

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
Кафедра електропривода

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Методичне забезпечення дисципліни
для здобувачів третього освітньо-наукового рівня вищої освіти (доктор
філософії)

Дніпро
2020

Методичні матеріали для вивчення дисципліни «Ідентифікація та адаптивне керування електромеханічними системами» [Електронний ресурс] / О.О. Азюковський, А.О. Самойленко, О.В. Балахонцев – Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2020. – 34 с.

Укладачі: О.О. Азюковський, канд. техн. наук, професор,
А.О. Самойленко, канд. техн. наук, доцент,
О.В. Балахонцев, канд. техн. наук, доцент.

Рекомендовано до публікації за поданням методичної комісії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Методичні матеріали включають лекційний блок з дисципліни «Ідентифікація та адаптивне керування електромеханічними системами». Дисципліна присвячена вивченню підходів щодо опосередкованого визначення параметрів і координат в системі електропривода і синтезу адаптивних систем керування.

Крім того, методичні матеріали включають вихідні дані та методичні вказівки до виконання практичної роботи – визначення сталих часу електромеханічної системи на прикладі однозонного електропривода постійного струму.

СПОСТЕРІГАЧ СТАНУ, ОПОСЕРЕДКОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, АДАПТАЦІЯ

Відповідальний за випуск завідувач кафедри електропривода
М.М. Казачковський, к.т.н., професор

Зміст

<i>I. ЛЕКЦІЙНИЙ МОДУЛЬ</i>	4
1. Загальні відомості	4
2. Визначення частотних та часових характеристик.....	6
3. Адаптивні спостерігаючі пристрої ідентифікації.....	7
4. Адаптивна система керування зі спостерігаючим пристроєм ідентифікації моменту інерції	11
5. Приклад дослідження перехідних процесів у однозонному електроприводі постійного струму із адаптивним спостерігаючим пристроєм ідентифікації моменту інерції	14
6. Адаптивна система керування зі спостерігаючим пристроєм ідентифікації опору якірного кола.....	19
7. Приклад дослідження перехідних процесів у однозонному електроприводі постійного струму із адаптивним спостерігаючим пристроєм ідентифікації опору якірного кола.....	22
8. Глосарій	26
9. Питання для самоперевірки	27
10. Теми рефератів.....	27
<i>II. ЛАБОРАТОРНИЙ МОДУЛЬ</i>	28
Завдання на моделювання	28
Критерії оцінки	29
Зміст звіту.....	29
Додаток А. Параметри двигунів постійного струму	30
Додаток Б. Результати досліджень	31
Перелік літературних джерел.....	34

I. ЛЕКЦІЙНИЙ МОДУЛЬ

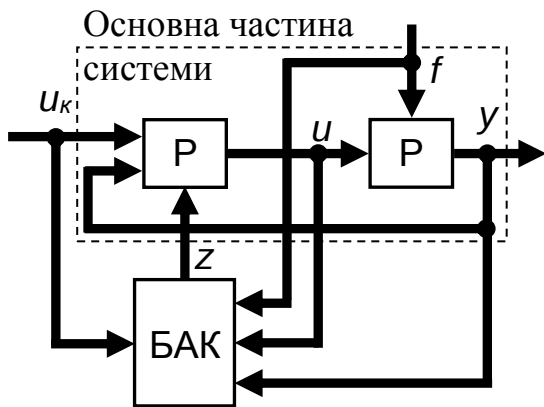
Вивчення наступного матеріалу дозволяє оволодіти методологією:

- проектування адаптивних спостерігаючих пристроїв ідентифікації параметрів електромеханічних систем;
- складання структурних представлень адаптивних спостерігаючих пристроїв;
- побудови систем підпорядкованого керування швидкістю з адаптивним спостерігачим пристроєм ідентифікації моменту інерції електропривода постійного струму;
- розрахунку параметрів електромеханічної системи з адаптивним спостерігачим пристроєм ідентифікації моменту інерції однозонного електропривода постійного струму;
- побудови однозонного електропривода з адаптивним спостерігачим пристроєм ідентифікації опору якірного кола двигуна;
- розрахунку параметрів однозонного електроприводу з адаптивним спостерігачим пристроєм ідентифікації опору якірного кола двигуна.

