

*к.т.н. Шевченко І.С.,
к.т.н. Морозов Д.І.,
Калюжний С.В.,
Барбашин О.Г.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ

Наведені результати досліджень асинхронних електроприводів, що побудовані на базі джерел струму, а не напруги у роторному колі машини.

***Ключові слова:** джерело струму, асинхронний електропривод, каскад, пружний момент, математична та цифрова модель.*

Приведены результаты исследований асинхронных электроприводов, построенных на базе источников тока, а не напряжения, в роторной цепи машины.

***Ключевые слова:** источник тока, асинхронный электропривод, каскад, упругий момент, математическая и цифровая модель.*

Переважна більшість електроприводів будується на базі традиційних джерел напруги – електричних, електромагнітних, вентильних. Основною перевагою таких джерел є мінімум втрат в електроприводі при роботі його у режимі холостого ходу. Але для захисту двигунів від великих струмів у динамічних режимах та формування необхідної динаміки вони вимагають використання регуляторів струму.

Джерела струму (ДС), навпаки, дозволяють обійтися без регуляторів струму, оскільки самі є автоматичними (за природою) стабілізаторами струму на заданому рівні.

Існує ряд механізмів (намотувально-розмотувальні пристрої, лебідки тралів і інш.), які для свого приводу вимагають не традиційних джерел швидкості, а джерел моменту, які дають ряд переваг [1], у першу чергу захист ниток, канатів, полос від поривів.

Мета роботи – показати особливості режимів роботи асинхронної машини (АМ) при наявності в її роторному колі ДС та переваги використання такого варіанту електропривода (ЕП).

Дослідження та результати. Перш за все слід наголосити, що будь яке ідеальне ДС має безкінечно великі внутрішні е.р.с. і активний опір, що забезпечує йому близьку до нульової напругу. Це надає йому великих форсуючих можливостей, тобто воно може нівелювати вплив

електромагнітних інерційностей (індуктивностей), які знаходяться в його колі. Це дуже важливо для асинхронних двигунів, у яких дія індуктивностей (від потоків розсіяння) роторних обмоток суттєво впливає на величину електромагнітного моменту АМ:

$$M_E = c\Phi I_p \cdot \cos \varphi_p, \quad (1)$$

де I_p – ефективне значення струму ротора;
 $c\Phi$ – величина магнітного потоку,

$$c\Phi \approx c\Phi_n = \frac{M_n}{I_{pH} \cos \varphi_{pH}}, \quad (2)$$

де M_n , I_{pH} , $\cos \varphi_{pH}$ - номінальні значення моменту, роторного струму та коефіцієнта потужності;

$$\cos \varphi_{pH} = \frac{r_p}{\sqrt{r_p^2 + (x_p \cdot S_n)^2}}, \quad (3)$$

де r_p , x_p – значення активного та реактивного (при 50 Гц) опорів роторних обмоток АМ;

S_n - номінальне значення ковзання ротора.

Якщо ДС буде забезпечувати стабільність величини реактивного опору роторних обмоток на будь-якій частоті $f_2=f_1S$ - (x_1S), то електромагнітний момент АМ буде залежати (при сталій напрузі статорних обмоток) тільки від величини роторного струму I_p , тобто вихідного струму ДС, що його формує.

Принцип дії ДС на режими роботи ЕП суттєво не впливає. Тому всі дослідження проводилися на базі індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП), за одним з кращих варіантів – схеми Штейметца. Як показують дослідження [2,3] таке джерело має хороші статичні, динамічні та регульовальні властивості.

