

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний гірничий університет**



**Кафедра електропривода**

**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
дисципліни «Спеціальні питання систем керування електроприводами»**

**Модуль №1**

для студентів спеціальності 7.092203  
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

**Дніпропетровськ  
2005**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний гірничий університет**

**Кафедра електропривода**

**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
дисципліни «Спеціальні питання систем керування електроприводами»**

**Модуль №1**

для студентів спеціальності 7.092203  
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

**Дніпропетровськ  
2005**

Матеріали методичного забезпечення дисципліни «Спеціальні питання систем керування електроприводами». Модуль №1 для студентів спеціальності 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» / Упорядн.: С.М. Довгань, О.О. Азюковський, А.А. Самойленко. – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2005. – 46 с.

Упорядники:

С.М. Довгань, канд. техн. наук, професор;

О.О. Азюковський, канд. техн. наук, доцент;

А.А. Самойленко, канд. техн. наук, асистент.

Затверджено методичною комісією з напрямку 0922 «Електромеханіка» (протокол № 6 від 16.06.05) за поданням кафедри електропривода (протокол № 6 від 26.05.05).

Подано методичні рекомендації до навчальної діяльності студента з усіх видів навчальних занять, лекцій, лабораторної та самостійної роботи за модулем №1 з дисципліни «Спеціальні питання систем керування електроприводами» освітньо-кваліфікаційної програми підготовки фахівців за спеціальністю 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

Рекомендовано до видання Навчально-методичним управлінням НГУ 01.07.05.

## ВСТУП

Дисципліна "Спеціальні питання систем керування електроприводами" є логічним продовженням базової дисципліни "Системи керування електроприводами" тому належить до групи професійно-орієнтованих дисциплін і займає важливе місце у вихованні фахівців за спеціальністю 7.092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод". Вона формує комплекс знань та умінь освітньо-кваліфікаційної характеристики, пов'язаних із синтезом, аналізом та корегуванням систем автоматичного керування електроприводами, і підґрунтям при вивченні дисциплін даної спеціалізації.

Матеріали методичного забезпечення розроблені у вигляді трьох послідовних, логічних, але не взаємозв'язаних модулів, що містить дисципліна "Спеціальні питання систем керування електроприводами":

- керування швидкістю однозонного електропривода постійного струму з урахуванням пружного зв'язку в механічній передачі;
- керування швидкістю в однозонному електроприводі постійного струму з пружним зв'язком та спостерігачем стану повного порядку;
- однозонний електропривод постійного струму з адаптивною системою автоматичного керування.

На лекційних заняттях студенти повинні оволодіти методологіями, а на лабораторних роботах отримати певні навички.

Для успішного виконання лабораторних робіт необхідно заздалегідь знати, які роботи і в якій послідовності необхідно виконувати. Отримуючи графік виконання робіт, студенти самостійно готуються до них, вивчаючи матеріал відповідного лекційного модулю, а також рекомендовану літературу. Студент повинен заздалегідь оформити звіт із вихідними даними лабораторної роботи.

До виконання роботи допускаються студенти, які відповідним чином підготовлені, мають оформлені вихідні дані до звіту, знають відповіді на запитання для самоперевірки та послідовність виконання роботи.

Результати досліджень необхідно показати керівнику роботи раніш, ніж занести їх у кінцевий звіт.

Після проведення відповідних розрахунків та досліджень скласти звіт. Зміст звіту розтлумачений в інструкції до відповідної роботи. Для економії часу рекомендовано роздруковувати на принтері графіки та машинні програми відповідних розрахунків.

Виконані в повному обсязі завдання оцінюються в п'ять балів (кожне виконане завдання оцінюється в 1 бал).

При виявленні будь-яких програмних збоїв комп'ютерної техніки необхідно довести до відома викладача або лаборанта.

## Керування швидкістю однозонного електропривода постійного струму з урахуванням пружного зв'язку в механічній передачі

Мета – вивчення особливостей розрахунку параметрів регуляторів, корегуючих та зворотних зв'язків однозонного електропривода постійного струму з пружним зв'язком при підпорядкованому регулюванні параметрів та моделювання такої електромеханічної системи за допомогою математичного пакету MatLab.

### I. ЛЕКЦІЙНИЙ МОДУЛЬ

Задача – оволодіти методологією:

- складання диференціальних рівнянь двомасових пружних систем;
- складання структурних схем двомасових пружних систем;
- побудови структурних схем систем підпорядкованого регулювання параметрів з урахуванням пружності в механічній передачі;
- виконання складних математичних перетворень з використанням апарату передатних функцій;
- аналізу впливу пружного зв'язку на контур струму та швидкості в однозонному двоконтурному електроприводі постійного струму;
- налагодження контуру швидкості однозонного електропривода з системою підпорядкованого регулювання параметрів із урахуванням пружного зв'язку;
- синтезу та аналізу способів корегування системи підпорядкованого регулювання з урахуванням пружності в механічній передачі.

#### 1. Загальні положення

В реальних системах електропривода представлення жорстким зв'язок валу двигуна з механізмом є припущенням, що у деяких випадках неприпустимо [1-3]. Практично будь-який зв'язок двигуна з виконавчим органом є абсолютно не жорстким, і можливість нехтування явищем пружності іноді пов'язана з тим, що власна частота пружних коливань системи "двигун–виконавчий механізм" (Д-ВМ) є досить великою у порівнянні з частотами коливань властивими системі керування електроприводом. Тому підвищення швидкодії електромеханічної системи, що зумовлене застосуванням тиристорних або транзисторних перетворювачів і високоякісних елементів системи керування, іноді неможливе у наслідок суттєвого впливу пружності в механічній передачі на якість перехідних процесів електропривода.

Розглянемо елементарну систему Д-ВМ, що складається із зосередженої маси ротора двигуна та механізму, які обертаються та зв'язані між собою редуктором і довгим валом (рис. 1). Вважатимемо, що  $J_1$  – момент інерції ротора двигуна та редуктора,  $J_2$  – момент інерції

виконавчого механізму (ВМ). При аналізі таких систем можна зробити такі припущення:

- зусилля та моменти в системі прикладені до зосереджених мас, що не зазнають деформації;
- пружні зв'язки невагомі та характеризуються сталим жорстким зв'язком, тобто коефіцієнтом пропорційності між моментом (зусиллям) та деформацією;
- деформація пружних ланок лінійна та підпорядковується закону Гука;
- хвильовий рух деформації відсутній.

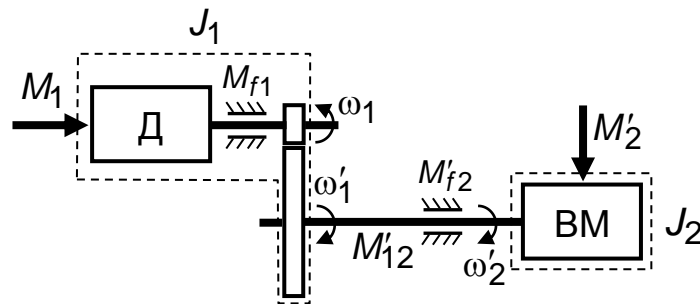


Рис. 1. Кінематична схема системи Д-ВМ

Якщо жорсткість виконавчого валу (ВВ) –  $c'_в$ , а редуктору та муфти –  $c'_{ред}$ , то зв'язок буде характеризуватись еквівалентною жорсткістю  $c' = c'_в c'_{ред} / (c'_в + c'_{ред})$ .

Будемо вважати, що під впливом прикладених до ротору двигуна і механізму зовнішніх моментів  $M_1$  та  $M'_2$  пружний зв'язок скручений під деяким початковим кутом. Після зникнення зовнішніх моментів в системі виникнуть затухаючі коливання. Якщо двигун вимкнений від мережі живлення, тобто не демпфірує коливання, то останні будуть затухати за рахунок сил тертя, на подолання яких витрачається енергія, що запасена пружною системою. Для опису таких зусиль найчастіше використовують спрощення щодо теорії лінійності. Демпфірування коливань здійснюється за рахунок сил внутрішнього тертя в речовині пружного зв'язку, що пропорційні різниці швидкостей першої  $\omega_1$  та другої  $\omega_2$  мас, а також за рахунок сил зовнішнього в'язкого тертя на першій та другій масах, що в першому наближенні можуть бути прийняті пропорційними швидкостям відповідних мас:  $M_{f1}(p) = a_1 \cdot \omega_1(p)$ ;  $M'_{f2}(p) = a'_2 \cdot \omega'_2(p)$ .

З урахуванням прийнятих припущень механічну систему (рис. 1) в операторній формі можна описати наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} M_1(p) - \frac{1}{i} \{ M'_{12}(p) - b'[\omega'_1(p) - \omega'_2(p)] \} - a_1 \omega_1(p) &= J_1 p \omega_1(p); \\ M'_{12}(p) + M'_2(p) - b'[\omega'_2(p) - \omega'_1(p)] - a'_2 \omega'_2(p) &= J_2 p \omega'_2(p); \\ M'_{12}(p) &= \frac{c'}{p} [\omega'_1(p) - \omega'_2(p)], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $a_1$ ,  $a'_2$  – коефіцієнти в'язкого тертя;  $b'$  – коефіцієнт внутрішнього тертя в пружній передачі;  $i$  – передатне число редуктора; приведення величин,

що позначені штрихами:

$$M(p) = \frac{M'(p)}{i}; \quad \omega_2(p) = i \cdot \omega'(p); \quad J_2 = \frac{J_2'}{i^2}; \quad a_2 = \frac{a_2'}{i^2}; \quad c = \frac{c'}{i^2}; \quad b = \frac{b'}{i^2}. \quad (2)$$

З урахуванням приведених значень параметрів і змінних рівняння (1) набувають вигляду:

$$\left. \begin{aligned} M_1(p) - M_{12}(p) - b[\omega_1(p) - \omega_2(p)] - a_1\omega_1(p) &= J_1 p \omega_1(p); \\ M_{12}(p) + M_2(p) + b[\omega_1(p) - \omega_2(p)] - a_2\omega_2(p) &= J_2 p \omega_2(p); \\ M_{12}(p) &= \frac{c}{p} [\omega_1(p) - \omega_2(p)]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Згідно з системою рівнянь (3) на рис. 2 побудоване структурне представлення двомасової пружної системи, кінематична схема якої зображена на рис. 1.

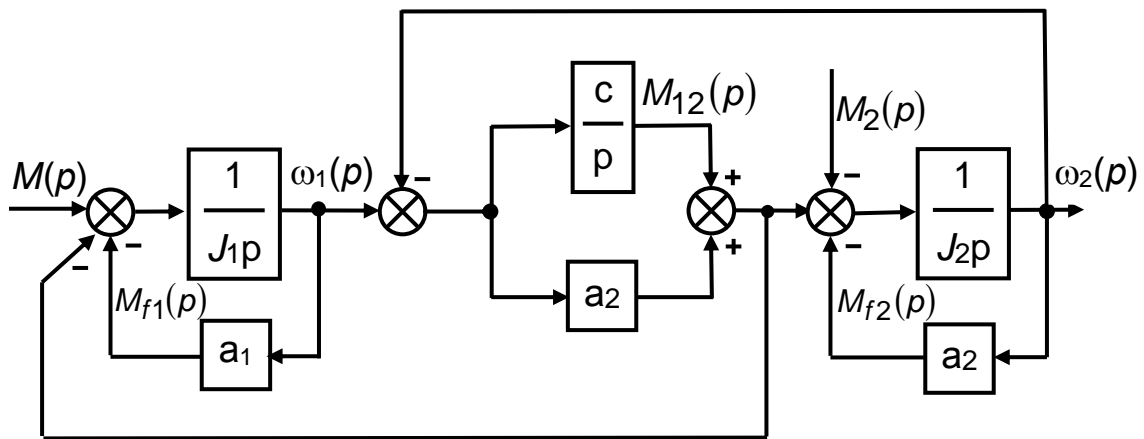


Рис. 2. Структурна схема механічної частини електропривода (Д-ВМ)

Взагалі, наявність внутрішніх дисипативних сил в передачі, сухого та в'язкого тертя в опорах, кінематичних похибок та люфтів враховує узагальнена структурна схема механічної частини електропривода (рис. 3), де оператор "p" для спрощення не показаний. Рівняння, що її описують:

$$\left. \begin{aligned} M - M'_{c1} - M''_{c1} - M_{f1} - M'_{12}(1 + \beta \operatorname{sign} M'_{12}) &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M'_{12} - M'_{c2} - M''_{c2} - M_{f2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \end{aligned} \right\}$$

де  $M_{12} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_{кл} - \Delta\varphi_3/2)$ , якщо  $|\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_{кл}| > \Delta\varphi_3/2$ ;  
 $M_{12} = 0$ , якщо  $|\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_{кл}| < \Delta\varphi_3/2$ ;  $M'_{12} = M_{12} + b dM_{12}/dt$  – пружний момент з урахуванням внутрішнього тертя;  $M'_{c1}$ ,  $M'_{c2}$  – активні сталі моменти навантаження на відповідних валах;  $M''_{c1}$ ,  $M''_{c2}$ ,  $M_{f1}$ ,  $M_{f2}$  – відповідні моменти сухого та в'язкого тертя в опорах;  $\Delta\varphi_{кл}$  та  $\Delta\varphi_3$  – відповідно величина кінематичної похибки та люфту;  $J_1$ ,  $J_2$  – моменти

інерції двигуна та механізму, приведеного до валу двигуна;  $a_1$ ,  $a_2$  – приведені до валу двигуна коефіцієнти в'язкого тертя в опорах;  $c_{12}$ ,  $b$  – відповідно коефіцієнти жорсткості та внутрішнього в'язкого тертя механічної передачі, що приведені до валу двигуна;  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності змінної складової сили тертя.

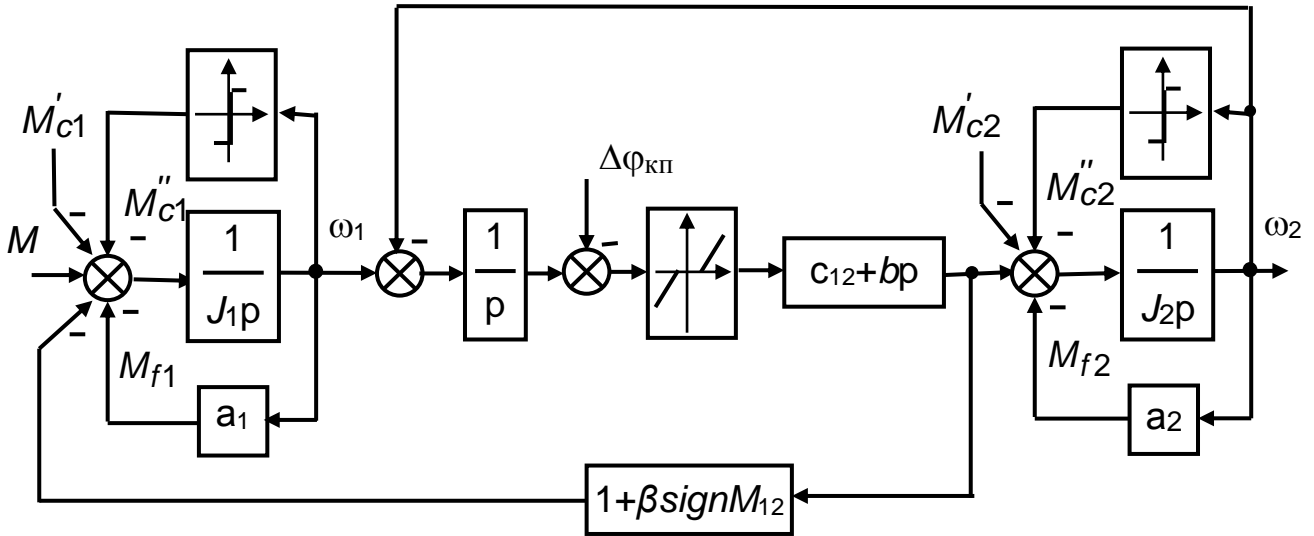


Рис. 3. Узагальнена структурна схема механічної частини електропривода

На практиці рідко виникає необхідність одночасно враховувати в моделі усі фактори та нелінійності, що показані на рис. 3. Завдяки попередньому аналізу співвідношення параметрів конкретної механічної системи часто вдається спростити її математичний опис, що сприяє полегшенню подальших досліджень, наприклад, на рис. 4, а представлена структурна схема однозонного електропривода постійного струму з двоконтурною системою автоматичного керування (САК) швидкістю двигуна за умови врахування тільки пружності механічної передачі.

