

Рисунок 4.14 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

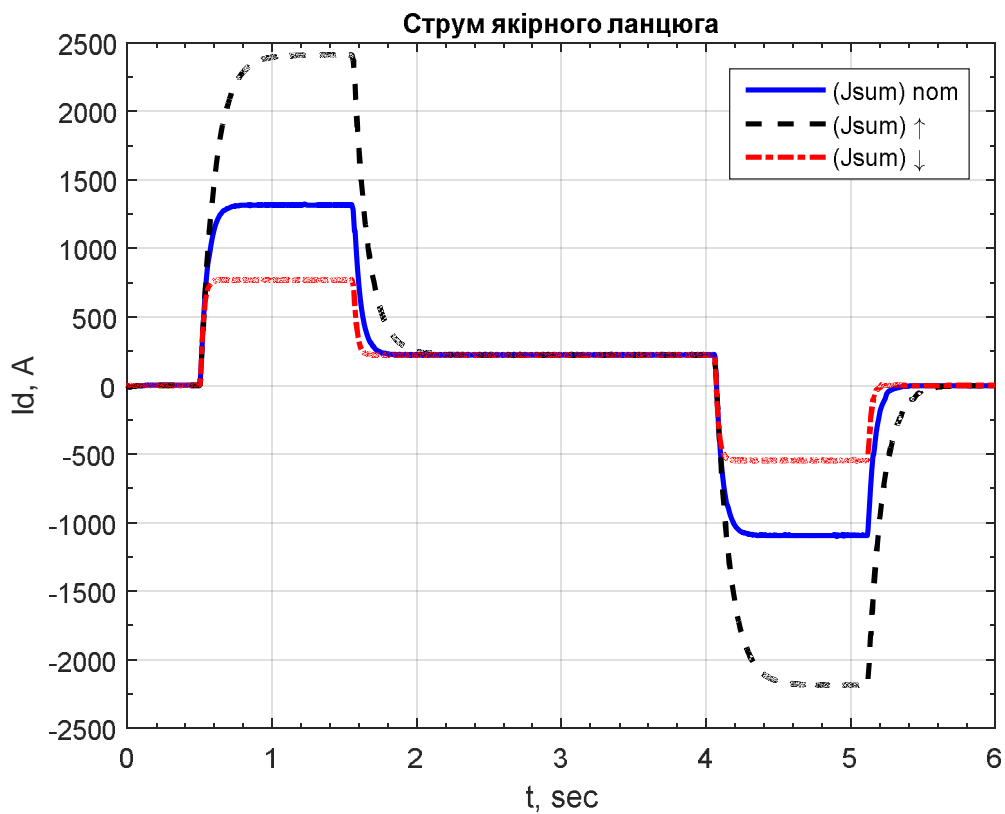


Рисунок 4.15 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

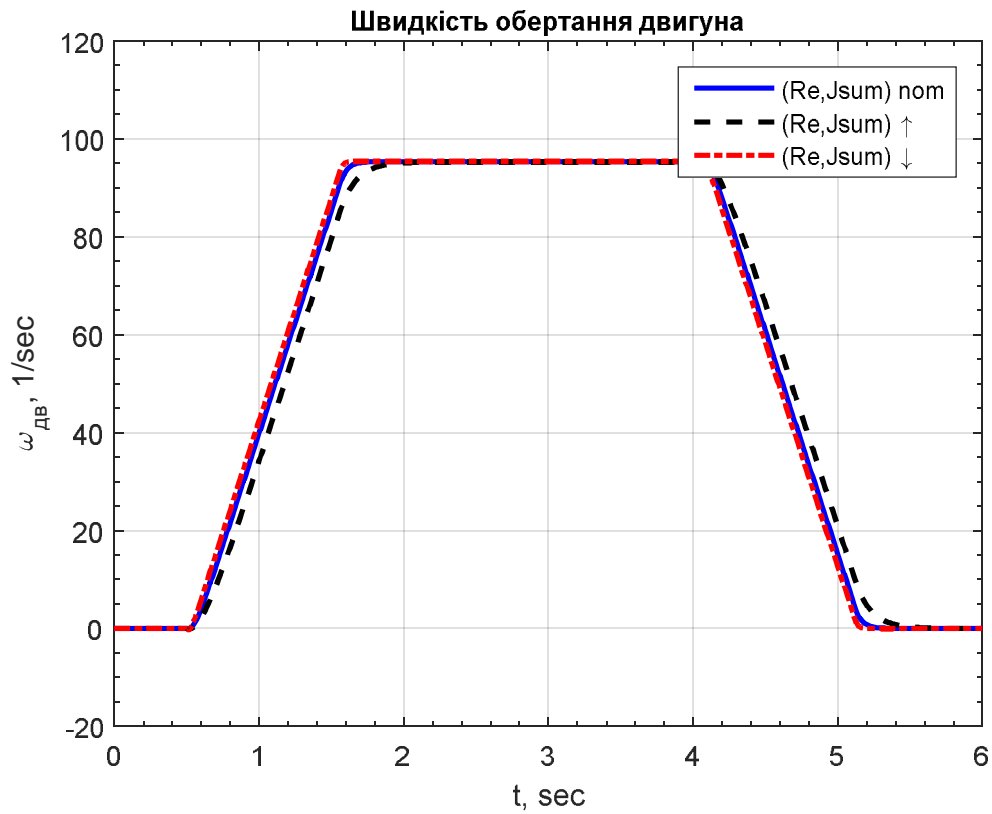


Рисунок 4.16 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $R_s$  та  $J'_\Sigma$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