Функціональна схема асинхронного ЕП з джерелом струму в роторному колі наведена на рисунку 1. Оскільки частоти ротора і ДС – різні, використано узгодження через постійний струм - діодні випрямлячі $U1$, $U2$, що з'єднані послідовно. Для комутації (перемикання) роторного випрямляча $U1$ ввімкнено допоміжний перетворювач $U3$ у режимі інвертора струму, що «ведеться» мережею. У деяких випадках, для спрощення системи ЕП, інвертор струму можна замінити резистором R , падіння напруги на якому від протікання випрямленого струму I_d ДС виконує роль комутаційної е.р.с. Ця е.р.с. ($e_k=K_{ce}E_{pH}$) вдержує відповідний вентиль моста $U1$ в закритому стані, поки відповідна лінійна роторна е.р.с. не відкриє його. При цьому швидкість змінення струму ротора (частота) не має особливого значення через великі форсуючі можливості ІЄП. Струм ротора при любій частоті (ковзанні S) відстає від своєї е.р.с. на кут не більший $\varphi_p=18\div 25^\circ$ (рисунок 2). Завдяки цьому електромагнітний момент АМ (середнє значення) практично пропорційний роторному струму I_p , а значить, і струму

ДС I_d (рисунок 3). Як тільки e_p стає такою, що менша падіння напруги в самій обмотці ротора від струму I_d , то описана картина в роторі порушується – зникає стабілізація роторного струму і моменту (лінія $S_{\min}(I_d)$ на рисунку 3):

$$E_{pH} S_{\min} \geq \frac{I_d^* \cdot Z_d^*}{K_{ci}}, \quad (4)$$

$$S_{\min} \geq \frac{I_d^* \cdot r_d^*}{\sqrt{\left(K_{ci} E_{pH}^*\right)^2 - \left(I_d^* x_r^*\right)^2}}. \quad (5)$$

Завдяки комутуючому інвертору $U3$ діодний роторний перетворювач $U1$ виступає в ролі інвертора випрямленого струму i_d ДС, який «ведеться» АМ. Остання може розглядатися як асинхронізована синхронна машина.

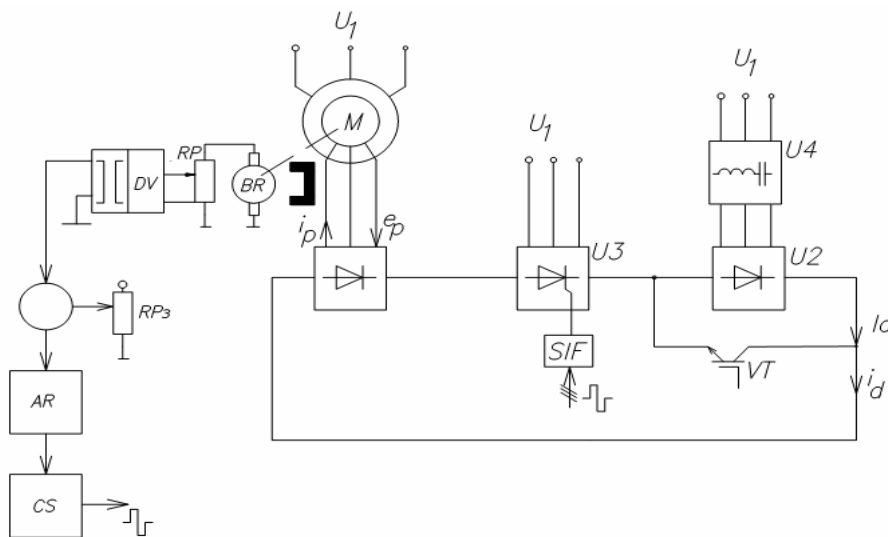


Рисунок 1 – Функціональна схема асинхронного ЕП з ДС у роторному колі

Для стабілізації та регулювання швидкості використовують зворотній зв'язок за цією координатою, та шунтуючий вихід ДС транзистор VT , який керується релейною або аналоговою системою CS . Працюючи у ключовому режимі, транзистор забезпечує зміння вихідного струму ДС в межах $I_d \neq 0$ ($I_d = K_{ci} U_n / X_c$, $K_{ci} = 1.22 \div 1.28$, U_n – величина лінійної напруги мережі живлення, X_c – реактивний опір конденсатора на частоті 50 Гц).