## 2. Оцінка впливу пружності на роботу системи керування швидкістю однозонного електропривода при стандартному налагодженні контурів регулювання

Наявність в електромеханічній системі пружних ланок призводить до значного ускладнення об'єкту керування у порівнянні з жорсткою електромеханічною системою. Вплив пружного зв'язку на двигун (рис. 4, а) має місце на вході ланки  $1/(J_1 p)$  у вигляді моменту  $M_{\Gamma}$ , що визначає ступінь електромеханічного зв'язку між ВМ та двигуном. Коли параметри об'єкту такі, що зв'язок сильний, пружність суттєво впливає на контур швидкості, а при певних умовах і на контур струму. В такому випадку, реалізація стандартного налагодження контурів, що приймається для жорстких систем, стає неможливою. Доводиться або



суттєво знижувати коефіцієнти підсилення регуляторів, або шукати інші способи налагодження, що забезпечують достатній запас стійкості контурів при задовільній швидкодії. За умови слабого електромеханічного зв'язку (наприклад, за умови  $J_2 \ll J_1$ ) вплив зі сторони механізму на двигун відносно малий. У такому випадку контури струму та швидкості можна налагоджувати так само, як і в жорсткій системі. Це означає, що двигун не демпфірує коливання механізму і останні затухають за рахунок сил тертя. Іноді це не припустимо, тому в такому випадку необхідно переналагоджувати регулятори або навіть скорегувати структуру системи керування (використовувати як жорсткі, так і гнучкі зворотні зв'язки).

Перш ніж перейти до аналізу впливу пружності на контур струму та швидкості, виконаємо певні структурні перетворення схеми на рис. 4, а. Згорнувши частину структурної схеми, що позначена пунктирною лінією на рис. 4, а, отримаємо структурну схему рис. 4, б, де передатна функція згорнутого контуру отримана на підставі наступного перетворення:

$$W_{12}(p) = \frac{\frac{C_{12} \cdot 1}{p} \cdot \frac{1}{J_2 p}}{1 + \frac{C_{12} \cdot 1}{p} \cdot \frac{1}{J_2 p}} = \frac{C_{12}}{J_2 p^2 + C_{12}} = \frac{1}{p^2 \frac{J_2}{C_{12}} + 1}.$$

Передатна функція співвідношення швидкості та моменту двигуна знаходиться на підставі перенесення передатної функції  $W_{12}(p)$  із одночасним добутком на ланку  $J_2 p$  відповідно рис. 4, в. Для подальшого згорнення структурного представлення (рис. 4, в) необхідно ввести нові позначки, що суттєво спрощують схему. Співвідношення моментів інерції двигуна та ВМ:

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1} = \frac{J_\Sigma}{J_1}, \quad (4)$$

де  $J_\Sigma$  – сумарний момент інерції.

Стала часу пружних коливань двомасової системи за умови, що перша маса системи нерухома (швидкість двигуна –  $\omega_1 = 0$ , а швидкість ВВ –  $\omega_2 \neq 0$ ):

$$T_n = \sqrt{\frac{J_1 \cdot J_2}{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}}. \quad (5)$$

Слід відзначити, що частота власних коливань двомасової системи, яка має місце у перехідних режимах роботи, коли перша маса системи нерухома (швидкість ВВ –  $\omega_2 \neq 0$ ) відповідно до рівняння (5) розраховується за виразом:

$$\Omega_0 = \frac{1}{T_n} = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}}. \quad (6)$$

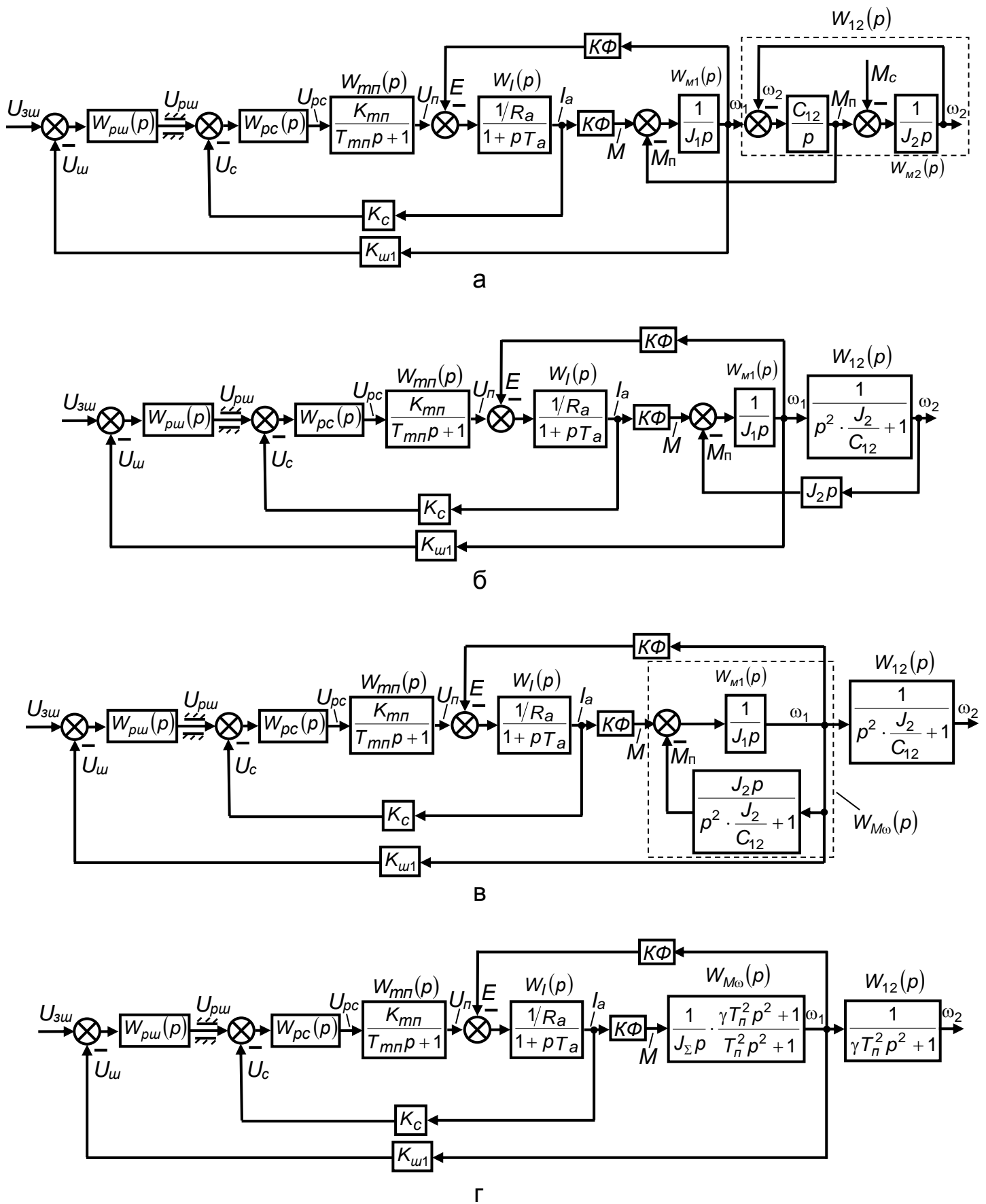


Рис. 4. Структурна схема однозонного електропривода з урахуванням пружності в механічній передачі

З урахуванням виразу (4) та (5), передатна функція  $W_{12}(p)$  приймає інший вигляд:

$$W_{12}(p) = \frac{1}{p^2 \frac{J_2}{C_{12}} + 1} = \frac{1}{p^2 \cdot \frac{(J_1 + J_2)}{J_1} \cdot \frac{J_2}{C_{12}} \cdot \frac{J_1}{(J_1 + J_2)}} = \frac{1}{p^2 \cdot \gamma \cdot T_n^2 + 1}. \quad (7)$$

Враховуючи (7) при згорненні частини структурної схеми, що позначена пунктирною лінією на рис. 4, в, отримуємо структурну схему рис. 4, г, де передатна функція згорнутого контуру  $W_{M\omega}(p)$  отримана на підставі наступного перетворення:

$$W_{M\omega}(p) = \frac{\frac{1}{J_1 p}}{1 + \frac{1}{J_1 p} \frac{J_2 p}{p^2 \gamma T_n^2 + 1}} = \frac{p^2 \gamma T_n^2 + 1}{\left( p^2 \gamma T_n^2 + 1 \right) J_1 p + J_2 p} = \frac{p^2 \gamma T_n^2 + 1}{p^2 \gamma T_n^2 + J_\Sigma p} = \frac{1}{J_\Sigma p} \frac{p^2 \gamma T_n^2 + 1}{p^2 T_n^2 + 1}.$$

Введемо наступні позначки:

$$\left. \begin{aligned} W_1(p) &= p^2 T_n^2 + 1; \\ W_2(p) &= p^2 \gamma T_n^2 + 1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Враховуючи (8), передатні функції  $W_{12}(p)$  і  $W_{M\omega}(p)$  відповідно набувають вигляду:

$$\left. \begin{aligned} W_{12}(p) &= \frac{1}{W_2(p)}; \\ W_{M\omega}(p) &= \frac{K\Phi}{J_\Sigma p} \frac{W_2(p)}{W_1(p)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Згідно (9), структурне представлення двоконтурної САК однозонного електропривода набуває іншого вигляду (рис. 5, а). Згорнувши частину структурної схеми, що позначена пунктирною лінією на рис. 5, а, отримуємо структурну схему рис. 4, б. Передатна функція  $W_{ec}(p)$  отримана на підставі наступного перетворення:

$$\begin{aligned} W_{ec}(p) &= \frac{\frac{1/R_a}{1 + pT_a}}{1 + \frac{1/R_a}{1 + pT_a} \frac{K\Phi^2}{J_\Sigma p} \frac{W_2(p)}{W_1(p)}} = \frac{J_\Sigma p W_1(p)}{R_a (1 + pT_a) J_\Sigma p W_1(p) + K\Phi^2 W_2(p)} = \\ &= \frac{\frac{J_\Sigma}{K\Phi^2} p \frac{W_1(p)}{W_2(p)}}{1 + \frac{R_a J_\Sigma}{K\Phi^2} p (1 + pT_a) \frac{W_1(p)}{W_2(p)}} = \frac{1/R_a}{1 + pT_a} \frac{\frac{J_\Sigma R_a p (1 + pT_a)}{K\Phi^2} \frac{W_1(p)}{W_2(p)}}{1 + \frac{R_a J_\Sigma}{K\Phi^2} p (1 + pT_a) \frac{W_1(p)}{W_2(p)}} = \frac{1/R_a}{1 + pT_a} A(p), \end{aligned}$$

$$\text{де } A(p) = \frac{\frac{J_{\Sigma} R_a p (1 + p T_a) W_1(p)}{K \Phi^2} \frac{W_2(p)}{W_2(p)}}{1 + \frac{R_a J_{\Sigma}}{K \Phi^2} p (1 + p T_a) \frac{W_1(p)}{W_2(p)}}$$

Раніш ніж визначити можливі варіанти налагодження регуляторів струму та швидкості в системі з пружним зв'язком, слід оцінити вплив пружності на контури регулювання та виявити при яких співвідношеннях параметрів системи можна використовувати стандартне налагодження.

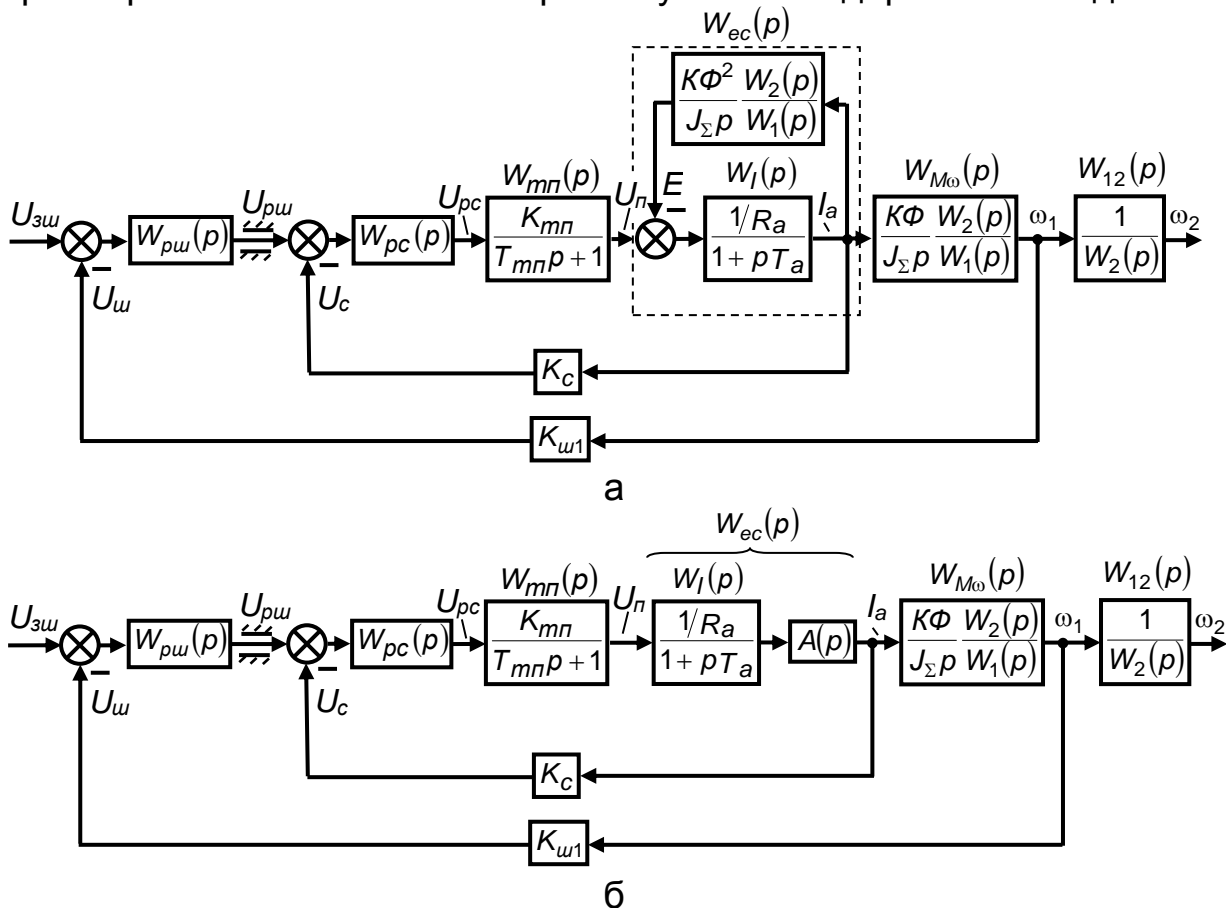


Рис. 5. Структурне представлення системи регулювання швидкістю однофазного електропривода з пружним механічним зв'язком

## 2.1. Оцінка впливу пружності на роботу контуру струму

За рахунок впливу на роботу контуру струму ЕРС, пружний зв'язок може суттєво впливати на перехідні процеси в контурі. З іншого боку, при наявності в САК компенсації ЕРС двигуна, можна повністю ліквідувати негативний вплив пружності на контур струму. Слід враховувати, що наявність ЕРС в режимі ступінчатої зміни навантаження призводить до зменшення динамічної похибки регулювання швидкості, тому в електроприводах, які працюють в таких режимах роботи, бажано не компенсувати ЕРС. Звідси виникає задача оцінки впливу пружності на контур струму з метою виявлення співвідношень параметрів

електромеханічної системи при яких можливе використання стандартного налагодження контуру струму.