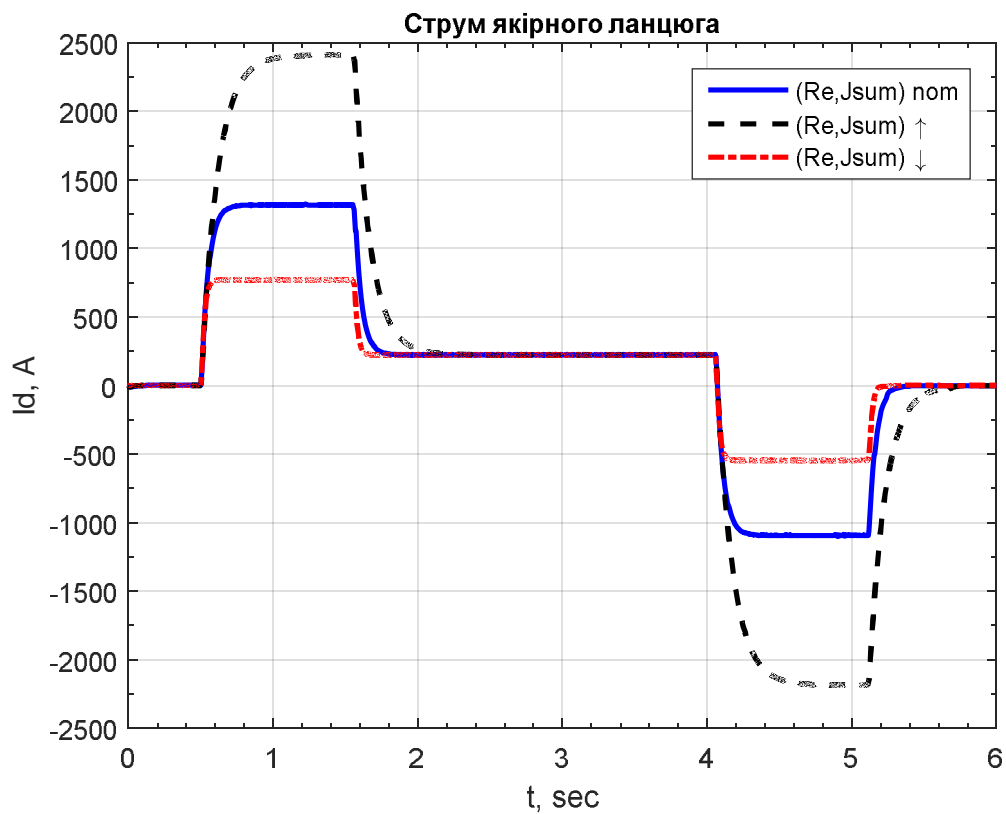


Рисунок 4.17 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $R_s$  та  $J'_\Sigma$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

#### 4.5 Оптимізація демпфуючої дії електропривода з системою модального керування

Сучасні тенденції розвитку різних галузей промисловості характеризуються різким підвищенням вимог до якості і експлуатаційних властивостей виробів при зниженні собівартості їх виробництва. Процеси обробки металів тиском, зокрема, прокатне виробництво, відносяться до числа високоефективних, економічних способів виготовлення металевих виробів, що реалізують економію матеріальних, енергетичних ресурсів і трудових витрат.

Автоматизовані електроприводи діючих металургійних машин і агрегатів оснащуються електричними двигунами граничної потужності з швидкодіючими керованими перетворювачами і широким діапазоном регулювання швидкості [74]. Сучасна елементна база систем управління дозволяє теоретично реалізувати критерії високого рівня якості регулювання, які диктуються технологічними процесами, а також оптимізувати динамічні навантаження, що викликаються дією різного роду збурень.

В теорії електроприводу вказується, що основним завданням електроприводу є обмеження динамічних навантажень в електромеханічній системі і забезпечення заданої точності руху її виконавчих органів. Рішення такого завдання можливе на підставі системного підходу шляхом раціонального вибору структури і параметрів електромеханічної системи з використанням демпфуючого ефекту електроприводу.

Демпфуючий ефект електроприводу виникає в результаті електромеханічного зв'язку і енергія пружних механічних коливань при певних умовах розсіюється в дисипативних елементах електродвигуна або повертається в мережу [75].

Аналіз безлічі публікацій з практичної оптимізації демпфуючого ефекту в електромеханічних системах (ЕМС) свідчить, що питання синтезу систем при реалізації принципів активного придушення пружних коливань залишаються актуальним.

Для електроприводів головних ліній клітей станів гарячої прокатки характерна система підпорядкованого регулювання (СПР). Для посилення демпфуючого ефекту структур електроприводів з системами підлеглого регулювання потрібні додаткові коригувальні зворотні зв'язки. Для малих значень коефіцієнтів співвідношень інерційних мас  $\gamma = 1,1-1,2$  потрібні високі значення коефіцієнтів посилення регуляторів, що призводить до значного перерегулювання струму і погіршення помезахищеності системи управління. Побудова СПР за принципом вкладеності контурів [76-78] вимагає зменшення їх швидкодії, що не дозволяє реалізувати високі демпфируючі якості, наприклад, прокатних електродвигунів. Для деяких поєднань параметрів і частот вільних коливань потрібно також і зниження швидкодії (наприклад, для  $\Omega_{12} = 62,8 \text{ с}^{-1}$  і  $\gamma > 1,5$ ). Таким чином, методика синтезу параметрів регуляторів підлеглих контурів при обліку пружною механічною підсистеми стає громіздкою і аналітичне рішення задачі демпфірування коливань можливо тільки при спрощення структури і суттєвих припущеннях.

Високу точність регулювання і необхідну швидкодію при ефективному демпфіруванні пружних коливань забезпечують електромеханічні системи управління модальної структури [79, 80].

Метою даної роботи є дослідження можливості використання в електроприводах головних ліній клітей станів гарячої прокатки систем модального управління (БМУ) [81] і оптимізація демпфуючої дії електроприводу.

Для встановлення закономірностей процесів електромеханічного взаємозв'язку досліджуємо лінеаризовану ЕМС, структурна схема якої відображає їх фізичний зміст. Структурна схема електромеханічної системи приводу з модальним керуванням для абсолютних одиниць параметрів наведена на (рис.4.18). На підставі структурної схеми (рис. 4.18) з передавальних функцій для аналізу демпфірування власних коливань отримано характеристичне рівняння такого вигляду:

$$Q(p) = \frac{\gamma T_{M1} T_T}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{\gamma T_{M1} \cdot (1 + K_1 K_{oi})}{\Omega_{12}^2} p^3 + \gamma \cdot \left( T_{M1} T_T + \frac{K_1 \cdot k\Phi_H \cdot K_2 \cdot K_{C1}}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + [\gamma T_{M1} \cdot (1 + K_1 K_{oi}) + K_1 \cdot k\Phi_H \cdot K_M \cdot T_{M2}] p + K_1 \cdot k\Phi_H \cdot K_2 \cdot (K_{C1} + K_{C2})$$

При складанні структурної схеми прийняті відомі допущення [82, 83]: внутрішнє ЕРС двигуна не враховується, так як контур регулювання струму може мати граничне швидкодію при оптимізації по модульному оптимуму; інерційність контуру струму враховується постійної часу інтегрування контуру струму ТТ; величина тертя в механічній підсистемі мала ( $B_{12} \approx 0$ ).