1. Загальні відомості

Нестационарність роботи електроприводів як об'єктів керування залежить від способів керування електродвигунами постійного або змінного струму, а також від властивостей механізмів в процесі експлуатації [3]. При роботі електроприводів можуть змінюватись наступні основні величини: параметри електромагнітних контурів в колі "перетворювач–двигун", передаточні коефіцієнти перетворювачів, потоку збудження двигунів, моментів інерції механізмів, частот пружних механічних коливань, взаємної зміни механічних параметрів в складних системах багатодвигунних промислових установках. Крім того, в процесі експлуатації систем автоматичного керування (САК) електроприводами може відбуватись значна зміна за спектральним складом та інтенсивності збуджуючих і керуючих дій, що може призвести до суттєвого збільшення динамічних похибок системи, а значить і до необхідності переналагодження параметрів регуляторів із метою зменшення похибок регулювання.

Функціональна схема адаптивної САК електроприводом представлена на рис. 1. Основна частина системи містить об'єкт керування (О) та регулятор (Р),



що охоплені зворотним зв'язком. В якості основної частини системи може бути будь-яка САК нестационарного електропривода. Адаптивне керування реалізується в системі додатковим блоком адаптивного керування (БАК), який містить в собі блок обробки інформації про поточний стан об'єкту керування або усієї системи та блок переналагодження параметрів регуляторів у відповідності з прийнятим критерієм якості роботи адаптивної

Рис. 1. Функціональна система системи.
САК електропривода

Адаптивне керування направлене на вирішення наступних основних задач:

1. Забезпечувати таку зміну параметрів регуляторів, за умови якої динамічні властивості системи при заданих збуреннях та будь-якій зміні параметрів електроприводів не змінюються. Вважається, що система при початкових умовах налагоджена оптимально, а в подальшому забезпечується лише підтримка стабільності показників якості системи.
2. Забезпечити автоматичний пошук оптимальних умов роботи системи у відповідності до заданого критерію якості за умови відсутності початкової інформації про параметри електроприводів та зовнішніх збурень на систему керування.

Слід зауважити, що умови для другої задачі можна сформулювати інакше. Наприклад, є досить повна інформація про систему електропривода, параметри якої незмінні, але при зміні умов функціонування механізму, невизначеним чином змінюються збурення на САК. Вирішення такої задачі саме і пов'язане з пошуком оптимальних режимів роботи системи.

Першу задачу можна вирішити за допомогою досить простих прийомів компенсації змінних параметрів систем електроприводів. Цього можна досягти, шляхом використання, наприклад, внутрішніх зворотних зв'язків, що охоплюють частину об'єкту керування з нестационарними параметрами. Якщо координати та параметри системи, що містять інформацію про нестационарність об'єкту або ті, що використовуються для компенсації внутрішніх негативних зв'язків, безпосередньо не можуть бути вимірюваними, то можливе використання спостерігаючих пристроїв, які відновлюють необхідні координати та параметри системи електропривода. Теорія спостерігаючих пристроїв розроблена в більшості тільки для стаціонарних об'єктів і використовувати її для нестационарних об'єктів можна тільки за умови гіпотези щодо квазістаціонарності системи в процесі оцінки параметрів і стану об'єкту керування.

Поряд з цим, можливе використання різноманітних прийомів адаптації, що залежать від конкретних потреб, які пред'являються САК та від умов

їхнього функціонування. Прийоми адаптації використовуються у тому випадку, коли оптимізація САК відбувається за умов неповної інформації про систему або коли в процесі їхнього функціонування спостерігається непрограмована зміна параметрів та зовнішніх збурень. Як правило, ці прийоми пов'язані з оцінкою параметрів та станом системи (ідентифікацією системи) шляхом її збудження та автоматичним переналагодження параметрів або структури керуючої частини, а також введенням додаткових сигналів.

Функціонуюча САК електропривода постійно знаходиться під впливом різного роду збурюючих факторів: зміна моментів опору та напруги мережі, перешкоди від датчиків, електромагнітні наводки, теплові дрейфи та шуми тощо. Оцінку стану функціонуючої системи доцільно здійснювати із використанням натурних динамічних процесів. Однак це не завжди можливе, у наслідок того що енергетичний спектр збурень може бути досить вузьким або являти собою сполучення періодичних сигналів тільки на окремих частотах. В такому випадку необхідно спеціально вводити тестові сигнали, яким надають форму, що оптимальним чином відповідають стану оцінки системи. Форма такого сигналу також залежить від опису стану системи.