ДС при цьому може розглядатися як регульоване джерело з коефіцієнтом передачі:

$$K_D = I_d / U_{p\omega}, \quad (6)$$

де $U_{p\omega}$ максимальне значення вихідної напруги регулятора швидкості $AR(U_{p\omega}=10\div 12\text{ В})$.

Рівняння механічної характеристики (МХ) такого ЕП в замкненому стані буде мати вид:

$$\omega = \omega_3 - \frac{M}{c\Phi_d \cdot K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_D}, \quad (7)$$

де $K_{p\omega}, K_{\omega}$ - коефіцієнти підсилення регулятора швидкості та каналу зворотного зв'язку за швидкістю;
 $S=0.2; I_{rn}=0.5 I_n$

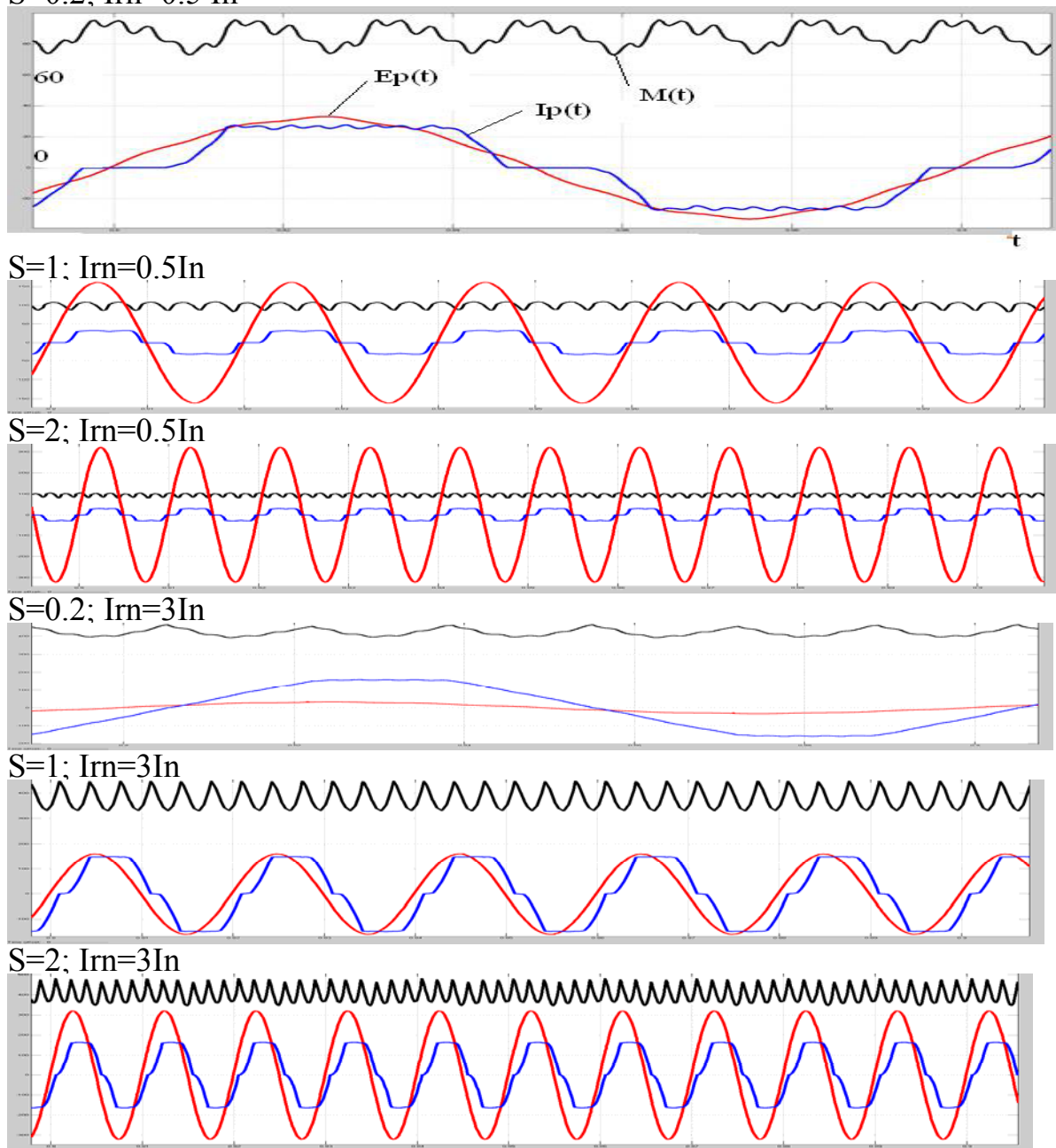


Рисунок 2 – Осцилограми е.р.с. e_p , струму i_p та момента M при різних значеннях ковзання ротора ($S=0.2, 1, 2$)

$c\Phi_d$ – магнітний потік АМ, що перерахований на випрямлений струм ротора $c\Phi_d = K_{ce} E_{pH} / \omega_0$, ($K_{ce} = 1.35$);