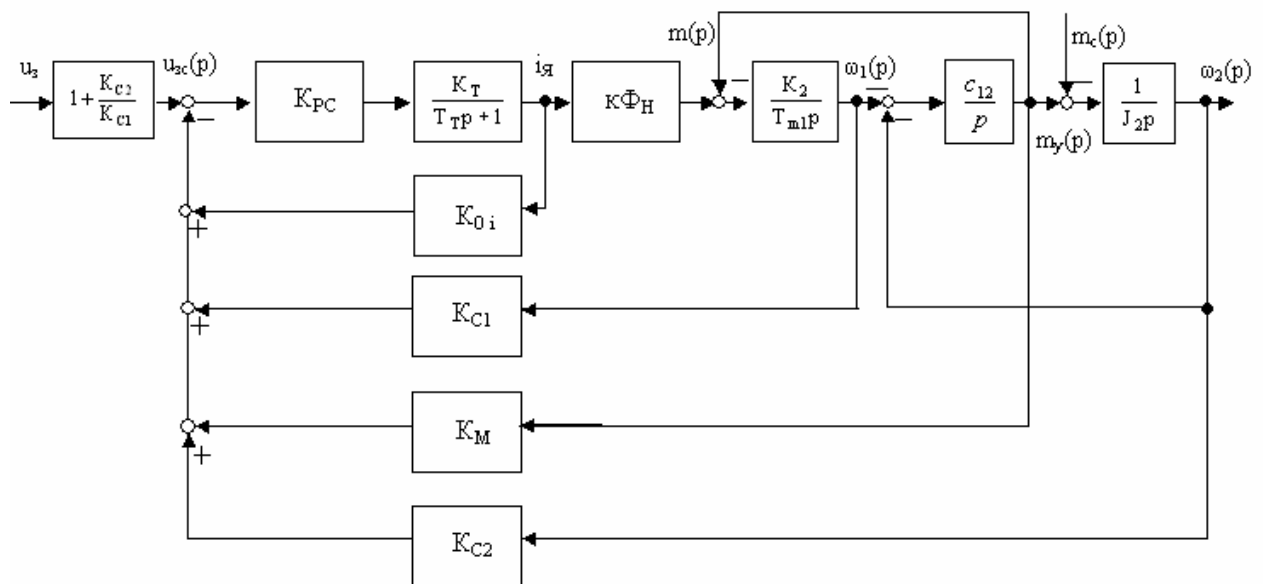


Рисунок 4.18 - Структурна схема двохмасової електромеханічної системи приводу з модальним регулятором

Також введені додаткові позначення:  $K_{oi}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку по струму;  $K_{C1}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості першої маси (двигуна);  $K_{C2}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості другої маси (механізму);  $K_M$  - коефіцієнт зворотного зв'язку по пружності моменту.

У характеристичний рівнянні для спрощення запису прийняті наступні позначення:  $K_1 = K_{PC} \cdot K_T$  - коефіцієнт передачі, що включає коефіцієнт посилення регулятора швидкості, коефіцієнт посилення контуру струму  $K_T = 1/K_{ДТ}$ ;  $K_{ДТ}$  - коефіцієнт передачі датчика струму;  $K_2 = 1/\beta$  - коефіцієнт, зворотний коефіцієнту жорсткості механічної характеристики електродвигуна.

Характеристичне рівняння (1) на підставі прийнятої форми нормування [84] представимо в узагальненому вигляді:

$$Q(p) = \gamma K_B T_Y^2 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \zeta_D T_Y^3 p^3 + \gamma \left( K_B + \frac{1}{\varepsilon} \right) T_Y^2 p^2 + 2\gamma \sqrt{K_B} (1 + \varphi_Y) \zeta_D T_Y p + 1 \quad (2)$$

Для запису характеристичного рівняння в формі (2) при аналізі та оцінці демпфуючої дії використовується коефіцієнт електромеханічного взаємозв'язку:

$$K_B = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_3^2} = \frac{T_{M1} \cdot T_T \cdot \Omega_{12}^2}{K_1 \cdot k\Phi_H \cdot K_2 \cdot (K_{C1} + K_{C2})} \quad (3)$$

і коефіцієнт демпфірування:

$$\zeta_D = \frac{1 + K_1 K_{oi}}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{K_1 \cdot k\Phi_H \cdot K_2 (K_{C1} + K_{C2}) T_T}} \quad (4)$$

При перетворенні характеристичного рівняння також зручно позначити:

$$K_1 \cdot k\Phi \cdot K_M \cdot T_{M2} = K_1 \cdot k\Phi \cdot K_M \cdot \gamma \cdot T_{M1} \frac{(\gamma - 1)}{\gamma} = \varphi_Y \cdot \gamma \cdot T_{M1} \cdot (1 + K_1 \cdot K_{oi}) ,$$

де  $\varphi_Y = K_1 \cdot k\Phi \cdot K_M \cdot \frac{(\gamma - 1)}{\gamma \cdot (1 + K_1 \cdot K_{oi})}$  - коефіцієнт ваги зворотного зв'язку по пружності моменту;

$$K_1 \cdot k\Phi \cdot K_2 (K_{C1} + K_{C2}) = K_1 \cdot k\Phi \cdot K_2 \cdot K_{C1} \left( 1 + \frac{K_{C2}}{K_{C1}} \right) = K_1 \cdot k\Phi \cdot K_2 \cdot K_{C1} \cdot \varepsilon ,$$

де  $\varepsilon = 1 + \frac{K_{C2}}{K_{C1}}$  - коефіцієнт глибини зворотного зв'язку за швидкістю двигуна та механізму (валків).

На підставі запропонованої методики синтезу параметрів ЕМС [85] отримуємо умови оптимізації електропривода з СМУ за критерієм коливальності:

$$K_B^* = \frac{1}{\gamma(1 + \varphi_Y)^2} ; \quad (5)$$

$$\zeta_D^* = \frac{1}{(1 + \varphi_Y)} \cdot \sqrt{\frac{\gamma(1 + \varphi_Y)^2 - 2\varepsilon(1 + \varphi_Y) + \varepsilon}{\gamma\varepsilon}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

де  $K_B^*, \xi_d^*$  - значення коефіцієнтів для реалізації оптимального демпфірування в ЕМС.

У промислових електроприводах з активним демпфуванням пружних механічних коливань електромагнітною підсистемою  $\xi_d < 1,0$  для виконання умов відведення енергії і, відповідно,  $\phi_y < 1,0$  при  $\varepsilon \neq 0$ .