Для отримання інформації про стан системи у вигляді часових характеристик використовують імпульсні та ступінчасті сигнали, а у вигляді частотних характеристик – синусоїдальні, прямокутні та інші періодичні сигнали. В якості тестових сигналів можна використовувати також і випадкові сигнали із заданими характеристиками.

Інформація про функціонуючу систему може бути отримана у вигляді амплітудно-фазових частотних характеристик, імпульсних перехідних функцій, оцінених параметрів і координат системи або в іншій формі. Розглянемо декілька методів ідентифікації об'єктів, що у подальшому використовуються для організації адаптивних систем керування.

2. Визначення частотних та часових характеристик

Частотні та часові характеристики найбільш повно характеризують динамічні властивості САК електропривода. Частотні характеристики можна визначити шляхом безпосереднього вимірювання, якщо в систему ввести синусоїдальні сигнали різної частоти. Амплітуда вихідного сигналу на частоті ω_i може бути виміряна шляхом пропускання сигналу через вузькосмуговий фільтр, випрямляч і згладжуючий фільтр. Безпосереднє вимірювання фази можна здійснити за допомогою фазового дискримінатора, на виході якого формується сигнал, пропорційний різниці фаз двох періодичних сигналів, що поступають до його входу. Також використовують інші способи вимірювання фази. Наприклад, використовують порівняння вихідного сигналу системи з вихідним сигналом моделі при подачі на вхід системи та моделі гармонійних тестових сигналів. Наприклад, реакцією системи на тестовий сигнал $u_i = u_o \sin(\omega_i t) \in y_i = y_{oi} \sin(\omega_i t + \varphi_{oi})$, реакцією моделі на тестовий сигнал $u_i = u_o \cos(\omega_i t) \in y_{mi} = y_{mi} \cos(\omega_i t + \varphi_{mi})$. Реакції цих сигналів перемножуємо та отримуємо:

$$y_{oi} \sin(\omega_i t + \varphi_{oi}) \cdot y_{mi} \cos(\omega_i t + \varphi_{mi}) = \\ \frac{1}{2} y_{oi} \cdot y_{mi} [\sin(\varphi_{oi} - \varphi_{mi}) + \sin(2\omega_i t + \varphi_{oi} + \varphi_{mi})].$$

Постійна складова цього рівняння якраз і визначає відхилення фази досліджуваної системи від фази моделі на частоті ω_i .

Визначити частотні характеристики САК електропривода можна також без введення тестових сигналів за умови, що керуючий вплив є випадковою функцією або містить перешкоду. Це здійснюється шляхом визначення характеристик випадкових процесів на вході та виході системи, наприклад, шляхом визначення спектральної густини або кореляційних функцій.

Використовуються способи, що ґрунтуються на співвідношенні позитивних та негативних площин імпульсного перехідного процесу та інші. Визначення імпульсної перехідної функції здійснюється за реакцією системи на короткочасний імпульс. Недоліком цих способів є необхідність збудження системи імпульсом, амплітуда якого перевищує будь-які інші сигнали в системі. Такий імпульс є потужною перешкодою для системи, а значить, неприпустимим за умовами експлуатації об'єкту ідентифікації. У такому разі слід віддати перевагу способу, що ґрунтується на визначенні статичних характеристик системи.

3. Адаптивні спостерігаючі пристрої ідентифікації

Спостерігачі (спостерігаючі пристрої), що відновлюють змінні стану об'єкту, можуть також ідентифікувати зовнішні збурення, що не піддаються безпосередньому вимірюванню та невідомі параметри об'єкту керування. В такому випадку спостерігаючі виконують із самоналагодженням за ідентифікованим параметрам за рахунок введення інтеграторів, вихідні сигнали яких є різницею між вимірюваними та оціночними значеннями змінних стану об'єкту [4].

Розглянемо процедуру ідентифікації невідомих параметрів об'єкту за допомогою адаптивного спостерігача на прикладі об'єкту керування з одним вхідним $u(t)$ та вихідним $y(t)$ скалярним сигналом. Об'єкт є лінійним, n -го порядку із наперед відомою передатною функцією та незмінними у часі параметрами. За таких умов можна синтезувати спостерігач, що ідентифікує всі невідомі параметри об'єкту та забезпечує оцінку вектору стану x . Об'єкт характеризується передатною функцією, ступінь чисельника якої як мінімум на одиницю менше за ступінь знаменника:

$$W_o(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{B_0 p^{n-1} + B_1 p^{n-2} + \dots + B_{n-1}}{p^n + A_1 p^{n-1} + \dots + A_n}, \quad (1)$$

де A_i, B_i – невідомі коефіцієнти.