ω_3, ω_0 – задана швидкість та швидкість обертання магнітного поля в зазорі.

На рисунку 3 такі МХ позначені $U_{3\omega} = 0.1, 0.5, 0.8$.

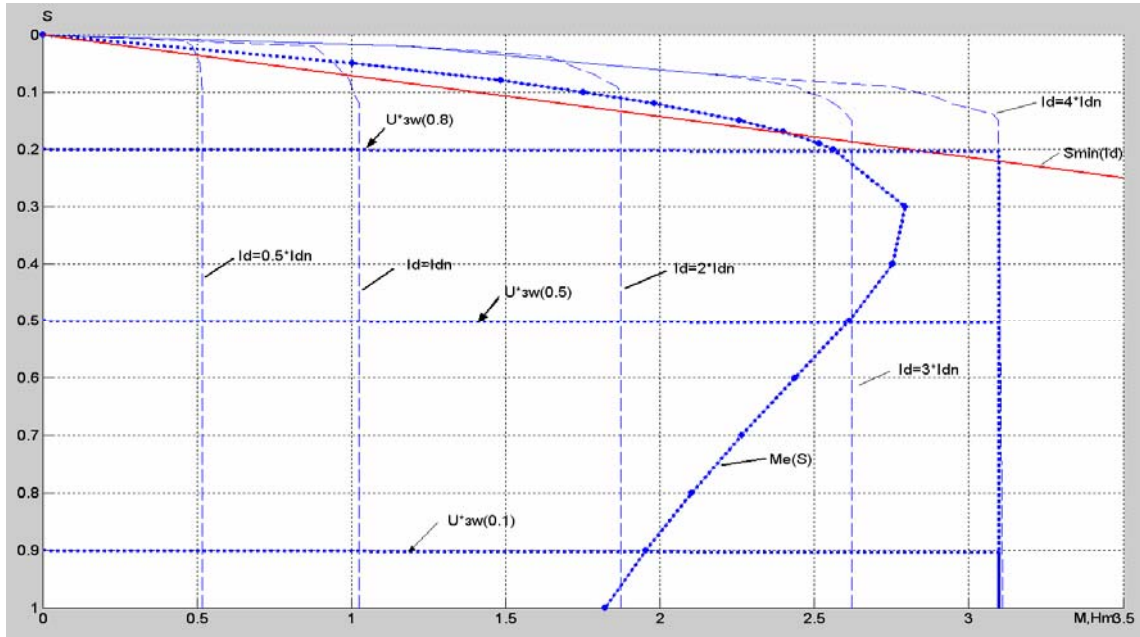


Рисунок 3 – Механічні характеристики асинхронного ЕП при наявності ДС в роторному колі АМ

Можливі і інші варіанти побудови ЕП на базі ДС у роторному колі. Це коли струм ДС – незмінний, а регулюється магнітний потік величиною напруги, що підводиться до статорних обмоток за допомогою тиристорного регулятора (ТРН). Якщо не враховувати насичення сталі АМ, то МХ ЕП будуть мати вид:

$$\omega = \omega_3 - \frac{M \omega_0 K_e}{K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_{ce} \cdot K_T I_d}, \quad (8)$$

де K_e – коефіцієнт трансформації е.р.с АМ;

K_T – коефіцієнт підсилення (передачі) тиристорного регулятора напруги.