Для забезпечення необхідного ступеня демпфірування (з мінімальною коливальних) параметри ЕМС повинні задовольняти співвідношенням:

$$\frac{T_{Мл} \cdot (1 + K_1 \cdot K_{oi})}{K_1 \cdot k\Phi \cdot K_2 \cdot (K_{C1} + K_{C2})} = 2\sqrt{K_B^* \xi_d^*} \cdot \frac{1}{\Omega_{12}} \quad (7)$$

$$\frac{T_T}{(1 + K_1 K_{oi})} = \frac{\sqrt{K_B^*}}{2\xi_d^* \Omega_{12}} \quad (8)$$

При підстановці в (7), (8) умов граничної електромеханічної взаємозв'язку (5), (6) отримуємо розрахункові формули для вибору коефіцієнтів зворотних зв'язків і базової постійної часу:

$$K_1 \cdot k\Phi \cdot K_2 (K_{C1} + K_{C2}) = \frac{\gamma(1 + \phi_y)^2 \cdot T_{Мл} \cdot (1 + K_1 K_{oi})}{2\sqrt{\varepsilon \cdot [\gamma(1 + \phi_y)^2 - 2\varepsilon(1 + \phi_y) + \varepsilon]} \cdot T_y} \quad (9)$$

$$\frac{T_T}{1 + K_1 K_{oi}} = \frac{\sqrt{\varepsilon} \cdot T_y}{2\sqrt{\gamma(1 + \phi_y)^2 - 2\varepsilon(1 + \phi_y) + \varepsilon}} \quad (10)$$

Постійна часу  $T_T$  характеризує еквівалентну інерційність прямого каналу регулювання.

При синтезі параметрів по співвідношенням (9), (10) перехідні процеси в електроприводі будуть визначатися показниками типового коливального ланки граничної ступенем демпфірування:

$$\xi_0 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\gamma(1 + \phi_y)^2 - 2\varepsilon(1 + \phi_y) + \varepsilon}{\varepsilon(1 + \phi_y)}} \quad (11)$$

і мінімальною коливальністю:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{6\varepsilon(1+\varphi_y) + \varepsilon - \gamma(1+\varphi_y)^2}{\gamma(1+\varphi_y)^2 - 2\varepsilon(1+\varphi_y) + \varepsilon}} \quad .. \quad (12)$$

Для граничних значень при  $\varepsilon = 1$  (тобто коли відсутній зворотний зв'язок по швидкості другої маси) і при  $\varphi_y = 0$  (для випадку неможливості реалізації зворотного зв'язку по пружності моменту  $K_M = 0$ ) показники загасання в точності збігаються з показниками для процесів в ЕМС з узагальненими параметрами структурної схеми системи підлеглого регулювання.

За співвідношенням (9) і (10) були синтезовані параметри ЕМС приводу валків кліті НЗС для конкретних значень  $\varepsilon$  і  $\varphi_y$ , на підставі яких виконано моделювання. Для ілюстрації ефективності запропонованої методики по розрахунковим співвідношенням для конкретних значень параметрів заготовочного стану на малюнку 2 наводяться перехідні процеси в ЕМС з мінімальною коливальні, отримані шляхом розрахунку і моделювання в пакеті Matlab.

Аналіз графіків (рис. 4.19) свідчить про ефективність запропонованої методики синтезу стосовно структурам модального регулювання електроприводом. Розрахункові співвідношення (9), (10) прості і враховують фізику процесів взаємодії і взаємозв'язок параметрів електромагнітної і механічної підсистем.

Пропонована методика проста, задовольняє вимогам системного аналізу, має прозоре фізичний зміст. Синтез параметрів електромеханічної системи управління і регулювання модальної структури дозволяє реалізувати сприятливий властивість активного гасіння електроприводом пружних коливань, а також стосовно оскільки він розглядався класу приводів дозволяє отримати перехідні процеси з мінімальною тривалістю коливальних процесів при заданому коефіцієнті демпфірування і  $(\xi_E = \xi_M)$  з компенсацією сил пружного зв'язку силами інерційної зв'язку.