Аналізуючи структурне представлення електромеханічної системи з пружним зв'язком (рис. 5, б) виявляється, що впливом пружності на контур струму можна знехтувати в наступних випадках:

1. Коефіцієнт співвідношення мас  $\gamma \approx 1$ . В такому випадку виконується умова  $W_1(p) \approx W_2(p)$ , тобто передатна функція  $A(p)$  така ж сама як і в жорсткій системі. За таких умов, контур струму з урахуванням пружності нічим не відрізняється від контуру струму в жорсткій системі.

2. Параметри системи Д-ВМ такі, що пружний зв'язок не викликає коливань струму якоря в розімкненій системі, тобто виконується умова:

$$T_{em} \geq \sqrt{\gamma} \cdot T_n,$$

де  $T_{em} = \frac{J_\Sigma R_a}{K\Phi^2}$  – електромеханічна стала часу електропривода.

Для даного випадку можливе виконання умови нехтування ЕРС двигуна як і в жорсткій електромеханічній системі:

$$T_{em} \geq 20 \cdot T_{\mu l}, \quad (10)$$

де  $T_{\mu l}$  – "мала" стала часу контуру струму ( $T_{\mu l} = T_{мп} + T_{дс}$ , де  $T_{дс}$  – стала часу датчика струму, згідно рис. 5  $T_{дс} = 0$ ).

Таким чином, передатна функція  $A(p)$  практично не впливає на перехідний процес незалежно від співвідношення параметрів  $T_a$  та  $T_{em}$ .

3. Коливання струму якоря при коливанні механічної частини електропривода в розімкненій системі існують, але швидкодія контуру струму достатньо велика для того, щоб при збуренні у вигляді зміни ЕРС двигуна, значення струму визначалось тільки напругою регулятора швидкості. Можливість нехтування впливом пружності пов'язана з можливістю нехтування дією зворотного зв'язку за ЕРС двигуна на замкнений контур, тобто виконується умова (10) при цьому виконується умова:

$$T_n \geq 5 \cdot T_{\mu l},$$

а умови 1 і 2 не виконуються.

Результати аналізу можливості нехтувати пружністю при стандартному налагодженні контуру струму наведені в табл. 1.

## 2.2. Оцінка впливу пружності на роботу контуру швидкості

Розглядаючи контур швидкості, вважатимемо, що сформульовані вище вимоги щодо нехтування впливом пружністю на контур струму виконуються та зворотним зв'язком за ЕРС можна знехтувати.

Передатна функція розімкненого контуру швидкості відрізняється від передатної функції контуру в жорсткій системі наявністю співмножника  $W_2(p)/W_1(p)$ . Вважаючи регулятор швидкості обраним у такий спосіб, що

в пружній системі здійснюється стандартне налагодження, можна записати

$$W_{\omega p o z}(p) = W_{\omega p o z}^{o p m}(p) \frac{W_2(p)}{W_1(p)},$$

де  $W_{\omega p o z}^{o p m}(p)$  – передатна функція контуру зі стандартним налагодженням в жорсткій системі.

Аналізуючи структурне представлення електромеханічної системи з пружним зв'язком (рис. 5, б) виявляється, що впливом пружності на контур швидкості можна знехтувати в наступних випадках:

1. Коефіцієнт співвідношення мас  $\gamma \approx 1$ . Цілком очевидно, що в такому випадку виконується умова  $W_1(p) \approx W_2(p)$ , тобто  $W_{\omega p o z}(p) \approx W_{\omega p o z}^{o p m}(p)$ . Це означає, що вплив на електропривод зі сторони ВМ мізерний, тобто коливання ВВ не передаються до електропривода, який майже не демпфірує коливання механізму, що затухають за рахунок дисипативних сил.

2. Частота пружних коливань значно вище частоти зрізу контуру швидкості, тобто достатньо щоб виконувалась наступна умова співвідношення сталих часу:

$$T_{\mu \omega} \geq \sqrt{\gamma} \cdot T_{\pi},$$

де  $T_{\mu \omega}$  – "мала" стала часу контуру швидкості ( $T_{\mu \omega} = 2T_{\mu l} + T_{\partial \omega}$ , де  $T_{\partial \omega}$  – стала часу тахогенератора, згідно рис. 5  $T_{\partial \omega} = 0$ ).

3. Частота пружних коливань значно нижче частоти зрізу контуру швидкості, причому повинна виконуватись умова

$$4T_{\mu \omega} \leq T_{\pi}.$$

Оскільки співмножник  $W_2(p)/W_1(p)$  в області високих частот дорівнює  $\gamma$ , тому необхідно знизити коефіцієнт підсилення регулятора швидкості в  $\gamma$  раз у порівнянні з аналогічним коефіцієнтом при стандартному налагодженні контуру швидкості на симетричний або модульний (технічний) оптимум.

Рекомендується використовувати налагодження на модульний оптимум, тобто регулятор швидкості – пропорційний (П):

$$k_{p \omega}^{(\pi)} = \frac{k_{p \omega}^{o p m}}{\gamma}.$$

В табл. 1. наведені результати аналізу впливу пружності на контур швидкості при стандартному налагодженні за симетричним або модульним оптимумом.

Слід ще раз підкреслити, що внаслідок впливу пружності на контур швидкості знижується стійкість контуру, збільшується коливальність та перерегулювання.

## Умови нехтування пружністю на контури регулювання

Контур	№ п/п	Умови можливості нехтування впливом пружності на контур	Примітки	
струму	1	$\gamma \approx 1$	–	
	2	$T_{ем} \geq \sqrt{\gamma} \cdot T_{п}$ , може виконуватись $T_{ем} \geq 20 \cdot T_{\mu I}$	умова 1 не виконується	
	3	$T_{ем} \geq 20 \cdot T_{\mu I}$ та $T_{п} \geq 5 \cdot T_{\mu I}$	умова 1 і частково 2 не виконується	
швидкості	1	$\gamma \approx 1$	–	Зворотним зв'язком за ЕРС можна знехтувати
	2	$T_{\mu \omega} \geq \sqrt{\gamma} \cdot T_{п}$	–	
	3	$4T_{\mu \omega} \leq T_{п}$ (обов'язкова наявність П-регулятора швидкості)	Прийняти $k_{рш}^{(п)} = \frac{k_{рш}^{опт}}{\gamma}$	

Отже, для забезпечення плавного руху ВВ при максимальній швидкодії контуру швидкості, необхідно вирішити задачу визначення додаткових паралельних корегуючих зв'язків і раціональних значень регулятора швидкості. Як правило, корегуючі зв'язки вводяться на вхід контуру швидкості, тим самим забезпечується збереження можливості обмеження струму якоря за рахунок обмеження виходу регулятора швидкості.

### 3. Налаштування системи керування швидкістю однозонного електропривода з пружністю без застосування додаткових паралельних корегуючих зв'язків

В загальному випадку, якщо при синтезі регулятора швидкості жодне з наведених у попередньому параграфі умов не виконується, стандартне налаштування регуляторів не раціональне. Зазвичай наявність пружності призводить до необхідності знижувати швидкодію системи (наприклад, випадок №3 попереднього параграфу). Якщо в жорсткій системі гранична швидкодія визначається сумою "малих" сталих часу, то в системі з пружністю вона залежить від сталої часу пружних коливань. Найчастіше  $T_{\mu \omega} \ll T_{п}$ , тому за умови правильного налаштування регуляторів "малі" сталі часу майже не впливають на перехідні процеси в системі. Тому слід розглянути випадок, коли швидкодія контуру струму відносно велика (передатна функція замкненого контуру струму дорівнює  $\frac{1}{K_c}$ ) та стала часу тахогенератору мала у порівнянні зі сталою часу пружних коливань

( $T_{\partial\omega} \approx 0$ ). Визначимо допустимі значення сталої контуру швидкості  $T_{\mu\omega}$  при якій можливе налагодження регуляторів, яке забезпечує ефективне демпфірування коливань у відповідності з величиною співвідношення моментів інерції за умови, що система не містить "малі" сталі часу. Розглянемо найбільш важкий випадок, коли дисипативними силами в системи нехтують, тобто демпфірування коливань відбувається тільки за рахунок автоматизованого електропривода.

Структурна схема, що побудована на підставі рис. 5 з урахуванням зроблених вище припущень, наведена на рис. 6. Розглянемо випадок, коли використовується П-регулятор швидкості тобто  $W_{p\omega}(p) = K_{p\omega}$ , а передатні функції, що характеризують зміну швидкості двигуна та ВВ при заданій керуючій дії мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega_1(p)}{U_{зш}(p)} &= \frac{1/K_{ш1} (\gamma T_n^2 p^2 + 1)}{\frac{K_c T_n^2 J_\Sigma}{K_{ш1} K_{p\omega} K\Phi} p^3 + \gamma T_n^2 p^2 + \frac{K_c J_\Sigma}{K_{ш1} K_{p\omega} K\Phi} p + 1}; \\ \frac{\omega_2(p)}{U_{зш}(p)} &= \frac{1/K_{ш1}}{\frac{K_c T_n^2 J_\Sigma}{K_{ш1} K_{p\omega} K\Phi} p^3 + \gamma T_n^2 p^2 + \frac{K_c J_\Sigma}{K_{ш1} K_{p\omega} K\Phi} p + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

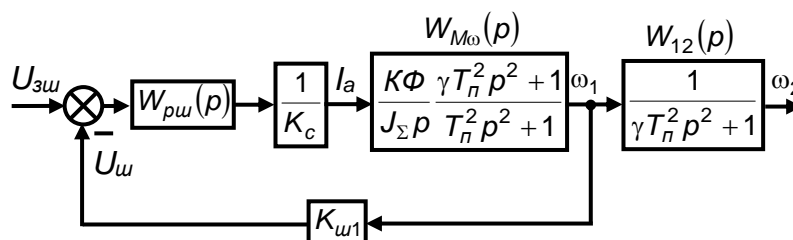


Рис. 6. Структурна схема САК швидкістю з пружним зв'язком при відсутності "малих" сталих часу

Прирівнюючи нулю знаменник першої або другої передатної функції системи (11) отримаємо характеристичне рівняння системи:

$$\frac{K_c T_n^2 J_\Sigma}{K_{ш1} K_{p\omega} K\Phi} p^3 + \gamma T_n^2 p^2 + \frac{K_c J_\Sigma}{K_{ш1} K_{p\omega} K\Phi} p + 1 = 0. \quad (12)$$

Рівняння (12) нормуватимемо за критерієм Вишнеградського.

**Критерій Вишнеградського** є одним із найвідоміших алгебраїчних критеріїв стійкості систем. Критерій було розроблено в 1877 р. для САК парових машин, які мали 3-й порядок диференціальних рівнянь динаміки, чим і обмежується область його використання. Вишнеградський звів характеристичне рівняння, що має чотири коефіцієнти типу (12) або для



спрощення, наприклад,  $a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$ , до рівняння з двома коефіцієнтами  $A$  та  $B$ , які потім дістали назву параметрів Вишнеградського. За таких умов вихідне характеристичне рівняння спочатку було зведене до вигляду:

$$p^3 + C_1 p^2 + C_2 p + C_3 = 0, \quad (13)$$

де  $C_1 = \frac{a_1}{a_0}$ ;  $C_2 = \frac{a_2}{a_0}$ ;  $C_3 = \frac{a_3}{a_0}$ , і для нього знайдено умову стійкості:

$$C_1 C_2 - C_3 > 0. \quad (14)$$

Параметри  $A$  та  $B$  було запропоновано у вигляді:

$$A = \frac{C_1}{\sqrt[3]{C_3}}; \quad B = \frac{C_2}{\sqrt[3]{C_3^2}}. \quad (15)$$

З виразів (15) можна отримати:

$$C_1 = A \sqrt[3]{C_3}; \quad C_2 = B \sqrt[3]{C_3^2}.$$

Після підстановки значень  $C_1$  і  $C_2$  у вираз (13) дістанемо

$$A \sqrt[3]{C_3} \cdot B \sqrt[3]{C_3^2} - C_3 > 0 \text{ або } A \cdot B - 1 > 0, \text{ або } A \cdot B > 1. \quad (16)$$

Останній вираз рівнянь (16) і є умовою стійкості (критерієм) Вишнеградського. Рівняння межі стійкості в площині параметрів  $A$  та  $B$  має вигляд гіперболи  $A \cdot B = 1$  (рис. 7). Праворуч від кривої лежить зона стійкості  $A \cdot B > 1$ , а ліворуч – зона нестійких режимів  $A \cdot B < 1$ .

Приведемо рівняння (12) до рівняння (13), тоді коефіцієнти рівняння набувають вигляду:

$$C_1 = \frac{\gamma K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi}{K_c J_\Sigma}; \quad C_2 = \frac{1}{T_p^2}; \quad C_3 = \frac{K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi}{K_c J_\Sigma T_p^2}. \quad (17)$$

З урахуванням (15) та (17) коефіцієнти Вишнеградського визначаються:

$$A = \gamma \left( \frac{J_\Sigma K_c}{T_p K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi} \right)^{-\frac{2}{3}}; \quad B = \left( \frac{J_\Sigma K_c}{T_p K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (18)$$

З (18) очевидно, що

$$A \cdot B = \gamma. \quad (19)$$

Єдиною величиною, яка може варіюватися а процесі налагодження такої спрощеної системи (рис. 6) є коефіцієнт підсилення регулятора швидкості. При заданих параметрах електромеханічної системи зміна коефіцієнта регулятора швидкості  $K_{p\omega}$  буде призводить до того, що робоча точка на площині діаграми Вишнеградського буде рухатись на характеристичній кривій у вигляді гіперболи, положення якої на діаграмі визначатиметься тільки коефіцієнтом співвідношення мас  $\gamma$  (рис. 7).

При  $\gamma = 1$  характеристична крива  $A \cdot B = 1$  співпадає з границею коливальної стійкості. Це вказує на те, що незалежно від вибору  $K_{p\omega}$

автоматизований електропривод не буде демпфувати коливання ВВ, частота яких  $(\sqrt{\gamma}T_n)^{-1} = T_n^2$ . Чим меншим буде  $K_{p\omega}$  (тобто чим менш  $A$  у порівнянні з  $B$ ), тим меншою буде амплітуда коливань під дією керуючого збурення. Це ілюструється кривими зміни швидкості 1-12 (рис. 7) за умови керуючої дії типу стрибок для точок із координатами, що представлені в табл. 2.