Як відомо з теорії ЕП, МХ, що мають практично нульову жорсткість, забезпечують відсутність електромагнітного зв'язку між енергіями, які накопичуються в індуктивностях якірної (роторної) обмотки машини та її махових масах. А це дає можливість формувати момент двигуна незалежно від пружного моменту у податливому валопроводі, зменшуючи цим величину останнього.

Особливо ця властивість МХ важлива у взаємозв'язаних через передатні пристрої (наприклад, редуктори) багатодвигунних ЕП (рисунк 4), підйомних установок, екскаваторів і інш. Як показують аналітичні дослідження, загальна резонансна частота такого ЕП (паралельне вмикання роторних обмоток до спільного ДС) збільшується, по відношенню до традиційного дводвигунного ЕП з послідовним живленням якірних обмоток від джерела напруги, в К раз:

$$K = \sqrt{1 + (\Omega_1 / \Omega_0)^2}, \quad (9)$$

де Ω_1, Ω_0 - частоти вільних коливань валопроводів при заземлених (нерухомих) відповідно механізмі і роторах.

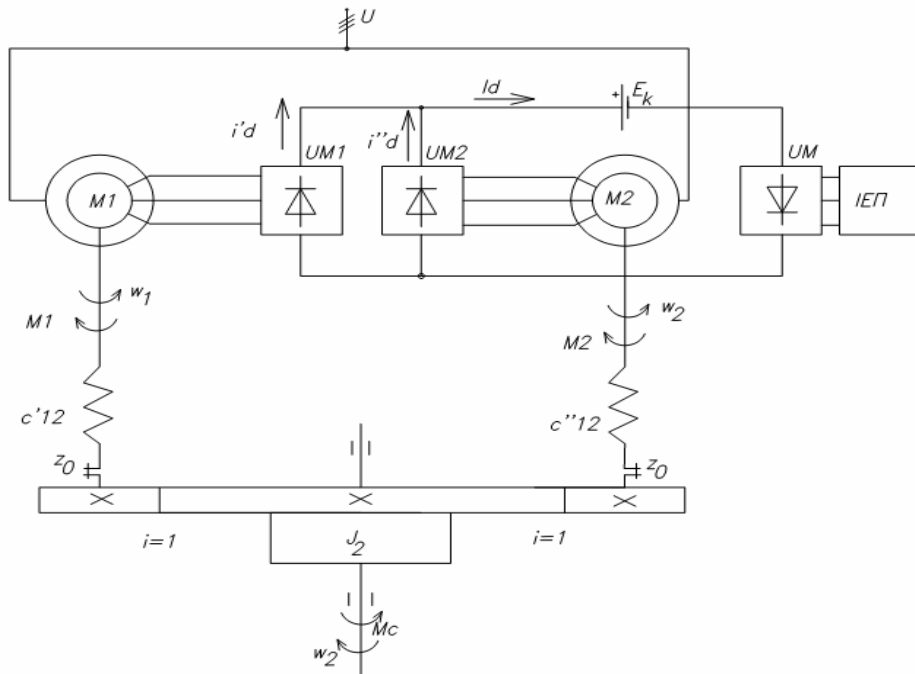


Рисунок 4 – Функціональна схема взаємозв'язаного через передачу асинхронного ЕП на базі ДС

$$\Omega_0 = \sqrt{C_{12} / J_1}, \quad \Omega_1 = \sqrt{C_{12} / J_2}, \quad (10)$$

де C_{12} – коефіцієнт жорсткості валопроводів;

J_1, J_2 – моменти інерції роторів АМ (разом з деталями що знаходяться на їх валах) і механізму, що приведений до вала двигуна відповідно.