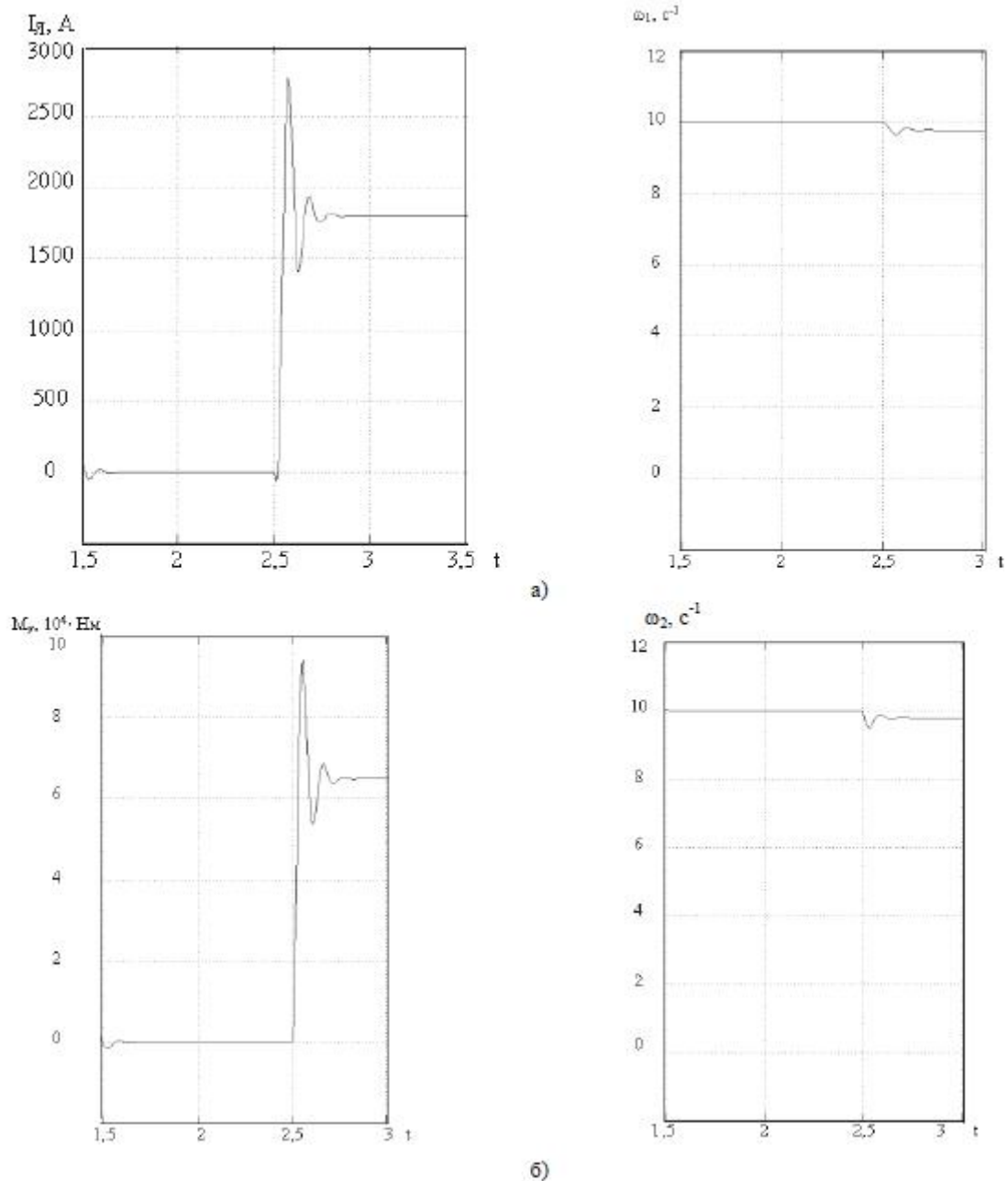


Рисунок 4.19 - Перехідні процеси в ЕМС з  $\gamma = 1,5$  з системою модального управління: а) для току двигуна  $I_d$  і швидкості двигуна  $\omega_1$ ; б) для пружного моменту  $M_y$  та швидкості валків кліті  $\omega_2$ .

#### 4.6 Показники оцінки керованості електромеханічного комплексу

Технологічні комплекси, обладнані турбомеханізмами (насосами, вентиляторами, компресорами), відносяться до одних з найбільш енергоємних і складних електромеханічних систем (ЕМС), режими роботи яких залежать від характеристик і параметрів електроприводу, технологічного механізму, трубопроводної мережі, запірно-регулюючої арматури, споживача. У більшості

випадків, характеристики елементів в статичних і динамічних режимах нелінійні, що залежать від цілого ряду чинників. Зміна параметрів однієї з підсистем суттєво впливає на функціонування всього технологічного комплексу. Так, наприклад, ефективність роботи гідротранспортного комплексу визначається паспортними характеристиками, схемою включення (паралельної або послідовної) і числом одночасно працюючих насосів, параметрами гідродинамічної мережі (протидавленням і гідравлічним опором), характеристиками і умовами спрацьовування запірно-регулюючої арматури, наявністю кавітаційних процесів в гідромережі, вибором методу регулювання технологічних параметрів і т.д.

Будь-яка ЕМС функціонує в умовах впливу різного роду факторів: керуючих, що обурюють і задають впливів, що змінюються в процесі роботи, і що виникають як у нормальних (експлуатаційних), так і в позаштатних (аварійних) ситуаціях. Режим роботи ЕМС характеризується електричними, енергетичними та механічними параметрами: напругою, струмом, потужністю, частотою обертання і моментом; технологічними параметрами: продуктивністю, тиском на виході технологічного механізму і в трубопровідній мережі, і т.д.

Якісне управління технологічним комплексом нерозривно пов'язано з процесами енергоуправління і енергоперетворення в ЕМС. Для вирішення завдання досить важливо знати, чи володіє об'єкт властивістю керованості чи ні, при цьому ЕМС може складатися з підсистем з різним ступенем керованості. Зниження керованості системи відбувається в результаті прояву специфічних властивостей електромеханічного обладнання, спрацьовування елементів з нелінійними характеристиками і характеризується певними умовами перетікання енергії в усіх ланках технологічного ланцюга. Підвищення керованості об'єкта направлено на забезпечення економічних режимів енергоспоживання і необхідної технологічної надійності. Стосовно до гідротранспортного комплексу, ці питання важливі при управлінні технологічними параметрами насосної установки з метою забезпечення раціональних енергетичних режимів роботи турбомеханізмів; при управлінні

процесами, що протікають в ході розвитку наслідків аварійного відключення насосів, різкого закриття клапанів і ін., в результаті чого розривається функціональний зв'язок між підсистемами електромеханічного комплексу і втрачається можливість управляти процесами в передаварійний або аварійний періоди.

Для аналізу протікання тих чи інших процесів, оцінки стану ЕМС в теорії автоматичного управління, теорії автоматизованого електроприводу використовуються такі поняття, як стійкість і чутливість системи, показники якості перехідного процесу і показники регулювання швидкості електроприводу, і т.п.

Стійкість системи визначається внутрішніми властивостями самої системи і не залежить від характеру діючих на неї збурень. Стійкість або нестійкість системи характеризується розташуванням коренів її характеристичного рівняння. Для її дослідження існує цілий ряд методів (алгебраїчних і частотних), розроблені критерії та підходи підвищення стійкості систем. Таким чином, стійкість системи має строгу математичну формулювання, проте, ця характеристика не відображає зміну енергетичних процесів в системі.

Стійкість системи - необхідна, але далеко не достатня умова її практичної придатності. Якість системи визначається, перш за все, точністю управління будь-яким об'єктом або процесом. Для оцінки якості управління ЕМС розроблені критерії або показники якості, до яких відносяться точність, запас стійкості, швидкодія і т.д. Критеріями запасу стійкості служать величина перерегулювання, число коливань перехідного процесу, його загасання і коливання, тобто параметри, що мають відоме математичний опис.

Через цілого ряду причин (зносу, впливу різного роду зовнішніх факторів) фактичні показники якості функціонування системи відрізняються від розрахункових. Чутливість - властивість системи змінювати свої вихідні характеристики (показники якості) при відхиленні тих чи інших параметрів від розрахункових (номінальних) значень. Кількісно ця властивість оцінюється

функціями чутливості, що дозволяють визначити в кожен момент часу фактичне значення додаткового руху при відомих варіаціях параметрів.

Для аналізу регулювальних характеристик електроприводу відомі такі показники як жорсткість механічних характеристик, економічність, точність, плавність регулювання і т.п., які, однак, не зачіпають особливостей і вимог, що впливають із взаємозв'язку електроприводу з технологічним механізмом. В даний час відсутня чітка формалізація цих показників.