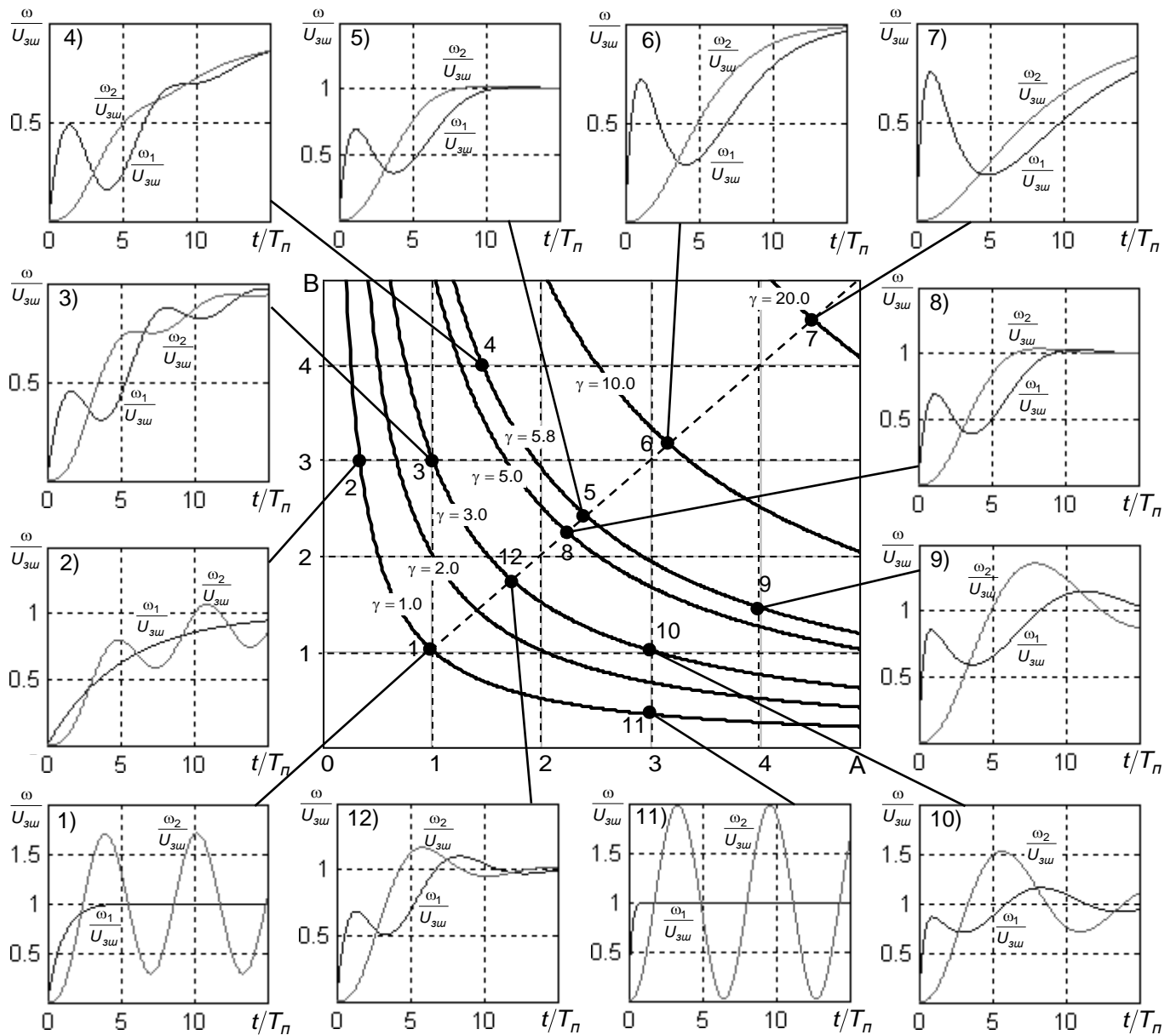


Рис. 7. Вибір бажаного співвідношення параметрів спрощеної електромеханічної системи (рис. 6)

Таблиця 2

Координати точок на рис. 7

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1,0	0,33	1,0	1,45	2,41	3,16	4,47	2,23	4,0	3,0	3,0	1,73
B	1,0	3,0	3,0	4,0	2,41	3,16	4,47	2,23	1,45	1,0	0,33	1,73

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості при будь-яких коефіцієнтах Вишнеградського визначається одним з виразів (18), а підстановка його у формулу (19) показує, що перехідні процеси визначаються тільки величинами  $\gamma$  та  $T_n$ .

Демпфіруюча здатність автоматизованого електропривода незалежно від величини  $K_{p\omega}$  буде залишатись незначною навіть при  $\gamma = 1.1 \div 1.2$ . Проте, оскільки характеристичні криві  $A \cdot B = \gamma$  розташовуються на всій площині діаграми, цілком очевидно, що існує таке співвідношення параметрів системи при яких рух ВВ буде плавним, не дивлячись на наявність недемпфіруючого пружного зв'язку.

З іншої сторони, при нормуванні рівняння (12) за критерієм Вишнеградського шляхом заміни  $p = s\Omega_0$ , де середньгеометричний корінь  $\Omega_0$  визначається з урахуванням рівнянь (18) наступним чином:

$$\Omega_0 = \left( \frac{K_{\omega 1} K_{p\omega} K_{\Phi}}{K_c T_n^2 J_{\Sigma}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (20)$$

Враховуючи заміну  $p = s\Omega_0$  та вираз (20), запишемо нормовану за Вишнеградським другу передатну функцію системи (11):

$$\frac{\omega_2(s)}{U_{3\omega}(s)} = \frac{1/K_{\omega 1}}{s^3 + As^2 + Bs + 1}. \quad (21)$$

Перехід від передатної функції (11) до (21) означає перехід від абсолютного до відносного часу  $v = t\Omega_0$ .

При  $\gamma < 9$  передатну функцію (21) можна представити у вигляді

$$\frac{\omega_2(s)}{U_{3\omega}(s)} = \frac{1/K_{\omega 1}}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s^2 + 2\xi\tau_2 s + 1)}, \quad (22)$$

де  $\tau_1 \tau_2^2 = 1$ , а коефіцієнти  $\tau_1$  та  $\tau_2$  визначаються шляхом вирішення системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} A &= 2\xi\sqrt{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1}; \\ B &= 2\xi\frac{1}{\sqrt{\tau_1}} + \tau_1. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Задаючись в (23) коефіцієнтом демпфірування  $\xi$ , можна побудувати діаграму Вишнеградського з лініями рівного демпфірування (рис. 8).

При відносно невеликих  $\gamma$  слід визначати коефіцієнт підсилення регулятора швидкості так, щоб забезпечити найбільше можливе

значення коефіцієнта демпфірування. Для цього необхідно, щоб робоча точка на діаграмі Вишнеградського (рис. 8) належала прямій  $ав$ , тобто

$$A = B = \sqrt{\gamma}. \quad (24)$$

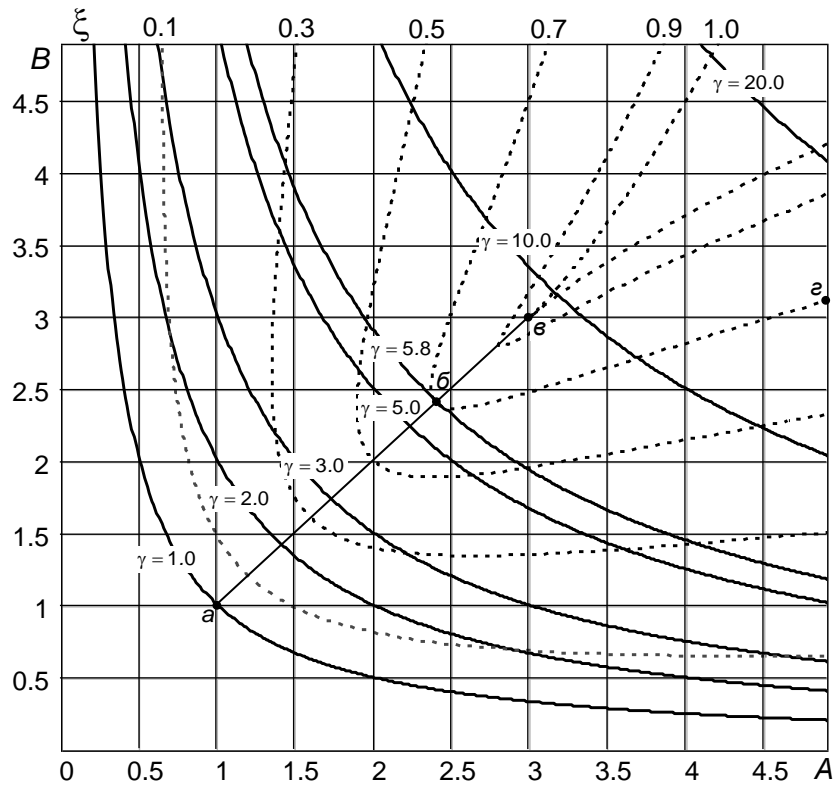


Рис. 8. Діаграма Вишнеградського

Сумісне розглядання виразів (18) та (24) дозволяє визначити коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$K_{pш} = \frac{K_c \cdot J_\Sigma}{\frac{3}{\gamma^4} \cdot T_n \cdot K_{ш1} \cdot K\Phi}. \quad (25)$$

Реакція системи (рис. 6) на керуючий стрибкоподібний сигнал за умови такого вибору коефіцієнту підсилення регулятора швидкості (25) визначається тільки значенням  $\gamma$  (рис. 9). Проте, реальна тривалість перехідних процесів визначається частотою  $\Omega_0$ , що визначається шляхом підстановки  $K_{pш}$  за виразом (25) до виразу (20):

$$\Omega_0 = \frac{1}{\frac{1}{\gamma^4} \cdot T_n}. \quad (26)$$

На рис. 9 представлені графіки перехідних процесів швидкості двигуна та ВВ в спрощеній електромеханічній системі з пружним зв'язком при відсутності "малих" сталих часу (рис. 6) у відповідності до (25) за умови, що  $\Omega_0 = 1$ .

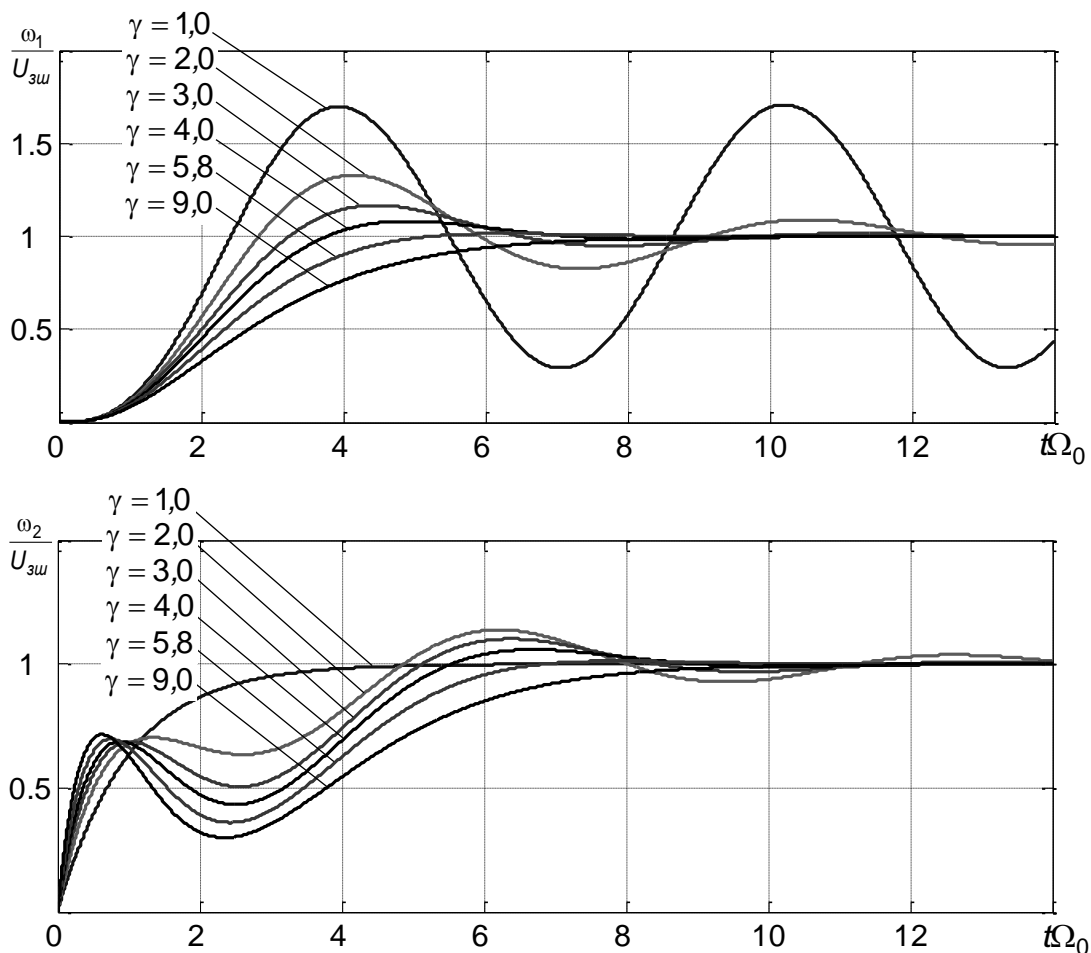


Рис. 9. Перехідні процеси в електромеханічній системі з пружним зв'язком при відсутності "малих" сталих часу (рис. 6)

З рис. 9 видно, що вже при  $\gamma = 2,0$  коливання швидкості ВВ відносно сильно демпфуються електроприводом. При  $\gamma = 4,0$  ( $A = B = 2$ ) перехідний процес відповідає стандартному розподілу коренів за Баттервортом (див. модуль 2, п. 3), при  $\gamma = 9,0$  ( $A = B = 3$ ) – біноміальному розподілу. При  $\gamma = 5,8$  коефіцієнт демпфування дорівнює  $\xi = \sqrt{2}/2$  і перерегулювання перехідної характеристики передатної функції (22) близьке до того, яке існує в системі 2-го порядку при настроюванні за модульним (технічним) оптимумом, Вважатимемо останнє співвідношення мас бажаним при такому налагодженні та позначимо  $\gamma_0 = 5,8$ .

При наявності моменту навантаження в електромеханічній системі буде існувати статична похибка регулювання швидкості, що пропорційна  $1/K_{рш}$ . Для її зменшення може бути застосований ПІ-регулятор з передатною функцією

$$W_{рш}(p) = K_{рш} \frac{\tau_{рш} p + 1}{\tau_{рш} p},$$

де  $\tau_{рш} = \frac{2T_{п}}{\frac{3}{\gamma^4}}$  – стала часу регулятора швидкості.

Оскільки перехідний процес, що відповідає налагодженню за технічним модулем, прийнято вважати найкращім, рекомендовано при  $\gamma \geq 5.8$  і  $T_{\mu\omega} \approx 0$  обирати  $K_{рш}$ , так щоб коефіцієнт демпфірування складав  $\xi = \sqrt{2}/2$  (див. рис. 8). Цього можна досягти як при зменшенні  $K_{рш}$  у порівнянні зі значенням, що визначається за виразом (25), тобто ( $A < B$ ), так і за умови збільшення коефіцієнта підсилення регулятора швидкості ( $A > B$ ). В першому випадку перехідний процес буде довшим, ніж при  $K_{рш}$ , що визначається за виразом (25). Тому практичний інтерес являє собою другий випадок (крива бг на рис. 8). Знаючи  $\gamma$ , можна визначити  $A$  та  $B$  на перехрещенні кривих  $\gamma = const$  і бг (рис. 8). За визначеними значеннями  $A$  та  $B$ , враховуючи (18), можна визначити  $K_{рш}$ . При такому виборі коефіцієнту регулятора швидкості чим вище  $\gamma$ , тим більше  $\tau_2^2$  у порівнянні з  $\tau_1$  і тим більше перехідна характеристика  $\frac{\omega_2}{U_{рш}}$  наближається до кривої другого порядку із коефіцієнтом демпфірування  $\xi = \sqrt{2}/2$ .

Отже, враховуючи попередні зауваження, слід відзначити, що налагодження регулятора швидкості за виразом (25) оптимальне за якістю та швидкодією при  $\gamma \approx 3 \div 10$  (див. рис. 7-9).

Практична можливість реалізації описаного налагодження залежить від зроблених припущень щодо малості сталих часу в контурі швидкості. Налагодження регулятора швидкості за виразом (25) можливе якщо виконується умова:

$$T_{\mu\omega} \leq \frac{T_n}{2 \cdot \sqrt[4]{\gamma}}. \quad (27)$$

Оскільки в жорсткій системі зі стандартним налагодженням швидкодія залежить тільки від значення  $T_{\mu\omega}$ , а в системі з пружністю визначається сталою  $T_n$ , тому необхідність виконання умови (27) вказує на те, що при реалізації розглянутого налагодження швидкодія лінійної пружної системи у порівнянні зі швидкодією жорсткої системи буде тим гірше, чим більше  $\gamma$ . При збільшенні  $T_{\mu\omega}$  у порівнянні зі значенням, що визначається за (27), буде збільшуватись коливальність контуру швидкості на частоті, близькій до  $1/T_n$ .