Результати досліджень (рисунок 5) показують, що при появі у передачі в каналі першого двигуна навантаження пружні моменти у валопроводах коливаються у протифазі (назустріч один одному), в той час коли в традиційній системі ЕП при послідовному вмиканні роторних обмоток та живленні від джерела напруги, вони співпадають за фазою. Це призводить до більш швидкого вирівнювання миттєвих швидкостей роторів та їх моментів за рахунок перерозподілу випрямлених струмів i_d роторних обмоток ($0.2 \leq t \leq 0.45$ с) – більш завантажений двигун одержує більший струм за рахунок другого, оскільки сумарний I_d ДС залишається незмінним.

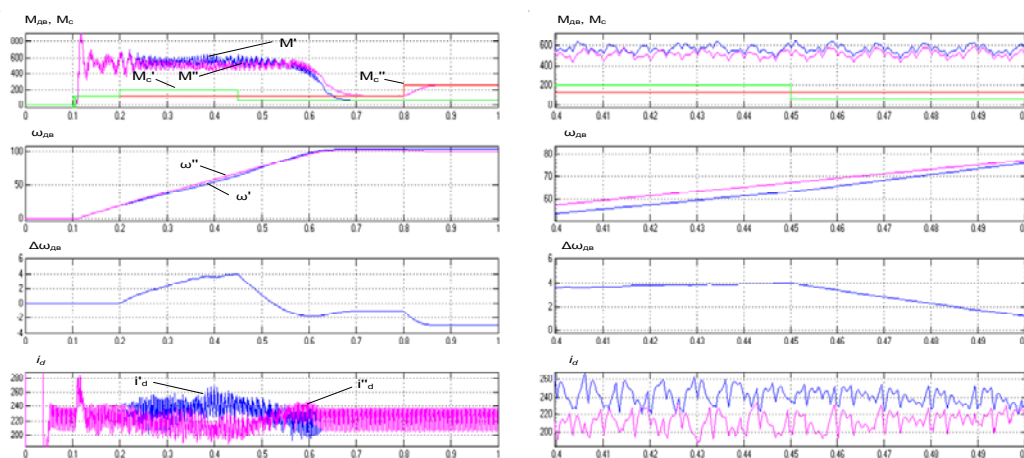


Рисунок 5 – Результати моделювань взаємозв'язаного через передачу дводвигунного асинхронного ЕП на базі ДС у роторних колах

($M_{дв}$; M_{12} ; M_c – моменти двигунів, пружні та навантаження, $\omega_{дв}$, $\Delta\omega$ – швидкості роторів окремих двигунів та розбаланс цих швидкостей)

Права частина рисунка демонструє фрагмент загального процесу на інтервалі 0,4-0,5 с для спостереження зняття навантаження з першого вала (0,45с).

Тенденція «взаємодопомоги» двигунів один одному за рахунок перерозподілу загального струму I_d ДС зберігається навіть при відсутності прямого механічного зв'язку між валами окремих двигунів, що дуже важливо для електроприводів механізмів переміщення, наприклад мостових, козових і порталних кранів. На рисунку 6 показані осцилограми моментів двигунів, їх швидкостей та випрямлених струмів роторів при розгоні дводвигунного ЕП на базі ДС у роторному колі при змінюванні навантажень на окремі вали (накид навантаження $0,5 M_n$ при $t=0.2$ с на перший вал, а при $t=0.8$ с - номінального на другий).