Розділимо чисельник та знаменник передатної функції (1) на поліном $(n-1)$ -ого ступеню:

$$(p + \lambda_2)(p + \lambda_3) \dots (p + \lambda_n),$$

де $\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ – дійсні та від’ємні корені характеристичного поліному.

Розклавши чисельник та знаменник на прості дробі, отримаємо:

$$\frac{y(p)}{u(p)} = \frac{b_1 + b_2 \frac{1}{p + \lambda_2} + \dots + b_n \frac{1}{p + \lambda_n}}{p - a_1 - a_2 \frac{1}{p + \lambda_2} - \dots - a_n \frac{1}{p + \lambda_n}}, \quad (2)$$

де $b_1 = B_0$; $a_1 = (\lambda_2 + \dots + \lambda_n) - A_1$; інші коефіцієнти b_i та a_i є складними поліноміальними виразами відносно A_i , B_i та λ_i [4].

На підставі (2) запишемо:

$$\begin{aligned} \left(p - (a_1 + \lambda_1) + \lambda_1 - a_2 \frac{1}{p + \lambda_2} - \dots - a_n \frac{1}{p + \lambda_n} \right) y(p) = \\ = \left(b_1 + b_2 \frac{1}{p + \lambda_2} + \dots + b_n \frac{1}{p + \lambda_n} \right) u(p). \end{aligned}$$

Виконуючі нескладні перетворення, маємо:

$$\begin{aligned} y(p) = \frac{1}{p + \lambda_1} \left[\left(b_1 + b_2 \frac{1}{p + \lambda_2} + \dots + b_n \frac{1}{p + \lambda_n} \right) u(p) + \right. \\ \left. + \left(a'_1 + a_2 \frac{1}{p + \lambda_2} + \dots + a_n \frac{1}{p + \lambda_n} \right) y(p) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

де $a'_1 = a_1 + \lambda_1$.

Замінюючи в (3) параметри a_i , b_i оціночними значеннями $\hat{a}_i$, $\hat{b}_i$ та вводячи проміжні змінні $\hat{z}_i$, $\hat{\omega}_i$, отримаємо структурну схему спостерігача (рис. 1) із контуром адаптивного налагодження параметрів $\hat{a}_i$, $\hat{b}_i$, що позначений штриховою лінією.