При оцінці якісних характеристик ЕМС, для вирішення питань підвищення їх економічності і надійності необхідно орієнтуватися на інтегровані оцінки, що враховують як властивості систем приводу, так і особливості технологічних механізмів. Це пояснюється тим, що система приводу і технологічний механізм в сукупності утворюють єдиний електромеханічний комплекс зі своїми характеристиками і вимогами.

Керованість - найбільш важлива характеристика об'єкта, хоча і досить невизначена на сьогоднішній момент. У більшості робіт визначення повної керованості системи зводиться до її здатності переходу з будь-якого початкового стану в кінцеве при деякому керуючому впливі протягом кінцевого інтервалу часу. Однак, це поняття досі застосовується тільки по відношенню до лінійних стаціонарних систем в задачах фінітного управління. Аналіз існуючих підходів показав, що в даний момент відсутня математичний опис і критерії оцінки керованості ЕМС.

Керованість системи електроприводу, керованість об'єкта по технологічному параметру, керованість перетворювача, пристроїв захисту - це складові єдиного комплексного показника - керованості всього технологічного комплексу. Стійкість, показники якості перехідного процесу, регулювання швидкості електроприводу - часткові оцінки того чи іншого об'єкта (процесу). Керованість системи - показник якості функціонування об'єкта більш загального роду, що дозволяє відтворювати реакції на керуючі, ті, хто підбурює і впливи, що задають, що змінюються в процесі роботи і виникають як в нормальних (експлуатаційних), так і в позаштатних (аварійних) ситуаціях в системах електроприводу і технологічних механізмів. Таке тлумачення

керованості обумовлює пошук підходів, що забезпечують математичну формалізацію і оцінку цього поняття.

У роботах показано, що в основі оцінки керованості системи лежить аналіз процесів енергоспоживання в ідеальній системі, тобто при відсутності найбільш характерних нелінійностей, і в системі з тими ж параметрами при наявності характерних нелінійностей при одному і тому ж сигналі завдання, що складається з двох компонент - постійної і знакозмінної складових:  $U(t) = U_0 + U_{km} \sin k\Omega t$ , де  $U_0$  - постійна складова ( нульова гармоніка);  $U_{km}$  - амплітудне значення напруги k-ої гармоніки;  $\Omega = 2\pi f$  - кутова частота змінної складової напруги. Використання апарату миттєвої потужності дозволяє досліджувати енергопроцеси в електричних, механічних і гідравлічних ланках ЕМС [11].

Модель електромеханічного комплексу, що включає електропривод постійного струму, технологічний механізм, трубопровідну мережу з запірною регулюючою арматурою, наведена на рис.1, де суцільними лініями показані блоки ідеальної (лінійної) системи, пунктирними - вводяться нелінійності: в якірному ланцюгу системи «нереверсивний перетворювач - двигун » залежність  $R_{яц}(I_a(t))$  враховує нелінійні властивості джерела живлення, що залежать від напрямку струму, узгодження характеристик випрямної і інверторної частин преобразовательного пристрої; в ланцюзі збудження залежність  $k\Phi(I_B)$  враховує нелінійний характер зміни потоку від струму збудження; в механічному контурі системи залежність  $M_c(\omega)$  відображає специфіку роботи технологічного механізму.

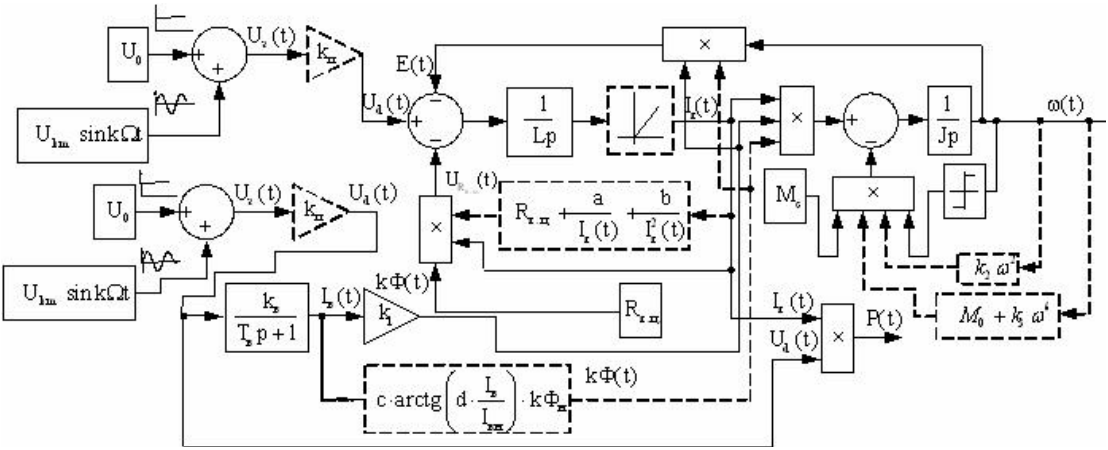


Рисунок 4.20 - Структурна схема моделі електромеханічного комплексу

Математичний апарат, що описує модель ЕМС, а також вирази для вводяться нелінійностей. Параметри моделюючого електродвигуна:  $P_H = 75$  кВт;  $U_H = 220$  В;  $I_H = 340,9$  А;  $n_0 = 1500$  об / хв. В результаті досліджень отримано, що зниження керованості супроводжується енергетичними процесами з вищими гармонійними в спектрі потужності, амплітуду яких можна змінювати керуючими і задають впливами певного виду.

Для кількісної оцінки керованості ЕМС доцільно ввести такі показники:

- енергетичні - коефіцієнти керованості системи по потужності джерела живлення  $k_{y,i}$ , активної потужності  $k_{y,a}$ , теплових втрат потужності  $k_{y,t}$ , гідравлічної потужності  $k_{y,r}$ , механічної потужності  $k_{y,mex}$ ;

- електромеханічні - коефіцієнти керованості електроприводу (ЕП) по току  $k_{y,i}$ , швидкості  $k_{y,\omega}$ , моменту  $k_{y,m}$ ;

- технологічні - коефіцієнти керованості по подачі  $k_{y,q}$ , напору  $k_{y,h}$ .

Зупинимося докладніше на деяких з них.

Коефіцієнт керованості системи по потужності джерела живлення має вигляд:

$$k_{y,i} = \frac{P_{\text{эф}}}{P_{\text{эл}}}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{эф}}$ ,  $P_{\text{эл}}$  - ефективні значення потужності в фактичній (нелінійній) і ідеальній (лінійній) системах, відповідно.