Якщо сумарна "мала" стала часу  $T_{\mu\omega}$  недопустимо велика, реалізувати налагодження (25) неможливо в силу нестійкості контуру швидкості. У такому разі коефіцієнт регулятора швидкості необхідно зменшувати.

З іншої сторони, при невиконанні умови (27), можна знизити швидкодію контуру струму, тобто зменшити коефіцієнт регулятора струму.

При значеннях  $\gamma > 10 \div 20$  швидкодія системи може бути збільшена за рахунок використання регулятора швидкості типу

$$W_{pш}(p) = K_{pш}^* \frac{\tau_{pш1}p + 1}{\tau_{pш2}p + 1}, \quad (28)$$

де  $\tau_{pш1} = 0,5 \cdot \gamma^{\frac{3}{4}} \cdot T_n$ ;  $\tau_{pш2} = T_n$  – сталі часу регулятора швидкості ( $\tau_{pш2} > \tau_{pш1}$ ).

Пропорційну частину регулятора швидкості  $K_{pш}^*$  відповідно до передатної функції (28) можна визначати за виразом (25).

Аналогічний ефект регулятора (28) можна досягти шляхом застосування ежекторних фільтрів типу

$$W_{\phi}(p) = \frac{\kappa_1 T^2 p^2 + 1}{T^2 p^2 + \kappa_2 T p + 1},$$

де  $T$  – стала часу фільтру;  $\kappa_1, \kappa_2$  – коефіцієнти, що можуть змінюватись при налагодженні фільтру.

Сутність використання такого фільтру є зниження коефіцієнту підсилення контуру в зоні частот пружних коливань. Отже необхідно досить точно налагоджувати фільтр відносно миттєвих (існуючих) параметрів електромеханічної системи, а це є суттєвим недоліком такого способу корегування (наприклад, зміна на 20% сталої пружних коливань може визвати суттєві коливання в системі). Остання обставина суттєво обмежує можливість застосування для корекції системи різноманітних ежекторних фільтрів.

#### **4. Паралельне корегування системи керування однозонним електроприводом з пружністю**

З викладеного раніше можна зробити висновок, що при коефіцієнтах співвідношення мас  $\gamma = 3 \div 10$  та незначною "малою" сталою часу  $T_{\mu\omega}$  у порівнянні з  $T_n$  може бути отримана швидкодія електропривода, яку можна вважати граничною (найбільшою). Якщо коефіцієнт співвідношення мас наближається до одиниці, необхідно значно знижувати коефіцієнти регуляторів, що призводить до необґрунтованої втрати швидкодії електропривода, а значить налагодженням регуляторів струму та швидкості неможливо досягти плавного і досить швидкого руху ВВ. Виходячи зі сказаного вище, необхідно розглянути можливість введення додаткових корегуючих зв'язків, які могли б покращати динаміку електромеханічної системи при значеннях коефіцієнту співвідношення мас  $\gamma < 3$  та  $\gamma > 10$ .

Розглянемо способи паралельного корегування системи керування за таких умов:

- у двохмасовій системі існує практична можливість введення корегуючих зв'язків за струмом якоря, швидкості двигуна та швидкості ВВ, оскільки жорсткі зв'язки за двома першими координатами руху введені, а введення жорсткого зворотного зв'язку за швидкістю ВВ замість жорсткого зв'язку за швидкістю двигуна (так само, як і при одночасному їх введенні з однаковими коефіцієнтами зворотного зв'язку) призводить до втрати стійкості системи, будемо розглядати гнучкі зворотні зв'язки (зворотні зв'язки за похідними);
- враховуючи практичні труднощі багатократного диференціювання вихідних сигналів вимірювачів струму та швидкості, розглянемо тільки сигнали за першими похідними, зробивши виняток для сигналів за другою похідною швидкості ВВ, оскільки з певними припущеннями остання корекція може бути організована як різниця між швидкістю двигуна та ВВ;
- вважатимемо, що додаткові зворотні зв'язки вводяться до входу регулятора швидкості, що дозволяє зберегти принцип обмеження струму якоря за рахунок обмеження вихідної напруги регулятора швидкості.

При розгляданні способів корегування вважатимемо, що зворотним зв'язком за ЕРС можна знехтувати.

#### 4.1. Зворотний зв'язок за похідною швидкості ВВ

Для того щоб оцінити принципові можливості цього способу корегування, розглянемо систему без "малих" сталих часу (рис. 10), вважаючи, що здійснюється ідеальне диференціювання. Вважатимемо, що  $W_{3.31}(p) = K_{u2}p$ ;  $W_{3.32}(p) = W_{3.33}(p) = 0$ .

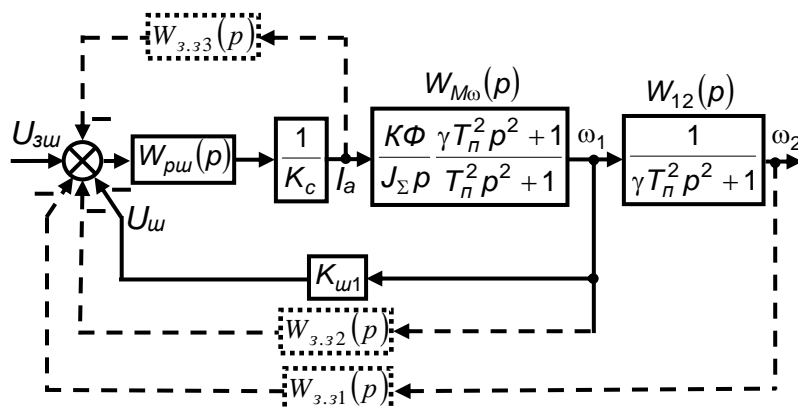


Рис. 10. Структурна схема САК швидкістю з пружністю при відсутності "малих" сталих часу



За таких умов, аналогічно виразам (11) та у відповідності до рис. 10, отримаємо:

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{3\omega}(p)} = \frac{1/K_{\omega 1}}{\frac{K_c T_p^2 J_\Sigma}{K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi} p^3 + \gamma T_p^2 p^2 + \left( \frac{K_c J_\Sigma}{K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi} + \frac{K_{\omega 2}}{K_{\omega 1}} \right) p + 1}. \quad (29)$$

Визначимо коефіцієнти Вишнеградського, для цього приведемо рівняння (29) до рівняння (13), звідки коефіцієнти рівняння набувають вигляду:

$$C_1 = \frac{\gamma K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi}{K_c J_\Sigma}; \quad C_2 = \frac{1}{T_p^2} + \frac{K_{\omega 2} K_{p\omega} K\Phi}{J_\Sigma K_c T_p^2}; \quad C_3 = \frac{K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi}{K_c J_\Sigma T_p^2}. \quad (30)$$

З урахуванням (15) та (30) коефіцієнти Вишнеградського визначаються:

$$A = \gamma \sqrt[3]{\left( \frac{K_{p\omega} K_{\omega 1} K\Phi T_p}{J_\Sigma K_c} \right)^2}; \quad B = \left( 1 + K_{p\omega} \frac{K_{\omega 2} K\Phi}{K_c J_\Sigma} \right) \sqrt[3]{\left( \frac{J_\Sigma K_c}{T_p K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi} \right)^2}. \quad (31)$$

Очевидно, що

$$A \cdot B = \gamma \left( 1 + K_{p\omega} \frac{K_{\omega 2} K\Phi}{K_c J_\Sigma} \right). \quad (32)$$

Порівнюючи (19) та (32), можна зробити висновок, що введення зворотного зв'язку за похідною швидкості ВВ призводить до ефекту, який еквівалентний збільшенню коефіцієнту співвідношення мас. Тобто якщо в САК без "малих" сталих часу (рис. 10) ввести зворотний зв'язок за похідною швидкості при  $\gamma < \gamma_o$  ( $\gamma < 5,8$ ), а також при  $\gamma \approx 1$ , можна досягти плавності в перехідних режимах роботи. Для забезпечення такого процесу необхідно обирати коефіцієнт підсилення П-регулятора швидкості за умови, що  $A \cdot B = \gamma_o$ , звідки

$$A = B = \sqrt{\gamma_o}. \quad (33)$$

Підставляючи (33) у вирази (31), можна визначити  $K_{p\omega}$  та глибину зворотного зв'язку  $K_{\omega 2}$ , що необхідні для такого налагодження:

$$K_{p\omega} = \frac{\gamma_o^{\frac{3}{4}}}{\gamma^{\frac{3}{2}}} \frac{J_\Sigma K_c}{K_{\omega 1} K\Phi T_p}; \quad K_{\omega 2} = \gamma^{\frac{1}{2}} \frac{\gamma_o - \gamma}{\gamma_o^{\frac{3}{4}}} K_{\omega 1} T_p. \quad (34)$$

Реакція системи на стрибкоподібний збурюючий вплив буде абсолютно різною при різних значення  $\gamma$ . На рис. 11, 12 представлені графіки перехідних процесів за умови різноманітного налагодження

регулятора швидкості. Аналізуючи результати моделювання при налагодженні регулятора швидкості за виразом (25), слід відмітити, що при  $\gamma = 3$  швидкість двигуна та виконавчого валу змінюється достатньо плавно (рис. 12, крива 1), але при  $\gamma$ , що наближається до одиниці, ступінчаста зміна навантаження на ВВ призводить до появи коливань на ньому, які затухають тим повільніше, чим ближче коефіцієнт співвідношення мас до одиниці (рис. 11, крива 1). Введення додаткового зворотного зв'язку за похідною швидкості ВВ з параметрами регулятора та зворотного зв'язку (34) забезпечує неколивальні перехідні процеси (рис. 11, 12 криві 2). При  $\gamma \approx 1$  динамічна похибка швидкості двигуна та ВВ перевищує статичну похибку.

При  $\gamma > 1,5 \div 2$  статична похибка в системі з П-регулятором виявляється на рівні динамічної похибки, це надає можливість використовувати ПІ-регулятор швидкості з передатною функцією:

$$W_{рш}(p) = K_{рш} \frac{\tau_{рш} p + 1}{\tau_{рш} p}, \quad (35)$$

де  $K_{рш}$  – коефіцієнт підсилення регулятора, що розраховується за виразом (34);  $\tau_{рш} = T_n$  – стала часу регулятора швидкості.

Відповідні перехідні процеси для випадку  $\gamma = 3$  представлені на рис. 12 (крива 3). При менших значеннях  $\gamma$  перерегулювання швидкості ВВ буде меншим (рис. 11, крива 3), проте зменшення  $\tau_{рш}$  у порівнянні з виразом (35) не буде збільшувати перерегулювання, а в першу чергу збільшуватиме коливальність контуру регулювання швидкості двигуна. Достатній запас за фазою в реальній системі буде забезпеченим за умови:

$$T_{\mu\omega} \leq (0,2 \div 0,3) T_n. \quad (36)$$

При використанні ПІ-регулятора коливальність контуру швидкості збільшується і внаслідок впливу "малих" сталих часу може статись, що необхідно дещо збільшити  $\tau_{рш}$  у порівнянні з  $T_n$ . Якщо (36) не виконується реалізувати зворотний зв'язок за похідною швидкості ВВ не вдається внаслідок великої коливальності або навіть нестійкості системи.

#### 4.2. Зворотний зв'язок за другою похідною швидкості ВВ

Оцінімо принципові можливості цього способу корегування розглянувши електромеханічну систему без "малих" сталих часу (рис. 10). Вважатимемо, що  $W_{3.31}(p) = K_{\omega 2}^2 p^2$ ;  $W_{3.32}(p) = W_{3.33}(p) = 0$ . За таких умов, аналогічно виразу (29) та у відповідності до рис. 10, отримаємо:

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{zw}(p)} = \frac{1/K_{w1}}{\frac{K_c T_p^2 J_\Sigma}{K_{w1} K_{p\omega} K\Phi} p^3 + \left( \gamma T_p^2 + \frac{K_{w2}^2}{K_{w1}} \right) p^2 + \frac{K_c J_\Sigma}{K_{w1} K_{p\omega} K\Phi} p + 1}. \quad (37)$$

Визначимо коефіцієнти Вишнеградського, для цього приведемо рівняння (37) до рівняння (13), звідки коефіцієнти рівняння набувають вигляду:

$$C_1 = \frac{K_{p\omega} K\Phi (\gamma T_p^2 K_{w1} + K_{w2}^2)}{K_c J_\Sigma T_p^2}; \quad C_2 = \frac{1}{T_p^2}; \quad C_3 = \frac{K_{w1} K_{p\omega} K\Phi}{K_c J_\Sigma T_p^2}. \quad (38)$$

З урахуванням (15) та (38) коефіцієнти Вишнеградського визначаються:

$$A = \left( \gamma T_p^2 + \frac{K_{w2}^2}{K_{w1}} \right) \sqrt[3]{\left( \frac{K_{p\omega} K_{w1} K\Phi}{J_\Sigma K_c T_p^2} \right)^2}; \quad B = \sqrt[3]{\left( \frac{J_\Sigma K_c}{T_p K_{w1} K_{p\omega} K\Phi} \right)^2}. \quad (39)$$

Очевидно, що

$$A \cdot B = \gamma + \frac{K_{w2}^2}{K_{w1} T_p^2}. \quad (40)$$

Підставляючи (33) у вираз (40) можна визначити  $K_{w2}$ , з виразу для коефіцієнту B (39) визначимо значення регулятора швидкості:

$$K_{p\omega} = \frac{1}{\gamma_o^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{J_\Sigma K_c}{K_{w1} K\Phi T_p}; \quad K_{w2} = T_p \sqrt{K_{w1} (\gamma_o - \gamma)}. \quad (41)$$

Тривалість перехідного процесу при розглянутому налагодженні в  $(\gamma_o/\gamma)^{\frac{3}{2}}$  раз більше ніж при введенні сигналу за першою похідною ВВ. Тому для збільшення швидкодії необхідно збільшувати значення регулятора швидкості, що призводить до збільшення статичної похибки. При  $\gamma$ , що наближається до одиниці, введення зворотного зв'язку за другою похідною швидкості призводить до позитивного ефекту, тому що дозволяє демпфірувати коливання навіть при значних "малих" сталих часу, наприклад, більше умови (36). Основна складність розглянутого налагодження є реалізація другої похідної швидкості, яку технічно складно визначити при наявності значної пульсації напруги тахогенератору.

Графіки перехідних процесів для випадку  $\gamma = 1,05$  та  $\gamma = 3$  представлені на рис. 11, 12 (криві 4).

У відношенні якості перехідних процесів за керуванням такий самий результат можна отримати, якщо на вхід регулятора швидкості ввести сигнал, пропорційний різниці швидкості двигуна та приведенного до двигуна швидкості виконавчого валу.