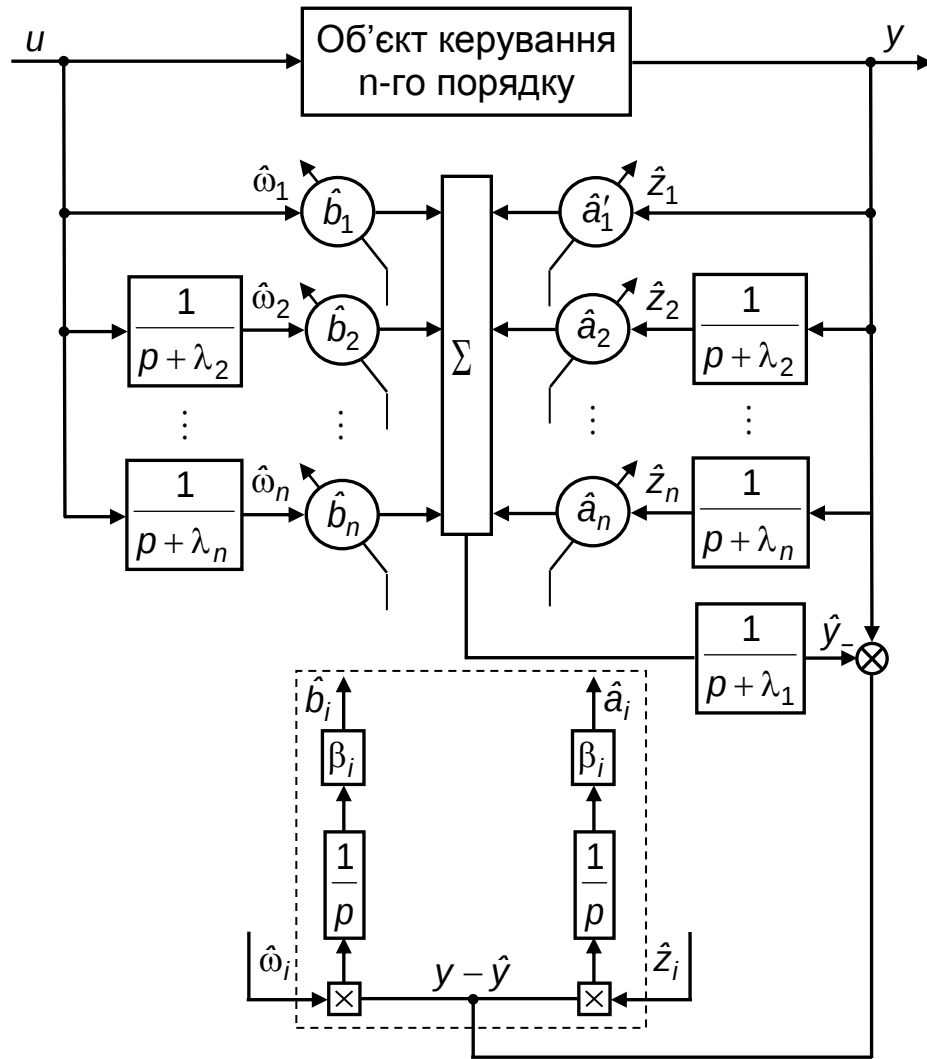


Рис. 2. Структурна схема адаптивного спостерігача

Визначений передатною функцією (2) об'єкт керування характеризується наступними рівняннями відносно змінних стану:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ a_2 & & & & \\ \vdots & & & & \\ a_n & & & & \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \times u;$$

$$y = [1 \ 0 \ \dots \ 0]x = x_1, \quad (4)$$

де Λ – діагональна матриця вигляду:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\lambda_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\lambda_n \end{bmatrix}.$$

Вважаючи вихідний сигнал вимірюваним, рівняння (4) можна представити у наступній формі:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{x}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^T \\ r^T \\ \Lambda \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ x' \end{bmatrix} + bu, \quad (5)$$

де $x' - (n-1)$ -вимірний вектор, що відповідає невідомій частини $[x_2 \dots x_n]^T$ вектору стану $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$; $r^T = [1 \ 1 \ \dots \ 1]$; a, b – параметричні вектори із невідомими елементами, $a = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]^T$, $b = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T$.

Рівняння, що описують адаптивний спостерігач стану у відповідності до рис. 2 мають вигляд [1]:

$$\begin{aligned} \hat{w}' &= \Lambda^T \hat{w}' + ru; \\ \begin{bmatrix} \dot{\hat{y}} \\ \dot{\hat{z}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{a}^T \\ r^T \\ \Lambda^T \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} y \\ \hat{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \times [\hat{b}^T \hat{w} - \lambda_1 \tilde{y}]; \end{aligned}$$

$$\dot{\hat{a}}_1 = -\gamma_1 y \tilde{y}; \quad \dot{\hat{b}}_1 = -\beta_1 u \tilde{y}; \quad \dot{\hat{a}}_i = -\gamma_i \hat{z}_i \tilde{y}; \quad \dot{\hat{b}}_i = -\beta_i \hat{\omega}_i \tilde{y}; \quad (i = 2, \dots, n),$$

де $r = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$; $\lambda_1 > 0$; $\tilde{y} = y - \hat{y}$; $\hat{w} = [u \ \hat{w}'^T]^T$; $\hat{w}', \hat{z} - (n-1)$ -вимірні вектори проміжних змінних спостерігача:

$$\hat{w}' = [\hat{\omega}_2 \ \dots \ \hat{\omega}_n]^T; \quad \hat{z} = [\hat{z}_2 \ \dots \ \hat{z}_n]^T;$$

$\gamma_i > 0, \beta_i > 0, (i = 1, \dots, n)$ – коефіцієнти підсилення кіл адаптації, що призначені для налагодження параметрів $\hat{a}_i$ та $\hat{b}_i$.

Вибором коефіцієнтів γ_i та β_i можна оптимізувати процес ідентифікації параметрів об'єкту. Параметри $\hat{a}, \hat{b}$ є оцінкою параметрів a, b рівняння (5). Оцінка складових вектору стану $\hat{x}$ здійснюється шляхом послідовного підсумовування пар $\hat{a}_i \hat{z}_i$ та $\hat{b}_i \hat{\omega}_i$ в суматорі спостерігача:

$$\hat{x} = [y \hat{a}_2 \hat{z}_2 + \hat{b}_2 \hat{\omega}_2 \dots \hat{a}_n \hat{z}_n + \hat{b}_n \hat{\omega}_n]^T = [y \ \hat{x}'^T]^T.$$

Розглянемо застосування спостерігаючого пристрою ідентифікації на прикладі однозонного електропривода зі змінним моментом інерції.