Ефективна потужність визначається виразом:

$$P_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} p^2(t) dt} = \sqrt{\left( \sum_{k=0}^{k(m=n)} P_{k0} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{ka}^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{kb}^2}, \quad (2)$$

де  $p(t)$  - сигнал миттєвої потужності;  $P_{k0}$ ,  $P_{ka}$ ,  $P_{kb}$  - постійна складова і амплітуди змінних складових миттєвої потужності (косинусна і синусна складові).

Очевидно, якщо система повністю керована, то коефіцієнт керованості  $k_{y,i} = 1.0$ ; при некерованій системі -  $k_{y,i}$  прямує до нуля. Коефіцієнт  $k_{y,a}$  дозволяє оцінити зміна активної потужності в ЕМС:

$$k_{y,a} = \frac{P_{a,\phi}}{P_{a,l}}, \quad (3)$$

де  $P_{a,\phi}$ ,  $P_{a,l}$  - середні за період значення активної потужності в фактичній і лінійній системах відповідно;  $P_a = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$ , де  $u(t), i(t)$  - сигнали миттєвих значень напруги і струму відповідно;  $T$  - період інтегрування.

Зміна теплових втрат потужності відображає коефіцієнт:

$$k_{y,r} = \frac{P_{r,\phi}}{P_{r,l}}, \quad (4)$$

де  $P_{r,\phi}$ ,  $P_{r,l}$  - середні за період значення втрат потужності на активному опорі в нелінійній і лінійній системах відповідно;  $P_r = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T R_{яц} \cdot i^2(t) dt$ , де  $R_{яц}$  - опір якорного ланцюга.

Залежно енергетичних показників керованості ЕМС з нелінійністю в силовому контурі електродвигуна для навантаження виду  $M_c = \text{const} = 0.5M_n$  від амплітуди змінної складової задає полігармонічної напруги, наведені на рис. 4.21.

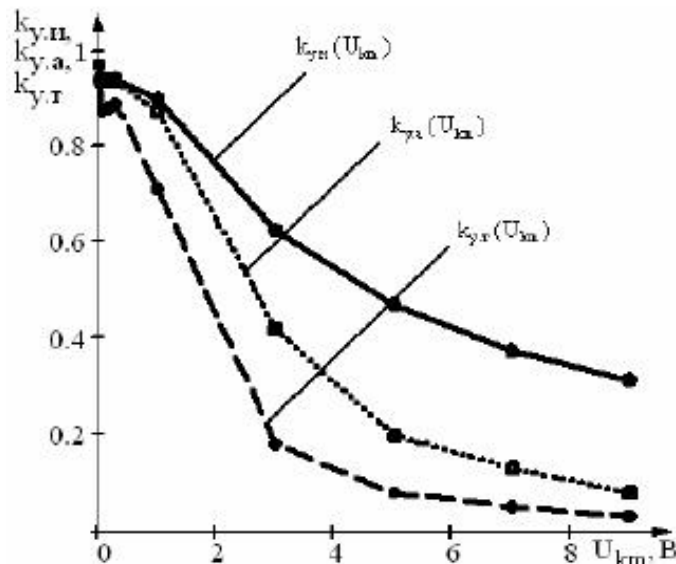


Рисунок 4.21 - Криві зміни енергетичних показників керованості ЕМС від амплітуди змінної складової полігармонічного напруги при  $\Omega = 12.56 \text{ c}^{-1}$ . ( $f = 2 \text{ Гц}$ )

Аналіз отриманих кривих показав, що в області малих амплітудних значень змінної складової вхідної напруги (соті і десяти частки 1 В нелінійні властивості залежно  $R_{яц}$ . ( $I_{я}(t)$ ) практично не виявляються; з ростом амплітуди змінної складової сигналу завдання відбувається інтенсивне зниження коефіцієнта керованості; збільшення частоти змінної складової полігармонічної напруги також призводить до зменшення показника  $k_{y,i}$ .

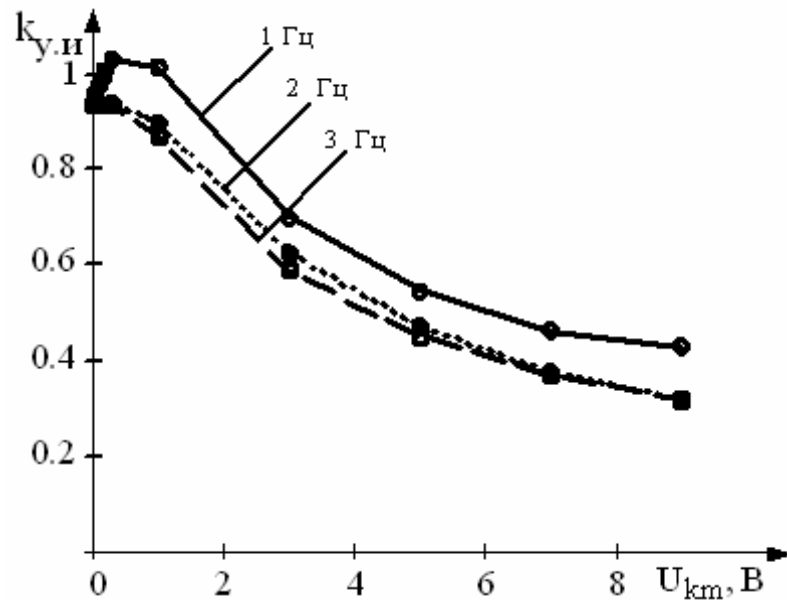


Рисунок 4.22 - Криві зміни енергетичних показників керованості ЕМС від амплітуди змінної складової полігармонічного напруги при  $\Omega = 6.28 \div 18,84 \text{ c}^{-1} \cdot (f = 1 \div 3 \text{ Гц})$

Коефіцієнт керованості системи електроприводу по швидкості має вигляд:

$$k_{y,\omega} = \omega_{\text{ср.ф}} \setminus \omega_{\text{ср.л}}, \quad (5)$$

де  $\omega_{\text{ср.ф}}$ ,  $\omega_{\text{ср.л}}$  - середні за період значення кутової швидкості у фактичній та лінійній системах відповідно;

$\omega_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega(t) dt$ , де  $\omega(t)$  - сигнал миттєвої кутової швидкості електродвигуна.

Аналогічним чином розраховуються середні значення струму в якірному ланцюгу, визначається електромеханічний коефіцієнт керованості системи по току. Криві зміни електромеханічних коефіцієнтів керованості від амплітуди



змінної складової полігармонічного напруги з кутовою частотою  $\Omega=12.56\text{с}^{-1}$  ( $f=2\text{Гц}$ ) при моменті опору  $M_c=0.5M_H$  наведені на рис.4.23.