### 4.3. Зворотний зв'язок за різницею швидкостей двигуна та ВВ

Розглянемо електромеханічну систему без "малих" сталих часу (рис. 10). Вважатимемо, що  $W_{3.31}(p) = -W_{3.32}(p) = K_{w2}$ ;  $W_{3.33}(p) = 0$ . За таких умов, аналогічно виразу (37) та у відповідності до рис. 10, отримаємо:

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{zw}(p)} = \frac{1/K_{w1}}{\frac{K_c T_p^2 J_\Sigma}{K_{w1} K_{p\omega} K\Phi} p^3 + \gamma T_p^2 \left(1 + \frac{K_{w2}}{K_{w1}}\right) p^2 + \frac{K_c J_\Sigma}{K_{w1} K_{p\omega} K\Phi} p + 1}. \quad (42)$$

Визначимо коефіцієнти Вишнеградського, приведемо рівняння (42) до рівняння (13), коефіцієнти рівняння набувають вигляду:

$$C_1 = \frac{K_{p\omega} K\Phi (K_{w1} + K_{w2})}{K_c J_1}; \quad C_2 = \frac{1}{T_p^2}; \quad C_3 = \frac{K_{w1} K_{p\omega} K\Phi}{K_c J_\Sigma T_p^2}. \quad (43)$$

З урахуванням (15) та (43) коефіцієнти Вишнеградського визначаються:

$$A = \gamma \left(1 + \frac{K_{w2}}{K_{w1}}\right) \sqrt[3]{\left(\frac{K_{p\omega} K_{w1} T_p^2 K\Phi}{J_\Sigma K_c}\right)^2}; \quad B = \sqrt[3]{\left(\frac{J_\Sigma K_c}{T_p K_{w1} K_{p\omega} K\Phi}\right)^2}. \quad (44)$$

Звідки очевидно, що

$$A \cdot B = \gamma \left(1 + \frac{K_{w2}}{K_{w1}}\right). \quad (45)$$

Підставляючи (33) у вираз (45) можна визначити  $K_{w2}$ , з другого виразу (44) визначимо значення регулятора швидкості:

$$K_{p\omega} = \frac{1}{\gamma_o^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{J_\Sigma K_c}{K_{w1} K\Phi T_p}; \quad K_{w2} = K_{w1} \frac{\gamma_o - \gamma}{\gamma}. \quad (46)$$

Графіки перехідних процесів для випадку  $\gamma = 1,05$  та  $\gamma = 3$  представлені на рис. 11, 12 (криві 5). Звідки видно, що якість роботи такої системи при наявності зовнішніх збурень у вигляді раптово прикладеного навантаження значно нижче, ніж при введенні додаткового зворотного зв'язку за другою похідною швидкості ВВ (криві 4). Хоча максимальне перерегулювання швидкості під час розгону під навантаженням за розглянутим способом корегування дещо нижче, ніж при корегуванні за другою похідною ВВ. При  $\gamma = 1,05$  динамічна та статична похибка швидкості при ступінчастій зміні навантаження за таких же самих умов перевищує динамічну похибку в системі зі зворотним зв'язком за першою або другою похідною ВВ. Проте, не дивлячись на такі обставини, використання зворотного зв'язку за різницею швидкостей при  $\gamma = 1 \div 2$  може бути корисним, коли введення сигналу за похідною

неможливе у наслідок суттєвого впливу "малих" сталих часу. Без значного збільшення коливальності двигуна та ВВ за умови, що при розрахунках коефіцієнту підсилення регулятора швидкості та зворотного зв'язку приймалось  $\gamma_0 = 5,8$ , можна використовувати зворотний зв'язок за різницею швидкостей при

$$T_{\mu\omega} < (0,7 \div 0,8)T_n.$$

При збільшенні  $T_{\mu\omega}$  відповідно буде збільшуватись коливальність швидкості двигуна та ВВ.

Однак чим більше за одиницю коефіцієнт співвідношення мас, тим менша ефективність використання зворотного зв'язку за другою похідною швидкістю або різницею швидкостей (порівняйте криві 4, 5 на рис. 11, 12).

Введення ПІ-регулятора швидкості зводить статичну похибку швидкості до нуля за умови:

$$W_{p\omega}(p) = K_{p\omega} \frac{\tau_{p\omega} p + 1}{\tau_{p\omega} p}, \quad (47)$$

де  $K_{p\omega}$  – коефіцієнт підсилення регулятора, що розраховується за виразом (46);  $\tau_{p\omega} = 2\gamma_0^{\frac{3}{4}} T_n$  – стала часу регулятора швидкості.

Динамічна похибка при використанні регулятора (47) значно збільшується (рис. 11, 12 криві 6) у порівнянні з системою в якій використовується зворотній зв'язок за похідною ВВ та регулятор (35).

#### 4.4. Зворотний зв'язок за похідною швидкості двигуна

Вважатимемо, що в електромеханічній системі без "малих" сталих часу (рис. 10)  $W_{3.31}(p) = W_{3.33}(p) = 0$ ;  $W_{3.33}(p) = K_{\omega 2} p$ . Аналогічно виразу (42) та у відповідності до рис. 10, отримуємо:

$$\frac{\omega_2(p)}{U_{3\omega}(p)} = \frac{1/K_{\omega 1}}{T_n^2 \left( \frac{K_c J_\Sigma}{K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi} + \gamma \frac{K_{\omega 2}}{K_{\omega 1}} \right) p^3 + \gamma T_n^2 p^2 + \left( \frac{K_c J_\Sigma}{K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi} + \frac{K_{\omega 2}}{K_{\omega 1}} \right) p + 1}. \quad (48)$$

Приведемо рівняння (48) до рівняння (13), коефіцієнти рівняння набувають вигляду:

$$C_1 = \frac{\gamma K_{\omega 1} K_{p\omega} K\Phi}{K_c J_\Sigma + \gamma K_{p\omega} K_{\omega 2} K\Phi}; C_2 = \frac{K_c J_\Sigma + K_{\omega 2} K_{p\omega} K\Phi}{T_n^2 (K_c J_\Sigma + \gamma K_{p\omega} K_{\omega 2} K\Phi)}; C_3 = \frac{K_{\omega 1}}{T_n^2 \left( \frac{K_c J_\Sigma}{K_{p\omega} K\Phi} + K_{\omega 2} \gamma \right)}. \quad (49)$$

З урахуванням (15) та (49) коефіцієнти Вишнеградського визначаються:

$$A = \gamma^3 \sqrt{\left( \frac{K_{p\omega} K_{\omega 1} K_{\Phi}}{J_{\Sigma} K_c + \gamma K_{p\omega} K_{\omega 2} K_{\Phi}} \right)^2}; \quad B = \frac{J_{\Sigma} K_c + K_{p\omega} K_{\omega 2} K_{\Phi}}{\sqrt{(J_{\Sigma} K_c + \gamma K_{p\omega} K_{\omega 2} K_{\Phi})(T_n K_{p\omega} K_{\omega 1} K_{\Phi})^2}}. \quad (50)$$

Враховуючи (33) та (50) визначимо коефіцієнт підсилення регулятора швидкості й коефіцієнт зворотного зв'язку за похідною швидкості двигуна:

$$K_{p\omega} = \frac{J_{\Sigma} K_c}{K_{\omega 1} K_{\Phi} T_n} \frac{\gamma_0^{\frac{3}{4}}}{\gamma^{\frac{3}{2}}} \frac{\gamma - 1}{\gamma_0 - 1}; \quad K_{\omega 2} = \frac{\gamma^{\frac{1}{2}}}{\gamma_0^{\frac{3}{4}}} \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma - 1} K_{\omega 1} T_n. \quad (51)$$

Графіки перехідних процесів за умов  $\gamma = 1,05$  та  $\gamma = 3$  представлені на рис. 11, 12 (криві 7).

Застосування такого зворотного зв'язку в електромеханічній системі еквівалентно зменшенню коефіцієнту співвідношення мас, тобто область його застосування – системи з  $\gamma > \gamma_0$ . Ефективність від застосування додаткового зворотного зв'язку за похідною швидкості двигуна тим вища, чим більше значення  $\gamma$  у порівнянні з  $\gamma_0$ . Однак, при зменшенні  $T_n$  збільшуються труднощі в реалізації такого корегуючого зв'язку внаслідок значного впливу "малих" сталих часу на динаміку системи.

#### 4.5. Зворотний зв'язок за похідною струму якоря двигуна

В електромеханічній системі без "малих" сталих часу (рис. 10) вважатимемо, що  $W_{3.31}(p) = W_{3.32}(p) = 0$ ;  $W_{3.33}(p) = K_{c1}p$ . У відповідності до рис. 10, отримаємо:

$$\frac{I_a(p)}{U_{3\omega}(p) - \omega_1(p) K_{\omega 1}} = \frac{K_{p\omega} \frac{1}{K_c}}{1 + K_{p\omega} \frac{1}{K_c} K_{c1} p}.$$

Таким чином, передатна функція контуру струму, що з певними припущеннями вважається безінерційним контуром з коефіцієнтом передачі  $1/K_c$ , набуває вигляду:

$$\frac{I_a(p)}{U_{3l}(p)} = \frac{1/K_c}{1 + K_{p\omega} \frac{1}{K_c} K_{c1} p}.$$

де  $U_{3l}$  – напруга завдання на струм.

Таким чином, введення зворотного зв'язку за похідною струму якоря двигуна еквівалентно зниженню швидкодії контуру струму (див. п. 3).

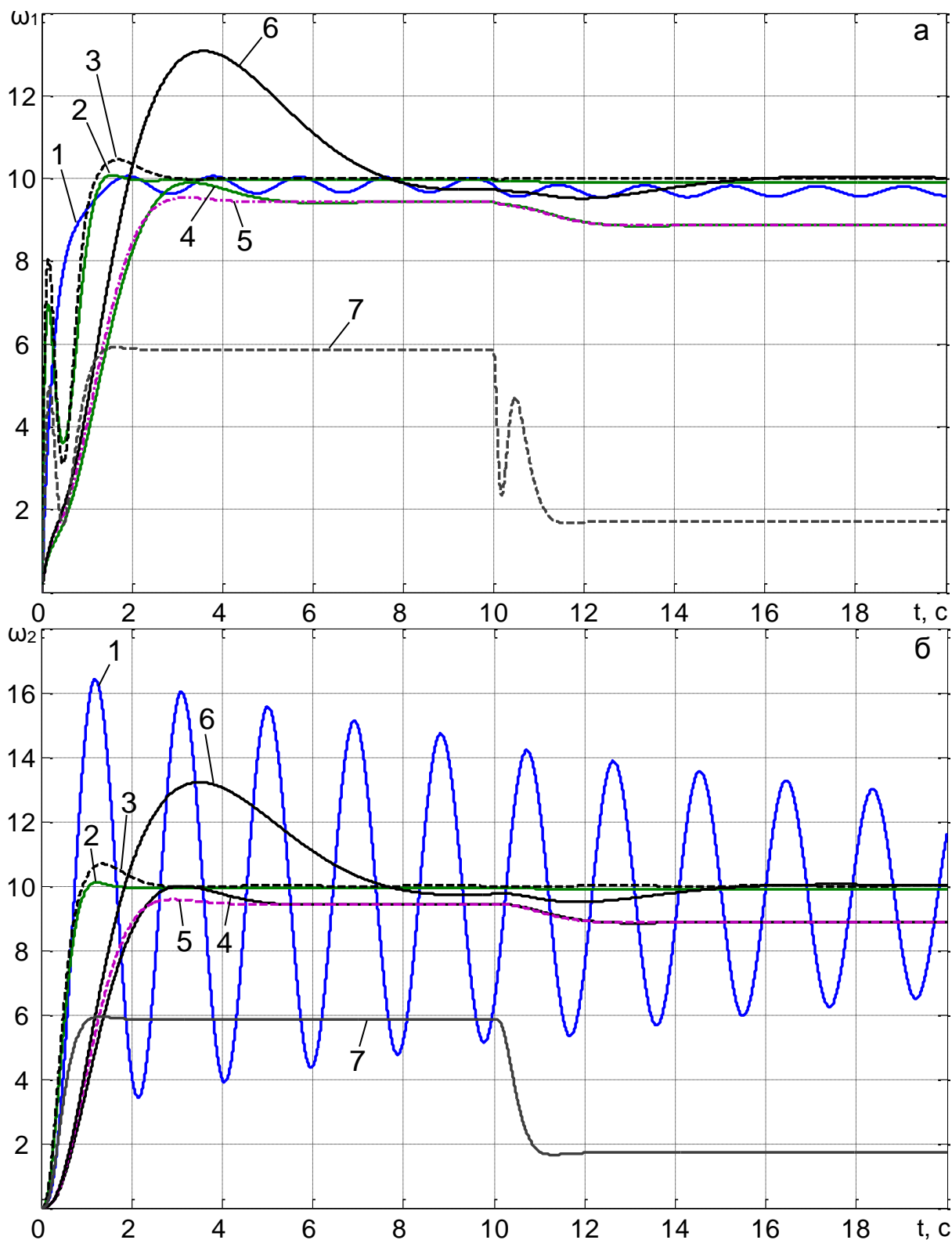


Рис. 11. Графіки перехідних процесів швидкості двигуна та ВВ в системі без "малих" сталих часу при  $\gamma = 1,05$  (режим роботи: пуск під навантаженням, при  $t = 10$  с – додатковий накид навантаження), де: 1 – без корегування, П-регулятор швидкості (25); 2 – корегування за похідною швидкості ВВ, П-регулятор швидкості (34); 3 – теж саме, ПІ-регулятор швидкості (35); 4 – корегування за другою похідною швидкості ВВ, П-регулятор швидкості (41); 5 – корегування за різницею швидкостей, П-регулятор швидкості (46); 6 – теж саме, ПІ-регулятор швидкості (47); 7 – корегування за похідною швидкості двигуна, П-регулятор (51).

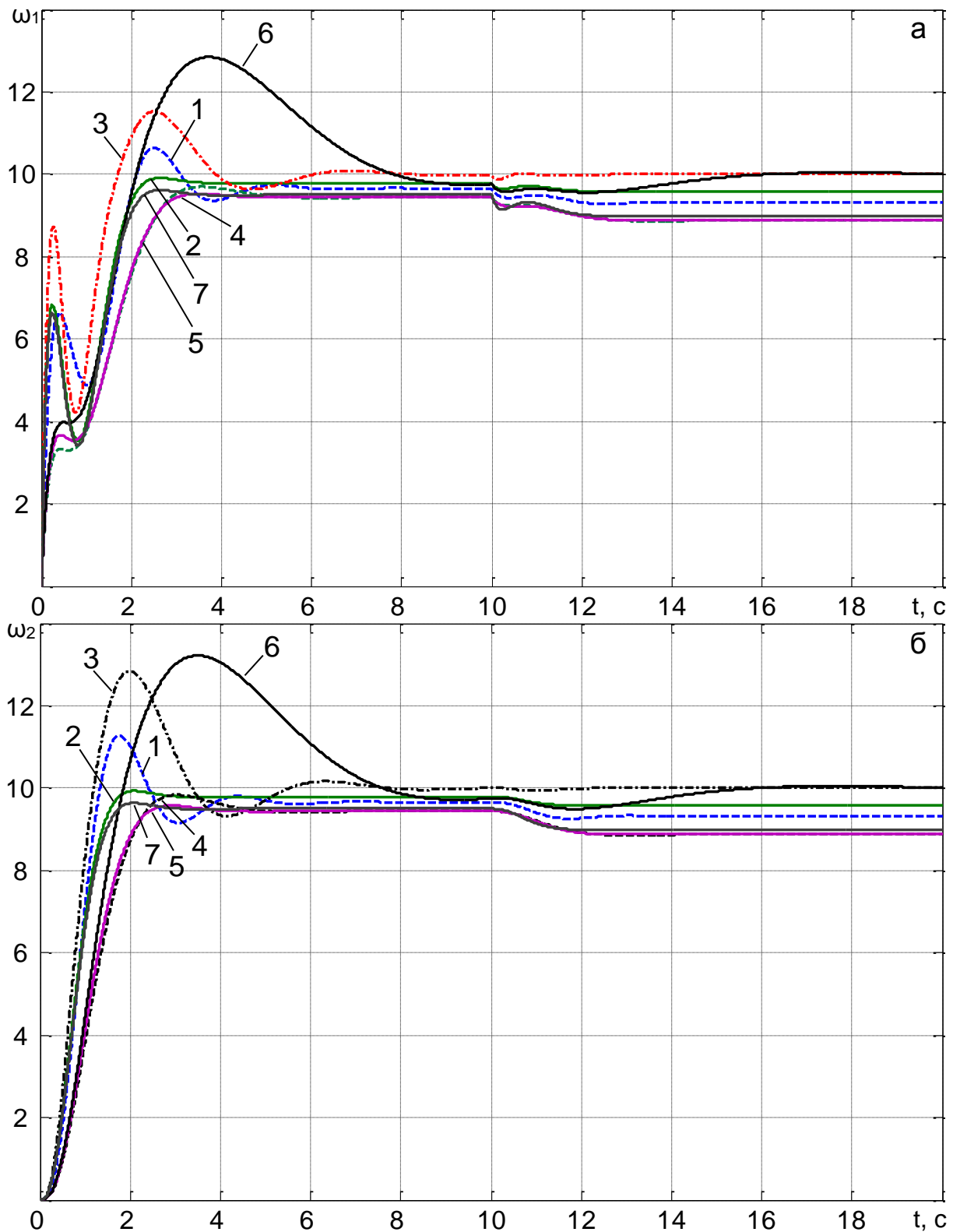


Рис. 12. Графіки перехідних процесів швидкості двигуна та ВВ в системі без "малих" сталих часу при  $\gamma = 3$  (режим роботи: пуск під навантаженням, при  $t=10$  с – додатковий накид навантаження), де: 1 – без корегування, П-регулятор швидкості (25); 2 – корегування за похідною швидкості ВВ, П-регулятор швидкості (34); 3 – теж саме, ПІ-регулятор швидкості (35); 4 – корегування за другою похідною швидкості ВВ, П-регулятор швидкості (41); 5 – корегування за різницею швидкостей, П-регулятор швидкості (46); 6 – теж саме, ПІ-регулятор швидкості (47); 7 – корегування за похідною швидкості двигуна, П-регулятор (51).