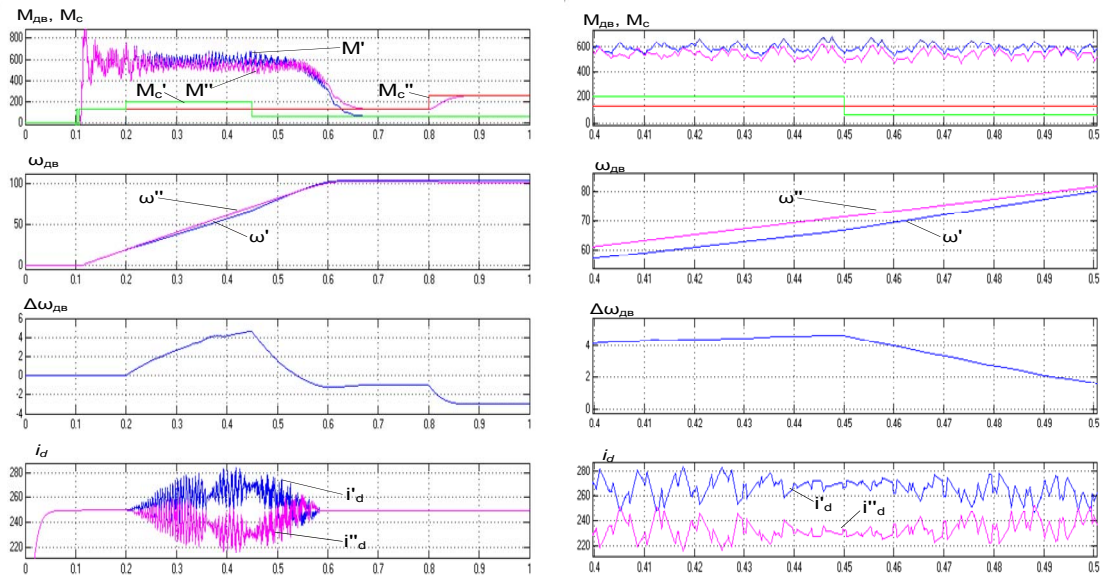


Рисунок 6 – Осцилограми моментів, швидкостей, випрямлених струмів та розбалансу швидкостей двигунів механічно не зв'язаних між собою при їх розгоні і змінненні навантажень на окремі вали

Якщо ДС регульоване, то можна будувати і регульовані взаємозв'язані асинхронні ЕП при введенні зворотного зв'язку за швидкістю одного з двигунів.

Рівняння МХ такого ЕП буде мати вид (зворотній зв'язок за швидкістю першого двигуна):

$$\omega_1 = \omega_3 - \frac{M_{c1} + M_{c2}}{K_{p\omega} K_{\omega} K_D} \frac{\omega_0}{K_{ce} E_{pH}}, \quad (11)$$

$$\omega_2 = \omega_3 + 0.5 \frac{(M_{c1} - M_{c2}) r_d}{(c\Phi_d)^2} - \frac{M_{c1} + M_{c2}}{K_{p\omega} K_{\omega} K_D c\Phi_d}, \quad (12)$$

де M_{c1} , M_{c2} – моменти навантаження на окремі вали;

r_d – еквівалентна величина активного опору кола випрямленого струму (окрім ДС).

Похибка у «відслідковуванні» другим двигуном швидкості першого буде такою:

$$\Delta\omega = 0.5 \frac{\omega_0^2 r_d}{(K_{ce} E_{pH})^2} (M_{c2} - M_{c1}). \quad (13)$$

При використанні нерегульованого ДС у роторному колі АМ та ТРН в статорних одержують регульований взаємозв'язаний (роторними колами) асинхронний ЕП, динамічні процеси в якому демонструються осцилограмами (рисунок 7). Як видно з них, другий двигун намагається повторити швидкісний режим першого, незважаючи на великі відмінності навантажень на окремих валах.

