий вираз моменту динамічного гальмування асинхронної (синхронної) машини при збудженні її постійним струмом

$$M_{\partial z} = \frac{2M_{\kappa\partial}}{s'_{\partial} + s'_{\kappa\partial}} = \frac{2M_{\kappa\partial}}{s'_{\kappa\partial} / s'_{\partial}}, \quad (20)$$

де  $M_{\kappa\partial}$  – максимальне (критичне) значення гальмівного моменту,

$$M_{\kappa\partial} = \frac{3I_e^2 x_{ad}^2 \alpha^2}{2(\omega_{0H}\alpha)(x_{ad} + x_1)\alpha} = \frac{3I_e^2 x_{ad}^2}{2\omega_{0H}(x_{ad} + x_1)}, \quad (21)$$

$I_e$  – еквівалентне (за намагнічувальною силою) значення намагнічувального струму трифазної обмотки ротора однофазній обмотці збудження,

$$I_e = k_{cx} I_f; \quad (22)$$

$s'_{\partial}$ ,  $s'_{\kappa\partial}$ ,  $\beta_{\partial}$ ,  $\beta_{\kappa\partial}$  – відповідно відносне та абсолютне ковзання ротора відносно нерухомого магнітного поля полюсів,

$$s'_{\partial} = \frac{\omega}{\omega_{0i}} = \frac{\omega}{\omega_{0H}\alpha} = \frac{\beta_{\partial}}{\alpha}; \quad s'_{\kappa\partial} = \frac{\omega_{\kappa}}{\omega_{0i}} = \frac{\omega_{\kappa}}{\omega_{0H}\alpha} = \frac{\beta_{\kappa\partial}}{\alpha}; \quad \omega_{0i} = 2\pi f_i / p_n = \omega_{0H}\alpha;$$

$\omega_{\kappa}$  – значення швидкості, при якій механічна характеристика «зламається», тобто при максимальному значенні гальмівного моменту  $M_{\kappa\partial}$ .

Процеси змінення повного електромагнітного моменту БКМПС (суми всіх його складових) в асинхронному режимі при різних частотах підведених напруг і абсолютних ковзань наведені на рис. 5. Процеси одержані на динамічній моделі БКМПС, приведений в [1]. При моделюванні прийнято живлення обмотки збудження від джерела напруги з номінальним її значенням; швидкість обертання ротора забезпечена незмінною і такою, що відповідає частоті напруги живлення і абсолютному ковзанню; закон змінення напруги якоря  $U/f = const$ , тобто напруга якоря пропорційна частоті живлення. Процеси змінення моментів показані в квазіусталеному режимі, коли перехідні складові в струмах і потокозчепленнях обмоток загли.

На рис. 5 під відповідними графіками двох періодів пульсацій момента наведені його Фур'є-складові:  $M_0$  – середнє значення (сума асинхронного момента і момента динамічного гальмування),  $M_1$  – перша гармоніка (синхронний момент),  $M_2$  – друга гармоніка (реактивний момент). За процесами бачимо, що синхронний та реактивний моменти у всіх випадках практично однакові. Непостійність цих складових визначається впливом опору якоря і змінності струму збудження, що викликана наведенням в обмотці збудження ЕРС – при живленні ОЗ від джерела напруги в асинхронному режимі струм збудження має і пульсуючу складову. Окрім того, при законі  $U/f = const$  точно не забезпечується незмінність потоку якоря. Асинхронний момент ( $M_0$ ) очікувано збільшується при збільшенні абсолютного ковзання та частоти живлення ротора за рахунок збільшення ЕРС, що наводиться в обмотці та збільшенні потоку при збільшенні напруги і частоти за законом  $U/f = const$ . При  $\alpha = 1$  і  $\beta = 0,1$  асинхронний момент практично дорівнює номінальному (для обраної машини  $M_n = 1859,9$  Нм), отже при «правильній» організації керування в асинхронному режимі виникнення цього момента може зіграти суттєву роль.

**Висновок.** Аналіз складових момента БКМПС в асинхронному режимі підтверджує, що для аналізу електромагнітного перетворення енергії в БКМПС можна застосовувати такі ж підходи, як і для синхронної машини – представлення електромагнітного момента сумою складових, кожна з яких визначається різними явищами. Появлення асинхронного моменту повинно враховуватися при формуванні керувань БКМПС в режимах змінення швидкості.