#### 4.6. Рекомендації щодо налагодження САК швидкістю електропривода з пружністю

Підсумовуючи проведені дослідження, можна надати наступні рекомендації щодо налагодження системи підпорядкованого керування швидкістю однозонного електропривода з пружною механічною передачею, враховуючи, що умови нехтування впливом пружності не виконуються (табл. 1):

1. При  $\gamma = 3 \div 10$  необхідно без введення додаткових зворотних зв'язків налагодити регулятор швидкості згідно (25). Проте, якщо умова (27) не виконується, слід знижувати швидкодію системи за рахунок зменшення коефіцієнту підсилення регулятора швидкості або струму. Перевагу слід віддати переналагодженню контуру швидкості – зниженню  $K_{рш}$ . Використання додаткового зворотного зв'язку за похідною струму якоря двигуна малоефективне.
2. Якщо  $\gamma > 10$ , найкращій ефект можна отримати при введенні додаткового зворотного зв'язку за похідною швидкості двигуна. При відносно великих значеннях "малих" сталих часу, таке корегування неефективне. За таких умов, слід використовувати регулятор швидкості з передатною функцією типу (28) або зменшувати швидкодію контуру струму:
  - за рахунок зниження коефіцієнту підсилення регулятора струму;
  - використовуючи додатковий зворотний зв'язок за похідною струму.
3. При  $\gamma = 1 \div 3$  слід використовувати додатковий зворотний зв'язок за похідною швидкості ВВ. Якщо умова (36) не виконується, слід організувати корегування із використанням другої похідної швидкості ВВ. Найбільший ефект від використання останнього способу корегування має місце при  $\gamma < 1,5 \div 2$ . Якщо за технічних причин неможливо реалізувати другу похідну, слід вводити корегування за різницею швидкостей двигуна та виконавчого валу.
4. В усіх випадках є принципова можливість використання гостоналагоджених фільтрів із метою зменшення коефіцієнту підсилення контуру швидкості в зоні частот пружних коливань. Але необхідно враховувати, що такий спосіб корегування потребує точного налагодження фільтру.
5. Використання задатчика інтенсивності на вході контуру швидкості в режимах розгону або гальмуванні електроприводу сприятиме зменшенню максимального динамічного моменту, а також швидкості двигуна та виконавчого валу, але за рахунок збільшення періоду розгону або гальмування.

Розглянемо приклад дослідження перехідних процесів в електромеханічній системі з пружністю та визначимо ефективний спосіб демпфірування коливань.

## 5. Приклад дослідження перехідних процесів у однозонному електроприводі постійного струму із пружністю

Розглянемо моделювання однозонного електропривода з пружним зв'язком (рис. 5, б) на базі двигуна постійного струму типу П101 та визначимо шляхи покращення динаміки електромеханічної системи використовуючи набуті знання щодо корегування подібних систем.

Вихідні дані:

- параметри двигуна див. табл. 3;
- перевантажувальна здатність двигуна –  $\lambda = 2$ ;
- співвідношення моментів інерції –  $\gamma = 1,5$ ;
- частота незатухаючих коливань механічної системи –  $\Omega_0 = 30$  рад/с;
- бажане співвідношення моментів інерції –  $\gamma_0 = 5,8$ ;
- реактивний момент навантаження –  $0,1M_H$ ;
- випадковий активний момент навантаження –  $0,3M_H$ ;
- регулятор струму – ПІ;
- регулятор швидкості – П;
- ЕРС – некомпенсована.

Режим роботи – розгін до швидкості  $0,9\omega_H$ , накид навантаження через 2 секунди після початку руху та гальмування до швидкості  $0,5\omega_H$  через 3,5 секунди після початку руху.

Таблиця 3

Параметри двигуна

Тип	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$U_H$ , В	$I_H$ , А	$r_{я}$ , Ом	N	2а	2р	$J_{дв}$ , кгм <sup>2</sup>
П101	32	600	220	172	0,0749	372	2	4	2,575

Знаходимо номінальну кутову частоту обертання двигуна –  $\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}$ .

В усталеному режимі роботі визначимо  $K\Phi = \frac{U_H - I_H R_a}{\omega_H}$ .

Індуктивність якірного кола –  $L_{я} = k \frac{30 U_{яH}}{\pi r_{яH} I_{яH} n_H}$ , де  $k = 0,5$  приймаємо

як для компенсованих машин.

Електромагнітна стала часу –  $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ .

Згідно даних табл. 3 співвідношення  $4T_{мп}/T_a = 0,294 < 1$ , це означає, що для забезпечення підвищеної швидкодії можна контур струму налагоджувати за симетричним критерієм оптимізації. Проте для

спрощення математичного опису контуру регулювання струму (використання на вході фільтру) будемо використовувати налагодження за технічним оптимумом.

Сталу часу тиристорного перетворювача приймаємо  $T_{мп} = 0,005$  с,

а коефіцієнт його передачі  $K_{мп} = \frac{U_H}{10}$ .

Момент інерції ВМ –  $J_2 = J_1 \cdot (\gamma - 1)$ .

Коефіцієнт жорсткості –  $C_{12} = \Omega_0 \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$ .

Стала часу пружних коливань –  $T_n = \sqrt{\frac{J_1 J_2}{C_{12}(J_1 + J_2)}}$ .

"Мала" стала контуру швидкості –  $T_{\mu\omega} = 4T_{мп}$ .

Визначимо ефективний паралельний корегуючий зв'язок. Для цього враховуючи рекомендації (п. 4.6) слід віддати перевагу введенню додаткового зворотного зв'язку за похідною швидкості ВВ. Перевіримо, чи виконується умова (36) для застосування цього способу корегування при заданих параметрах електромеханічної системи. В силу того, що  $T_{\mu\omega} = 0,02$ , а  $T_n = 0,025$ , умова (36) не виконується. За таких умов, слід використовувати корегування за другою похідною ВВ.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом –  $K_c = \frac{10}{I_H \lambda}$ .

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю двигуна –  $K_{\omega 1} = \frac{10}{\omega_H}$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за різницею швидкостей двигуна та ВМ (41) –  $K_{\omega 2} = T_n \sqrt{K_{\omega 1} (\gamma_0 - \gamma)}$ .

Коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора струму розраховується за виразом:  $K_{pc}^{(п)} = \frac{RaTa}{2T_{мп} K_{мп} K_c}$ .

Коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму розраховується:  $K_{pc}^{(i)} = \frac{Ra}{2T_{мп} K_{мп} K_c}$ .

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості у відповідності до обраного регулятора швидкості (41):  $K_{рш} = \frac{1}{\gamma_0^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{K_c (J_1 + J_2)}{K_{\omega 1} K \Phi T_n}$ .

Обмеження регулятора швидкості приймемо на рівні 10 В.

Завдання на швидкість:

$$U_{3ш} = \begin{cases} 9; \\ 5, \text{ якщо } t > t_1, \end{cases}$$

де  $t_1$  – час початку гальмування (через 3,5 секунди після початку руху).

Прикладене навантаження:

$$M_c = \begin{cases} 0,1I_H K\Phi \cdot \text{sign}(\omega_2); \\ 0,3I_H K\Phi + 0,1I_H K\Phi \cdot \text{sign}(\omega_2), \text{ якщо } t > t_2, \end{cases}$$

де  $t_1$  – час накиду додаткового навантаження, що подається через 2 секунди після початку руху.

Час обчислення перехідного процесу –  $t_{max} = 10$  с. Крок обчислень диференціальних рівнянь –  $t_d = 0,001$  с, метод обчислення – Рунге-Кутта 4-го порядку. У зв'язку з тим, що спочатку буде розглянутий режим пуску двигуна, початкові умови приймаємо нульові.

На рис. 13 наведений приклад програми моделювання у пакеті **MatLab** однозонного електропривода постійного струму із пружністю в механічній передачі. Математичні розрахунки виконані у вигляді m-файлу. Програма моделювання розглянутої електромеханічної системи виконана в пакеті бібліотек **Simulink** (рис. 14).

Графіки перехідних процесів в однозонному електроприводі постійного струму у заданих режимах роботи при корегуванні за другою похідною ВВ представлені на рис. 15, за умови стандартного налагодження контуру швидкості без корегування – на рис. 16.

```

1  % Розрахунок однозонного електропривода з пружним зв'язком
2  % 1.Вихідні данні двигуна
3  % ТИП П101
4  - mn=600; % номінальна частота обертань (об/хв)
5  - Un=220; % номінальна напруга живлення
6  - In=172; % номінальний струм
7  - Ra=0.0749; % активний опір якірного кола
8  - J1=2.575; % момент інерції
9  - p=2; % кількість пар полюсів
10 - Lambda=2; % перевантажувальна здатність
11 % 2.Розрахунок додаткових параметрів двигуна
12 - wn=pi*mn/30; % номінальна кутова швидкість (рад/с)
13 - KF=(Un-In*Ra)/wn;
14 - Kk=0.5; % коефіцієнт для компенсованих машин
15 - La=30*Kk*Un/(pi*p*In*mn); % індуктивність якірного кола
16 - Ta=La/Ra; % електромагнітна стала часу
17 % 3.Механічна частина електропривода
18 - Wo=30; %частота незатухаючих коливань
19 - g=1.5; % співвідношення моментів інерції двигуна та ВМ
20 - go=5.8; % бажане співвідношення моментів інерції
21 - J2=g*J1-J1; %момент інерції ВМ
22 - C12=Wo^2*J1*J2/(J1+J2); %коефіцієнт жорсткості
23 - Ty=sqrt(J1*J2/(C12*(J1+J2)));% стала часу пружних коливань двомасової системи
24 % 4.Збурюючі впливи
25 - Mst=0.9*In*KF; % активний момент навантаження
26 - Mr=0.1*In*KF; % реактивний момент навантаження

```

Рис. 13. Розрахунки у вигляді m-файлу в пакеті **MatLab**

```

27                                     % 5. Розрахунок САК
28 - Ub=10; % базова одиниця (В)
29 - Uz1=9; % 1 завдання на швидкість
30 - Uz2=5; % 2 завдання на швидкість
31                                     % 5.1 Тиристорний перетворювач
32 - Ttp=0.005; % "мала" стала часу ТП
33 - Ktp=Un/Ub; % коефіцієнт передачі ТП
34                                     % 5.2 Розрахунок коефіцієнтів зворотних зв'язків САК
35 - Kc=Ub/(In*Lambda); % Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом
36 - Ks1=Ub/wm; % Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю двигуна
37 - Ks2=Ty*sqrt(Ks1*(go-g)); % Коефіцієнт зворотного зв'язку за різницею швидкостей
38                                     % 5.3 Розрахунок коефіцієнтів регуляторів САК
39 - Kpcp=Ra*Ta/(2*Ttp*Ktp*Kc); % коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора струму
40 - Kpci=Ra/(2*Ttp*Ktp*Kc); % коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму
41 - Kps=(J1+J2)*Kc/(KF*Ks1*Ty*(go^0.75)); % коефіцієнт підсилення регулятора швидкості

```

Рис. 13. Розрахунки у вигляді m-файлу в пакеті **MatLab** (продовження)

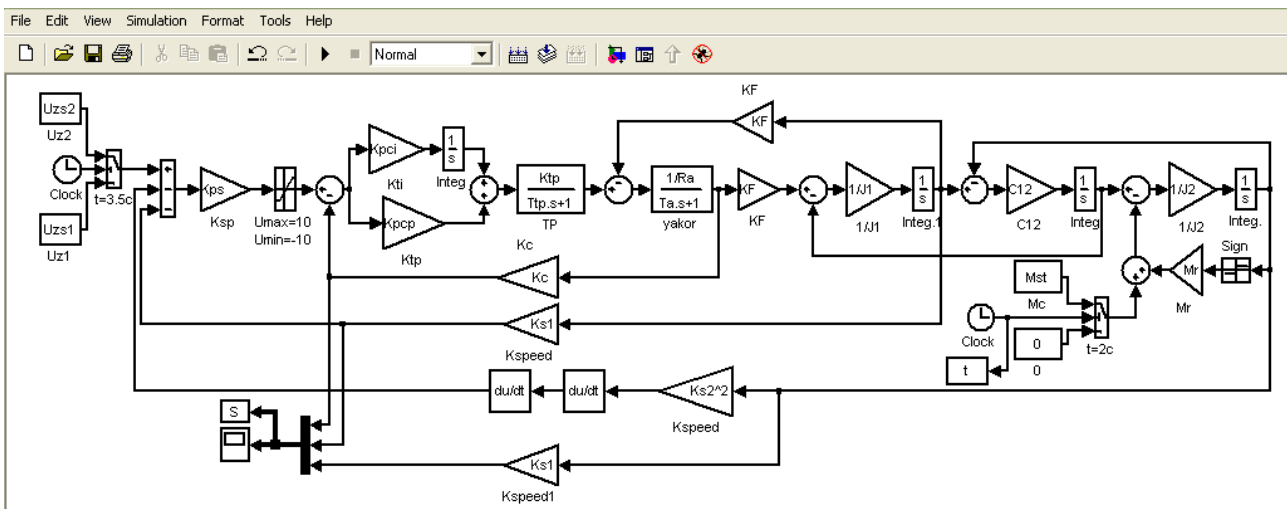


Рис. 14. Програма моделювання електромеханічної системи в пакеті бібліотек **Simulink**

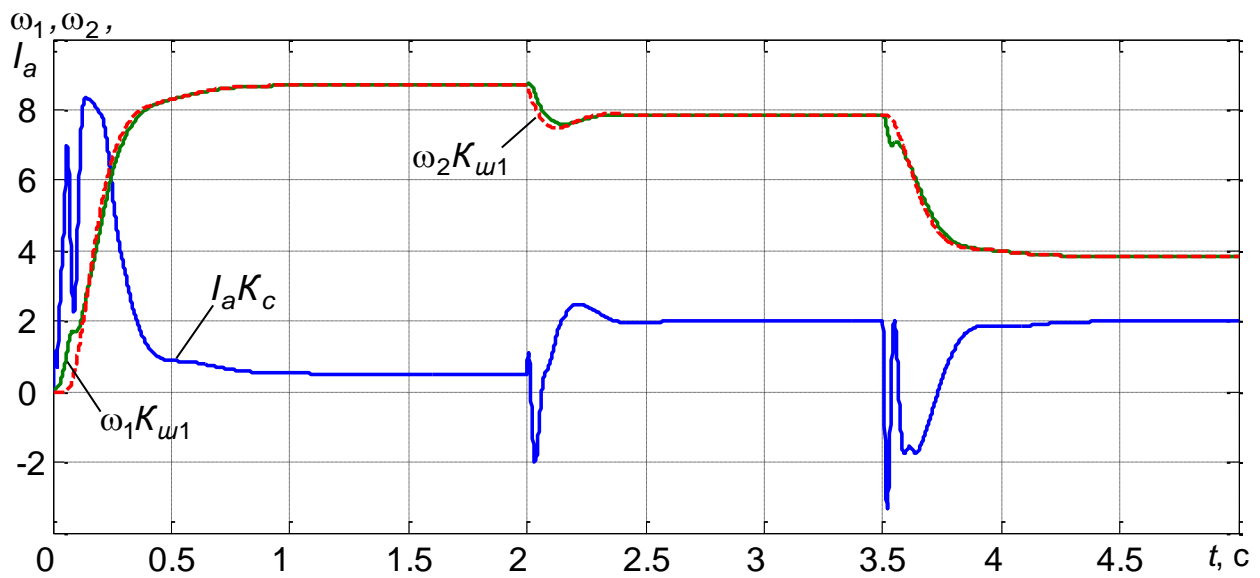


Рис. 15. Графіки перехідних процесів в однозонному електроприводі постійного струму з пружністю в механічній передачі при корегуванні