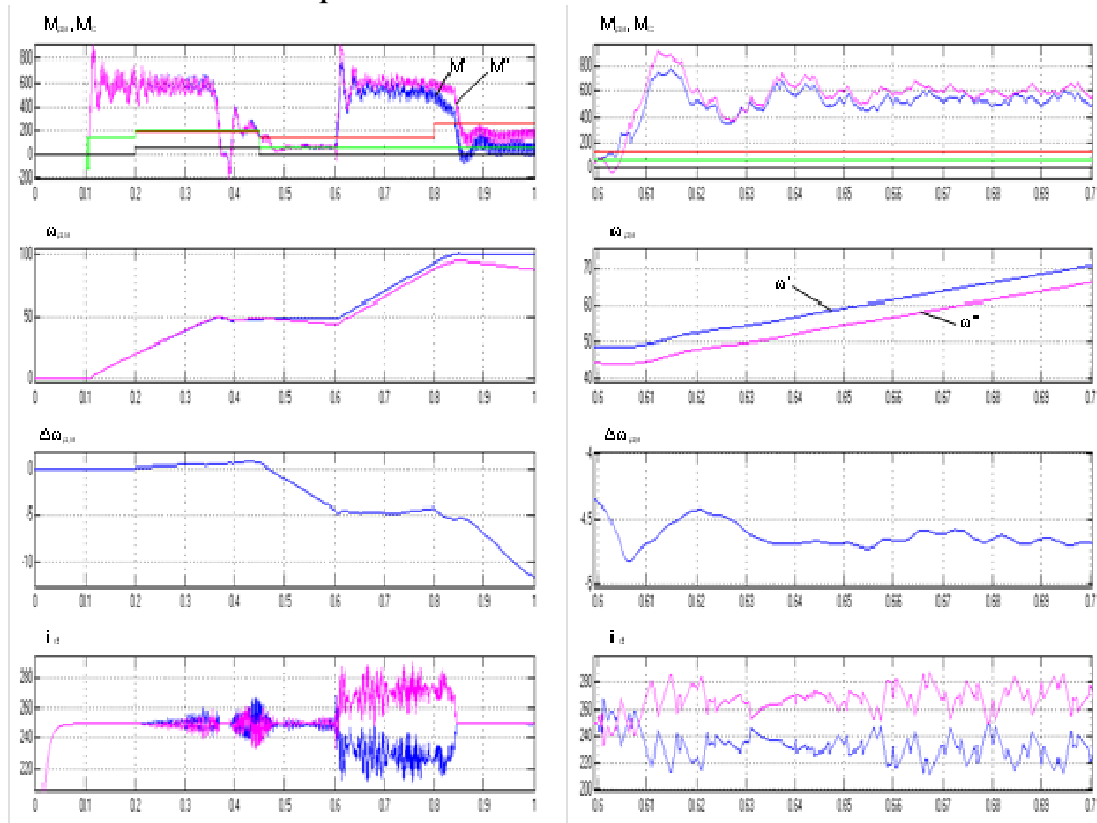


Рисунок 7 – Динамічні процеси у взаємозв'язаному дводвигунному асинхронному ЕП на базі ДС у роторних колах АМ при дії як управляючих (ω_3) так і збурюючих (M_{c1}, M_{c2}) факторів

Висновки

1. Використання джерел струму у роторних колах асинхронних двигунів дозволяє «ідеально» розподілити навантаження на їх вали при спільній роботі на один механізм.

2. Паралельне живлення роторних кіл асинхронних двигунів від одного джерела струму дозволяє значно покращити частотні властивості таких ЕП порівняно з традиційними на базі джерел напруги.

Бібліографічний список

1. Волков И.В. *Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях* / Волков И.В., Исаков В.Н. – М. : Радио и связь, 1991. -216 с.

2. Морозов Д.И. Статические свойства источников тока на базе индуктивно-емкостного преобразователя / Д.И. Морозов, А.А. Сопов, Н.И. Андреева, С.В. Калюжный // Сборник ДонГТУ. – 2010. - № 32.— С. 366-375.

3. Морозов Д.И. Статические свойства источников тока на базе индуктивно-емкостного преобразователя / Д.И. Морозов, А.А. Сопов, Н.И. Андреева, С.В. Калюжный // Сборник ДонГТУ. – 2010. - № 32. — С. 376-385.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Лущиком В.Д.