4. Адаптивна система керування зі спостерігаючим пристроєм ідентифікації моменту інерції

В електроприводі постійного струму із системою підпорядкованого регулювання швидкістю відбувається наперед невідома зміна моменту інерції. Для стабілізації динамічних характеристик об'єкту використаємо в системі керування інформацію зі спостерігаючого пристрою ідентифікації моменту інерції. Таким чином, отримаємо адаптивну систему керування. Для спрощення вважатимемо момент опору руху електроприводу сталим.

Адаптивний спостерігаючий пристрій виконаємо у відповідності з основними положеннями викладеними вище. В якості керуючого впливу на нестационарну частину об'єкту розглядатимемо струм двигуна, а в якості вихідної координати – швидкість двигуна. Невідома лінійна частина об'єкту характеризується наступною передатною функцією:

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{K\Phi}{Jp} = \frac{b}{p}, \quad (6)$$

$$\text{де } y(p) = \omega(p), u(p) = I_a(p), b = \frac{K\Phi}{J}.$$

Відповідно (6), ідентифікації належить параметр b . Структурна схема спостерігаючого пристрою для об'єкту керування першого порядку у відповідності до рис. 2 представлена на рис. 3, а. Порівнюючи (6) зі стандартною формою передатної функції типу (2) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= b; \quad \hat{b}_1 = \hat{b}; \\ a_1 &= a_2 = \dots = 0; \\ \hat{a}'_1 &= a_1 + \lambda_1 = 0 + \lambda_1 = \lambda; \\ \beta_1 &= \beta. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

З урахуванням (7), структурну схему спостерігача (рис. 3, а) представимо у вигляді рис. 3, б, далі виконуючи певні перетворення, отримаємо кінцеве структурне перетворення на рис. 3, в.

Структурна схема адаптивної САК швидкістю зі спостерігаючим пристроєм ідентифікації параметру $\frac{K\Phi}{J}$ у відповідності до рис 3, в представлена на рис. 4.

Алгоритм роботи спостерігача (рис. 4) описується рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= \frac{K\Phi}{\hat{J}} I_a + \lambda K_w (\omega - \hat{\omega}); \\ \frac{d \frac{K\Phi}{\hat{J}}}{dt} &= \beta K_w I_a (\omega - \hat{\omega}). \end{aligned} \right\}$$