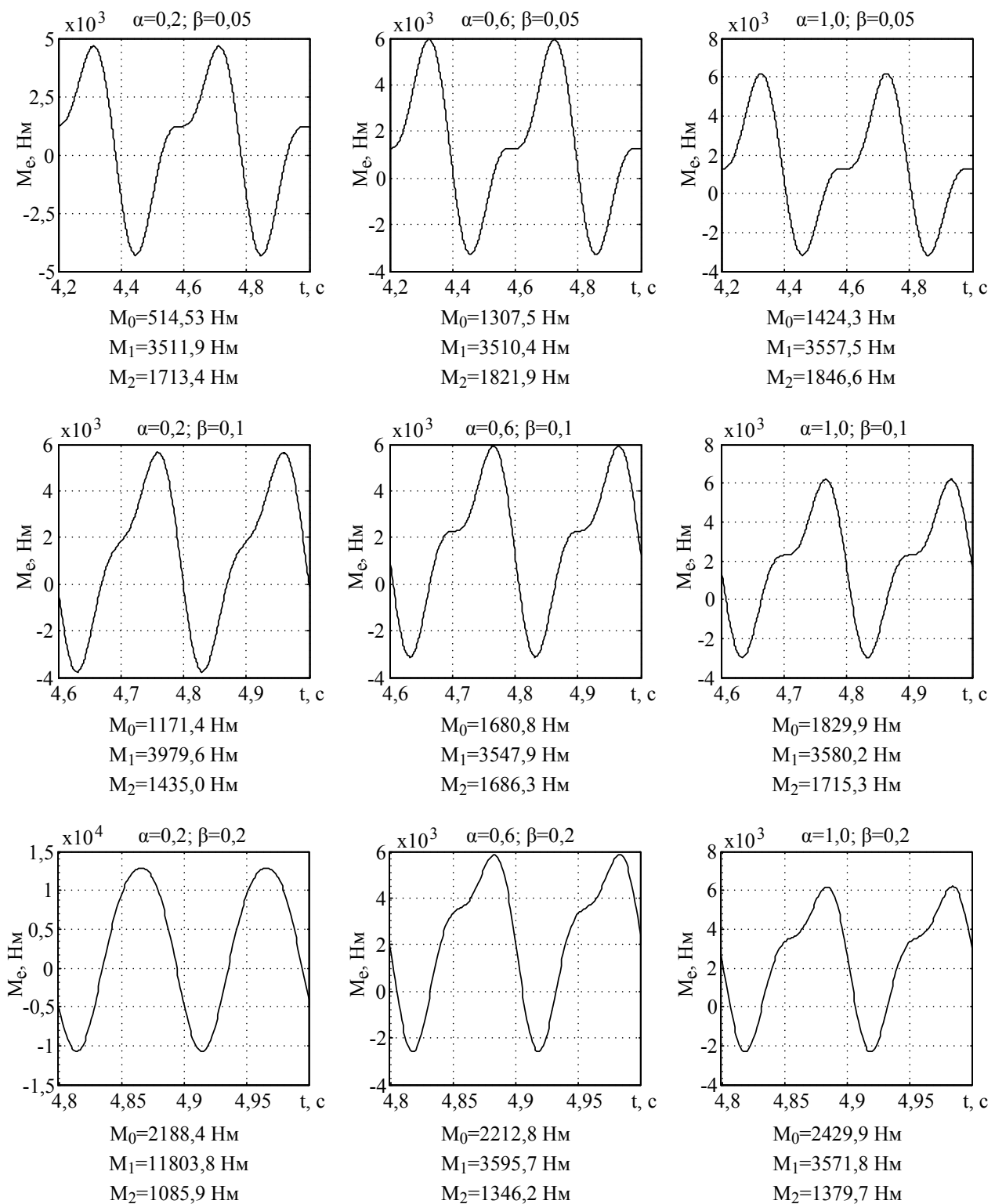


Рис 5. Процеси змінення повного моменту БКМПС в асинхронному режимі

**Список літератури:** 1. Морозов Д. І. Вентильний двигун постійного струму на базі синхронної машини оберненої конструкції / Д. І. Морозов, І. С. Шевченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 6-12. 2. Шевченко І. С. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка синхронного електропривода / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов. – К.: Кафедра, 2014. – 276 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Morozov, D. I., I. S. Shevchenko. "Ventyl'nyj dvygun postijnogo strumu na bazi synhronnoi' mashyny obrbenoi' konstrukcii". Elektrotehnika ta elektroenergetyka. No. 2 (2014): 6-12. Print. 2. Shevchenko, I. S., D. I. Morozov. Special'ni pytannja teorii' elektropryvoda. Dynamika synhronnogo elektropryvoda. Kiev: Kafedra, 2014. Print.

Надійшла (received) 02.08.2015