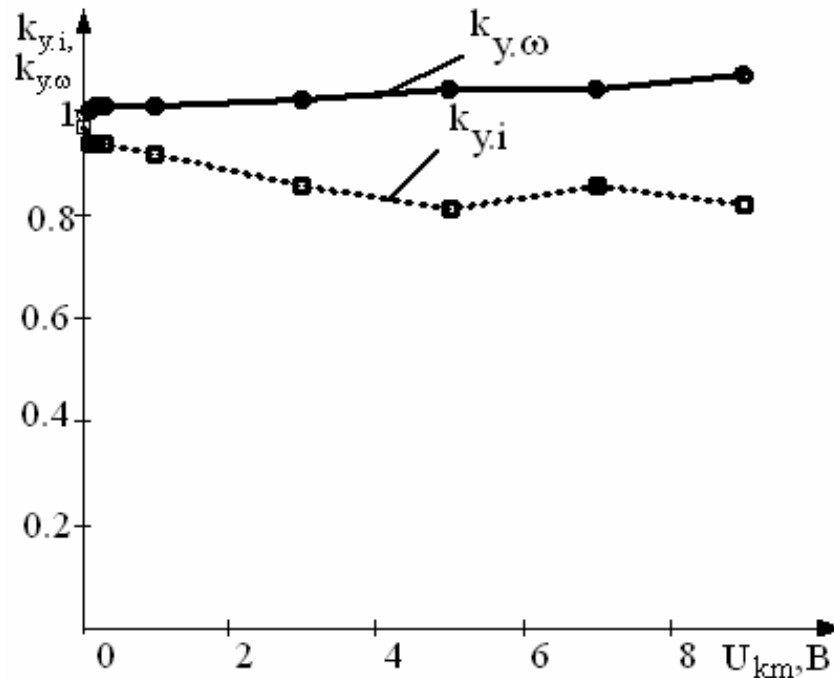


Рисунок 4.23 - Залежності коефіцієнтів керуваності по току і швидкості від амплітуди змінної складової задає напруги

В роботі досліджені енергетичні процеси і показники керуваності системи при різному по величині і виду моменті опору, що подається на вал електродвигуна (рис. 4.24).

З аналізу отриманих кривих видно (рис. 4.24, а)), що ЕМС більш чутлива до вводимих нелінійних в області  $M_c = (0,1 \div 0,3) M_H$ ; зі збільшенням прикладаемого моменту опору коефіцієнт керуваності  $k_{y,i}$  знижується більш плавно. Криві  $k_{y,i} = f(U_{km})$  при моменті опору, що залежить від кутової швидкості електродвигуна, наведені на рис. 4.24, б), де  $M_c = k \cdot \omega^2$  відповідає навантаженню, створюваних турбомеханізмів при роботі на трубопровідну мережу без протитиску;  $M_c = M_0 + k \cdot \omega^6$  - відображає роботу турбомеханізму при груповому характері навантаження на мережу з протитиском. З графіків видно, що криві  $k_{y,i} = f(U_{km})$  мають явно виражений максимум при  $U_{km} = 1 \text{ В}$ ; при подальшому збільшенні амплітуди змінної складової задає напруги нелінійний характер навантаження призводить до зниження керуваності системи.

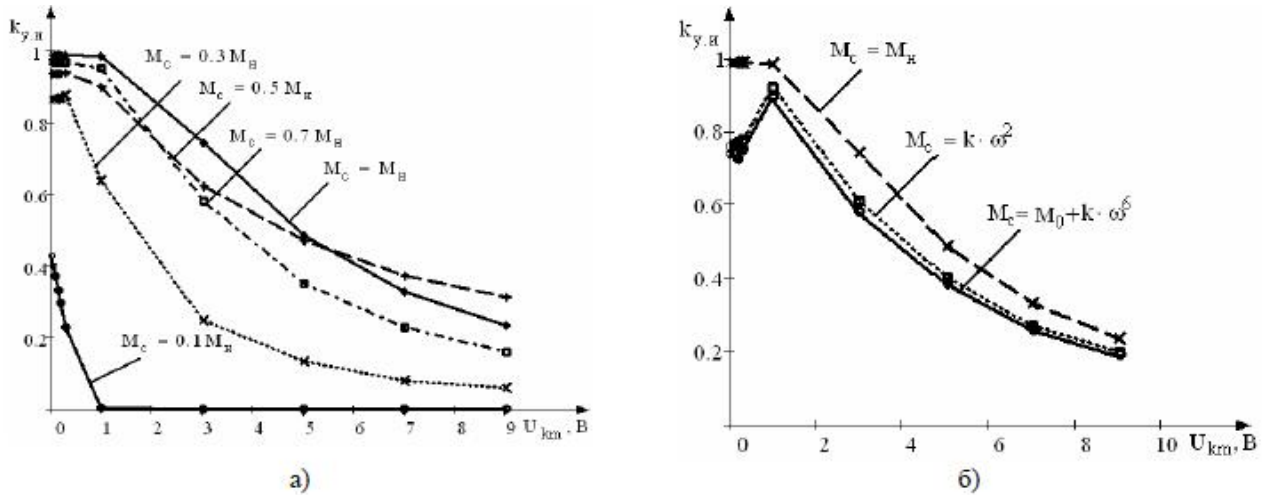


Рис. 4.24 - Криві зміни коефіцієнта керованості від амплітуди змінної складової сигналу напруги в ЕМС з  $M_c = \text{const}$ , а) і  $M_c = f(\omega)$ , б)

Таким чином, керованість системи - це важливий показник якості функціонування об'єкта, що враховує властивості і вимоги, як систем електроприводу, так і технологічних механізмів, що дозволяє забезпечити економічне і надійне реагування ЕМС на керуючі, ті, хто підбурює і впливи, що задають, що змінюються в процесі роботи і виникають як в нормальних, так і в аварійних режимах роботи. Дослідження керованості системи безпосередньо пов'язане з аналізом процесів споживання (генерації) і перетворення енергії у всіх ланках електромеханічного комплексу при заданому впливі полігармонічного характеру. Для оцінки керованості об'єкта запропоновані кількісні показники на базі енергетичних, електромеханічних і технологічних коефіцієнтів керованості, що відображають вплив нелінійних властивостей елементів, що виявляються в тих чи інших режимах, на якість функціонування всієї електромеханічної системи.