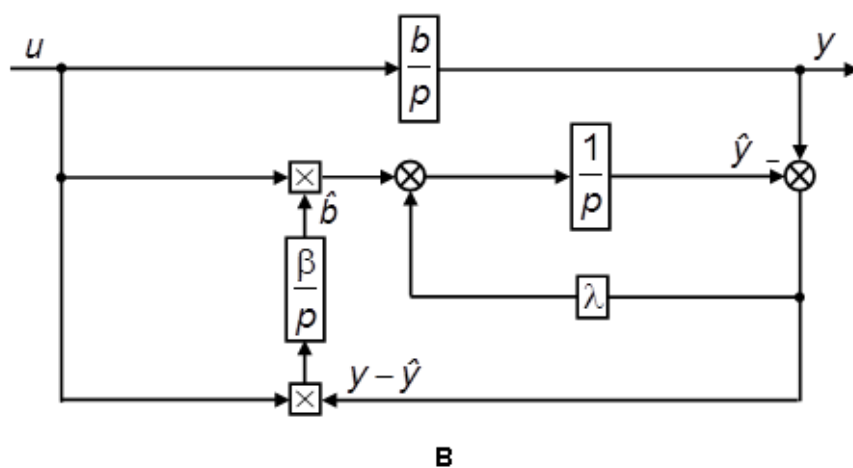
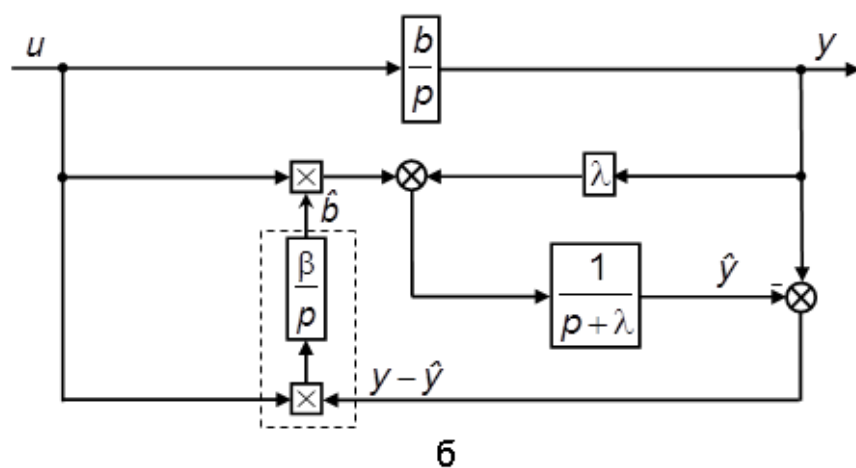
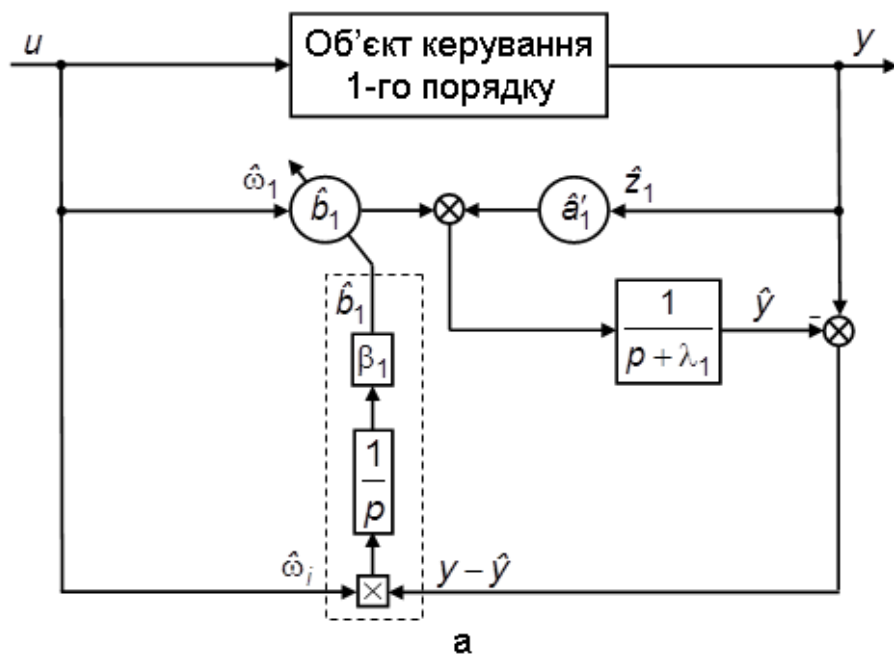


Рис. 3. Структурна схема адаптивного спостерігача об'єкту 1-го порядку

Таким чином, П-регулятор швидкості можна представити у вигляді послідовного з'єднання двох ланок: $K''_{рш}$ – змінної та $K'_{рш}$ – сталої. Змінна частина виконується у вигляді знаку множення, який розташовується послідовно зі сталою частиною з одного боку, з іншого – сигнал подається зі спостерігаючого пристрою крізь блок ділення (рис. 4). Блок ділення виконує операцію $\frac{1}{K\hat{\Phi}/\hat{J}}$.

При наперед невідомому законі зміни моменту інерції електропривода адаптивна САК матиме практично постійні динамічні характеристики за рахунок відповідної зміни передатного коефіцієнта $K''_{рш}$ регулятора швидкості.

В деяких електроприводах, наприклад, безредукторний слідкуючий із підпорядкованим регулюванням параметрів, можуть відбуватись параметричні збурення системи в наслідок змінного характеру потоку збудження двигуна. Ідентифікація параметру $K\hat{\Phi}$ сумісно з $\frac{1}{\hat{J}}$ надає можливість вводити параметричне корегування в систему при періодичній зміні цих параметрів.

5. Приклад дослідження перехідних процесів у однозонному електроприводі постійного струму із адаптивним спостерігаючим пристроєм ідентифікації моменту інерції

Розглянемо моделювання однозонного електропривода із адаптивною САК (рис. 4) на базі двигуна постійного струму типу П101 та порівняємо отримані результати* з аналогічною системою без адаптації до зміни моменту інерції.

Вихідні дані:

- параметри двигуна див. табл. 1;
- перевантажувальна здатність двигуна – $\lambda = 2$;
- регулятор струму – ПІ;
- регулятор швидкості – П;
- ЕРС – некомпенсована.
- навантаження відсутнє.