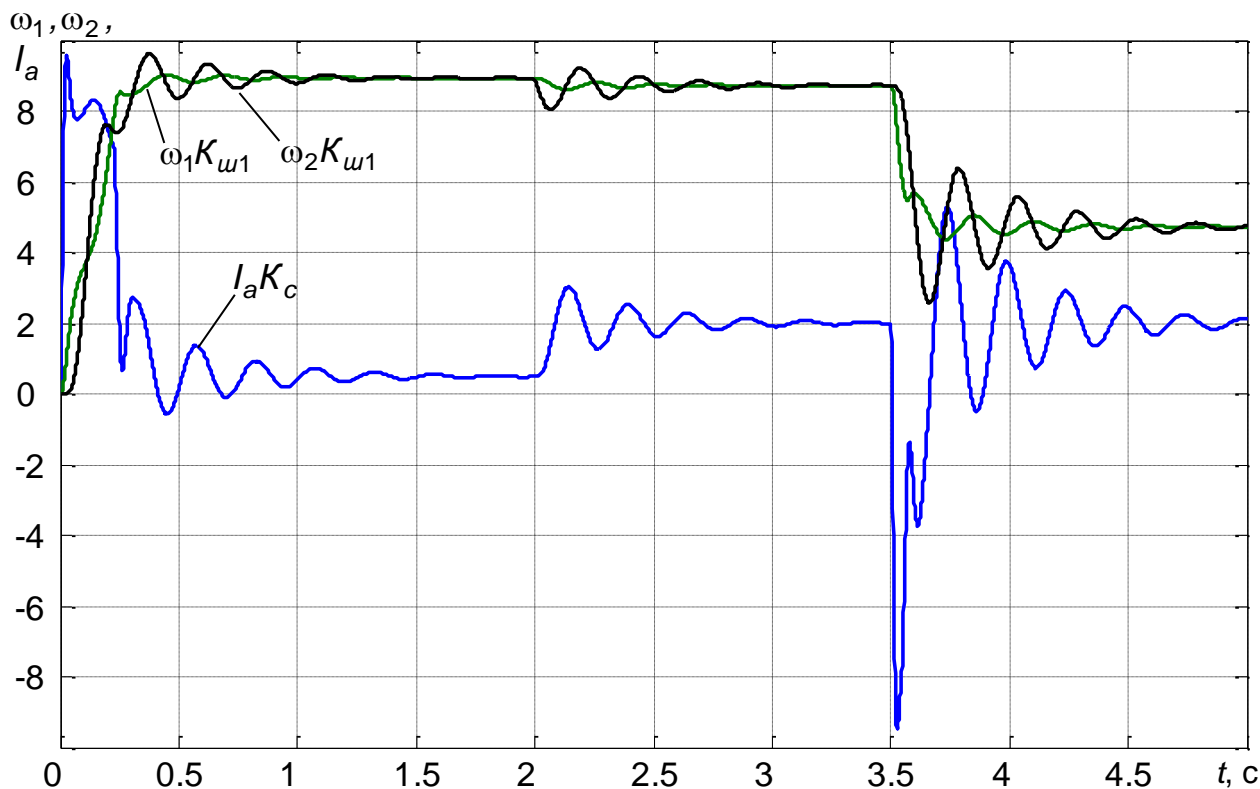


Рис. 16. Графіки перехідних процесів в однофазному електроприводі постійного струму з пружністю в механічній передачі при стандартному налагодженні П-регулятора швидкості

## 6. Глосарій

**Жорстка електромеханічна система** – система, що не містить пружних зв'язків та податливих елементів (канати, конвеєрні стручки, металеві стержні тощо).

**Пружна електромеханічна система** – система, що містить пружний механічний зв'язок або податливі елементи.

**Гнучкий зворотний зв'язок** – зв'язок за першою, другою або іншою похідною однієї із координат регулювання.

**Критерій Вишнєградського** – критерій стійкості системи третього порядку, що базується на аналізі положення робочої точки на характеристичній кривій гіперболічного типу, причому координати точки залежать від параметрів електромеханічної системи.

## 7. Питання для самоперевірки

1. Які системи можна визначити як "жорсткі", а які "пружні"?
2. Навіщо демпфувати коливання в електромеханічній системі з пружністю в механічній передачі?

3. Типові припущення, що приймають при складанні диференціальних рівнянь двомасових механічних систем?
4. Які типові нелінійності використовуються при математичному опису двомасової системи?
5. Як приводити параметри двомасової системи до валу двигуна?
6. Як визначається еквівалентна жорсткість системи "вал-редуктор"?
7. При яких співвідношеннях параметрів електромеханічної системи можна нехтувати впливом пружності на контур струму?
8. Умови нехтування пружністю на контур швидкості?
9. За яких умов можна використовувати налагодження регулятора швидкості без використання корегуючих зв'язків?
10. Для чого використовують критерій Вишнеградського?
11. Які гнучкі зворотні зв'язки використовуються при корегуванні електромеханічної системи з пружним механічним зв'язком?
12. Який спосіб корегування слід використовувати при співвідношенні мас у проміжку 3-10?
13. Які слід використовувати гнучкий зворотний зв'язок при  $\gamma > 10$ ?
14. За допомогою яких додаткових зворотних зв'язків можна скорегувати електромеханічну систему з пружної механічної передачею при  $\gamma = 1 \div 3$ ?
15. Як відбивається на динаміці електромеханічної системи з пружністю в механічній передачі дія задатчика інтенсивності на вході контуру швидкості.

## 8. Теми рефератів

1. Електромеханічні системи з пружністю другого роду.
2. Корегування пружних електромеханічних систем за похідною пружного моменту.
3. Динамічні моделі шахтних підймальних установок.
4. Динамічні моделі конвеєрів.
5. Закони керування складними електромеханічними системами.
6. Гнучкі зворотні зв'язки як спосіб корегування складних пружних електромеханічних систем.
7. Способи корегування пружних електромеханічних систем.

## **II. ЛАБОРАТОРНИЙ МОДУЛЬ**

**Задача** – оволодіти навичками:

- складання структурних представлень однозонного електропривода з пружністю та корегуючими зв'язками;
- розрахунку параметрів двоконтурного однозонного електропривода з пружністю в механічній передачі та корегуючими зв'язками;
- моделювання фізичних процесів двоконтурного однозонного електропривода з пружним зв'язком із підпорядкованим регулюванням параметрів та корегуванням за допомогою додаткових зворотних зв'язків у математичному пакеті MatLab;
- дослідження електромеханічної системи з пружністю та корегуючими зв'язками.

### **Завдання на моделювання**

1. Здійснити розрахунок параметрів електромеханічної системи за даними електродвигуна згідно з індивідуальним завданням (Додаток А, табл. 1) при різних  $\gamma$  (Додаток Б, табл. 1, 2) та САК із:

- стандартним налагодженням П-регулятора швидкості (позначка **1\*** в табл. 1, 2, Додаток Б);
- корегуванням за похідною швидкості виконавчого валу при відповідному бажаному налагодженні П-регулятора швидкості (позначка **2\*** в табл. 1, 2, Додаток Б);
- корегуванням за похідною швидкості виконавчого валу при відповідному бажаному налагодженні ПІ-регулятора швидкості (позначка **3\*** в табл. 1, 2, Додаток Б);
- корегуванням за другою похідною швидкості виконавчого валу при відповідному бажаному налагодженні П-регулятора швидкості (позначка **4\*** в табл. 1, 2, Додаток Б);
- корегуванням за різницею швидкостей виконавчого валу та двигуна при відповідному бажаному налагодженні П-регулятора швидкості (позначка **5\*** в табл. 1, 2, Додаток Б);
- корегуванням за різницею швидкостей виконавчого валу та двигуна при відповідному бажаному налагодженні ПІ-регулятора швидкості (позначка **6\*** в табл. 1, 2, Додаток Б);
- корегуванням за похідною швидкості двигуна при відповідному бажаному налагодженні П-регулятора швидкості (позначка **7\*** в табл. 1, 2, Додаток Б);



– корегуванням за похідною струму при стандартному налагодженні П-регулятора швидкості (позначка  $\mathbf{8}^*$  в табл. 1, 2, Додаток Б).

2. За допомогою бібліотек Simulink математичного пакету MatLab та m-файлу розрахунку параметрів системи, виконати моделювання однозонного електропривода з пружним зв'язком при різних  $\gamma$ , налагодженнях регулятора швидкості та наявності додаткових корегуючих зв'язків (Додаток А, Б, табл. 1, 2).

3. Прийняти  $T_n = 0,2$ с та провести дослідження електромеханічної системи відповідно п.1. Результати досліджень занести до таблиць 1, 2 (Додаток Б).

4. Прийняти  $T_n = 0,05$ с та провести дослідження електромеханічної системи відповідно п.1. Результати досліджень занести до таблиць 1, 2 (Додаток Б).

5. Проаналізувати отримані результати та зробити висновок щодо ефективності використання того чи іншого додаткового корегуючого зв'язку при відповідних співвідношеннях мас.

Варіант завдання у табл. 1 (Додаток А) обирається за номером у журналі викладача.

### Критерії оцінки

Кожне виконане у повному обсязі завдання оцінюється в 1 бал (усього 5 балів).

### Зміст звіту

- Вихідні данні.
- М-файл та програма в пакеті бібліотек Simulink однозонного електропривода з пружним зв'язком та різними додатковими зворотними зв'язками.
- Заповнені таблиці 1 та 2 за результатами виконаних досліджень при  $T_n = 0,2$ с (Додаток Б).
- Заповнені таблиці 1 та 2 за результатами виконаних досліджень при  $T_n = 0,05$ с (Додаток Б).
- Графіки перехідних процесів усіх координат електромеханічної системи ( $\omega_1(t)$ ,  $\omega_2(t)$ ,  $I_a(t)$ ) при  $\gamma = 2$  та різних САК відповідно п.1. (8 кривих на одній координатній вісі).
- Висновки щодо ефективності використання додаткових корегуючих зв'язків.

## Додаток А

### Параметри двигунів постійного струму

Таблиця 1

#### Параметри двигунів постійного струму

№*	Тип	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$R_a$ , Ом	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>
1	П41	1	750	220	6,8	5,35	0,037
2	П41	1,5	1000	220	9,3	2,9	0,037
3	П41	3,2	1500	220	18,4	1,032	0,037
4	П41	6	3000	220	33	0,36	0,037
5	П42	1,5	750	220	9,75	2,92	0,045
6	П42	2,2	1000	220	13,3	1,75	0,045
7	П101	42	750	220	222	0,049	2,575
8	П101	55	1000	220	286	0,0292	2,575
9	П101	100	1500	220	508	0,0131	2,575
10	П102	42	600	220	223	0,05	3
11	П102	55	750	220	286	0,0311	3
12	П102	75	1000	220	385	0,0199	3
13	П102	125	1500	220	632	0,0079	3
14	П111	55	600	220	287	0,0362	5,1
15	П111	75	750	220	387	0,0236	5,1
16	П111	100	1000	220	511	0,0153	5,1
17	П111	160	1500	220	809	0,00638	5,1
18	П112	70	600	220	361	0,0262	5,85
19	П112	85	750	220	436	0,0192	5,85
20	П112	125	1000	220	632	0,0102	5,85
21	П71	11	1000	220	63	0,3	0,35
22	П71	19	1500	220	103	0,1235	0,35
23	П72	10	750	220	58	0,357	0,4
24	П72	14	1000	220	78	0,237	0,4
25	П72	25	1500	220	132	0,0828	0,4

\*Примітка:

При розрахунках САК електропривода прийняти перевантажувальну здатність двигуна  $\lambda = 2$ .

## Додаток Б

### Результати досліджень

Таблиця 1

#### Результати досліджень

Режим роботи	$\gamma$	а	$\omega_{1max}$ , рад/с								
		б	$\omega_{2max}$ , рад/с								
		Reg*	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*	
Пуск електропривода до номінальної швидкості без навантаження	15	а									
		б									
	10	а									
		б									
	7	а									
		б									
	5,8	а									
		б									
	3	а									
		б									
	2	а									
		б									
	1,5	а									
		б									
	1,05	а									
		б									
Пуск електропривода до номінальної швидкості під номінальним реактивним навантаженням	15	а									
		б									
	10	а									
		б									
	7	а									
		б									
	5,8	а									
		б									
	3	а									
		б									
	2	а									
		б									
	1,5	а									
		б									
	1,05	а									
		б									

\*Примітка:

Регулятор визначається відповідно завданню на моделювання (п. 1).

## Результати досліджень

Режим роботи	$\gamma$	а	$M_{дв. max}, Н \cdot м$								
		б	$t_p^*, с$								
		Рег*	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*	
Пуск електропривода до номінальної швидкості без навантаження	15	а									
		б									
	10	а									
		б									
	7	а									
		б									
	5,8	а									
		б									
	3	а									
		б									
	2	а									
		б									
	1,5	а									
		б									
	1,05	а									
		б									
Пуск електропривода до номінальної швидкості під номінальним реактивним навантаженням	15	а									
		б									
	10	а									
		б									
	7	а									
		б									
	5,8	а									
		б									
	3	а									
		б									
	2	а									
		б									
	1,5	а									
		б									
	1,05	а									
		б									

\*Примітки:

1. Регулятор визначається відповідно завданню на моделювання (п. 1).
2.  $t_p$  – час розгону до номінальної швидкості (час першого досягнення заданої швидкості).

## Перелік літературних джерел

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, 1979. – 160 с.
3. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: Навч. посібник / С.М. Довгань. – Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 137 с.
4. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
5. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін. – К.: Вищ. Шк., 1993. – 494 с.

## Зміст

	стор.
Вступ.....	3
I. Лекційний модуль.....	4
1. Загальні положення.....	4
2. Оцінка впливу пружності на роботу системи керування швидкістю однозонного електропривода при стандартному налагодженні контурів регулювання.....	7
2.1. Оцінка впливу пружності на роботу контуру струму.....	11
2.2. Оцінка впливу пружності на роботу контуру швидкості.....	12
3. Налагодження системи керування швидкістю однозонного електропривода з пружністю без застосування додаткових паралельних корегуючих зв'язків.....	14
4. Паралельне корегування системи керування однозонним електроприводом з пружністю.....	22
4.1. Зворотний зв'язок за похідною швидкості ВВ.....	23
4.2. Зворотний зв'язок за другою похідною швидкості ВВ.....	25
4.3. Зворотний зв'язок за різницею швидкостей двигуна та ВВ.....	27
4.4. Зворотний зв'язок за похідною швидкості двигуна.....	28
4.5. Зворотний зв'язок за похідною струму якоря двигуна.....	29
4.6. Рекомендації щодо налагодження САК швидкістю електропривода з пружністю.....	32
5. Приклад дослідження перехідних процесів у однозонному електроприводі постійного струму із пружністю.....	33
7. Глосарій.....	37
8. Питання для самоперевірки.....	37
9. Теми рефератів.....	38
II. Лабораторний модуль.....	39
Завдання на моделювання.....	39
Критерії оцінки.....	40
Зміст звіту.....	40
Додаток А Параметри двигунів постійного струму.....	41
Додаток Б Результати досліджень.....	42
Перелік літературних джерел.....	44
Зміст.....	45