Режим роботи – розгін до номінальної швидкості та зупинка двигуна (початок гальмування при $t=1$ с).

*Примітка. Вважаємо, що П-регулятор швидкості в САК без адаптації налагоджений за умови, що момент інерції електропривода дорівнює моменту інерції двигуна (J_1). Насправді, момент інерції електропривода приймемо $J_2 = 5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Таблиця 1

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 ²
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 роботи визначимо $K\Phi = \frac{U_H - I_H R_a}{\omega_H}$.

Індуктивність якірного кола – $L_{я} = \kappa \frac{30 U_{яH}}{\pi p_{я} I_{яH} n_H}$, де $\kappa = 0,5$ приймаємо як для компенсованих машин.

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

Згідно даних табл. 1 співвідношення $4T_{мт}/T_a = 0,294 < 1$, 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 $T_{мт} = 0,005$ с, а коефіцієнт його передачі $K_{мт} = \frac{U_H}{10}$.

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

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

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

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

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості для адаптивної САК із пристроєм ідентифікації моменту інерції: $K_{p\omega} = \frac{K_c}{4T_{мт} K_{\omega}}$.

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості для САК без адаптації до зміни моменту інерції: $K_{p\omega} = \frac{K_c J_1}{4T_{мт} K_{\omega} K\Phi}$.

Обмеження регулятора швидкості приймемо на рівні 10 В.

Значення невідомих параметрів налагодження спостерігаючого пристрою: $\lambda = 1000$ та $\beta = 1$.

Завдання на швидкість:

$$U_{зм} = \begin{cases} 10; \\ 0, \text{ якщо } t > t_1, \end{cases}$$

де t_1 – час початку гальмування (через 1 секунду після початку руху).

Час обчислення перехідного процесу – $t_{max} = 1,5$ 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. 5 наведений приклад розрахунку параметрів розглянутих електромеханічних систем у вигляді m-файлу в пакеті **MatLab**. Програма моделювання цих електромеханічних систем виконана в пакеті бібліотек **Simulink** (рис. 6).

Графіки перехідних процесів в однозонному електроприводі постійного струму у заданих режимах роботи при наявності адаптації та без представлені на рис. 7. Крива зміни оцінки параметру $\frac{K\Phi}{\hat{j}}$ представлена на рис. 8.

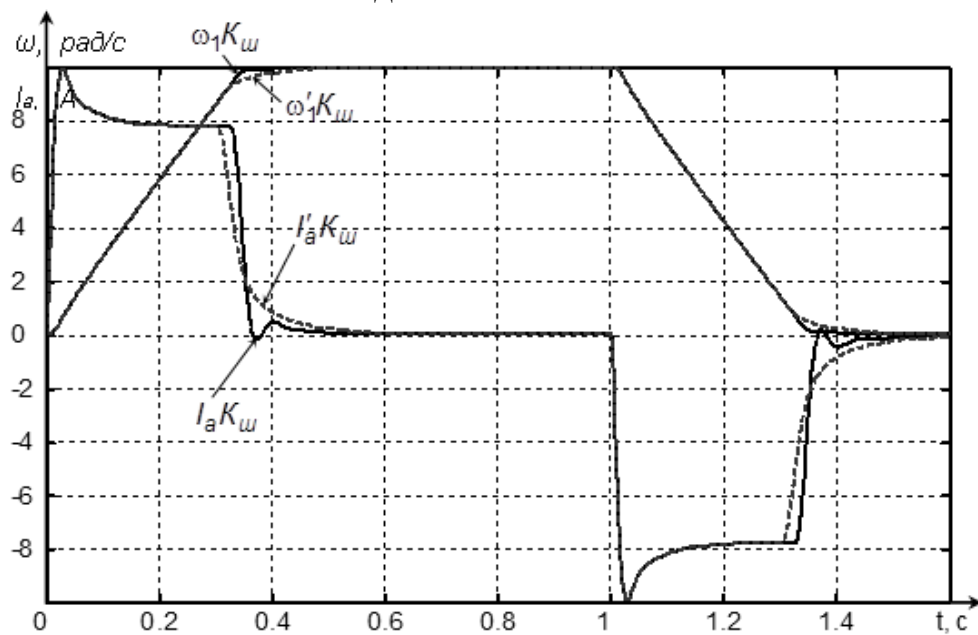
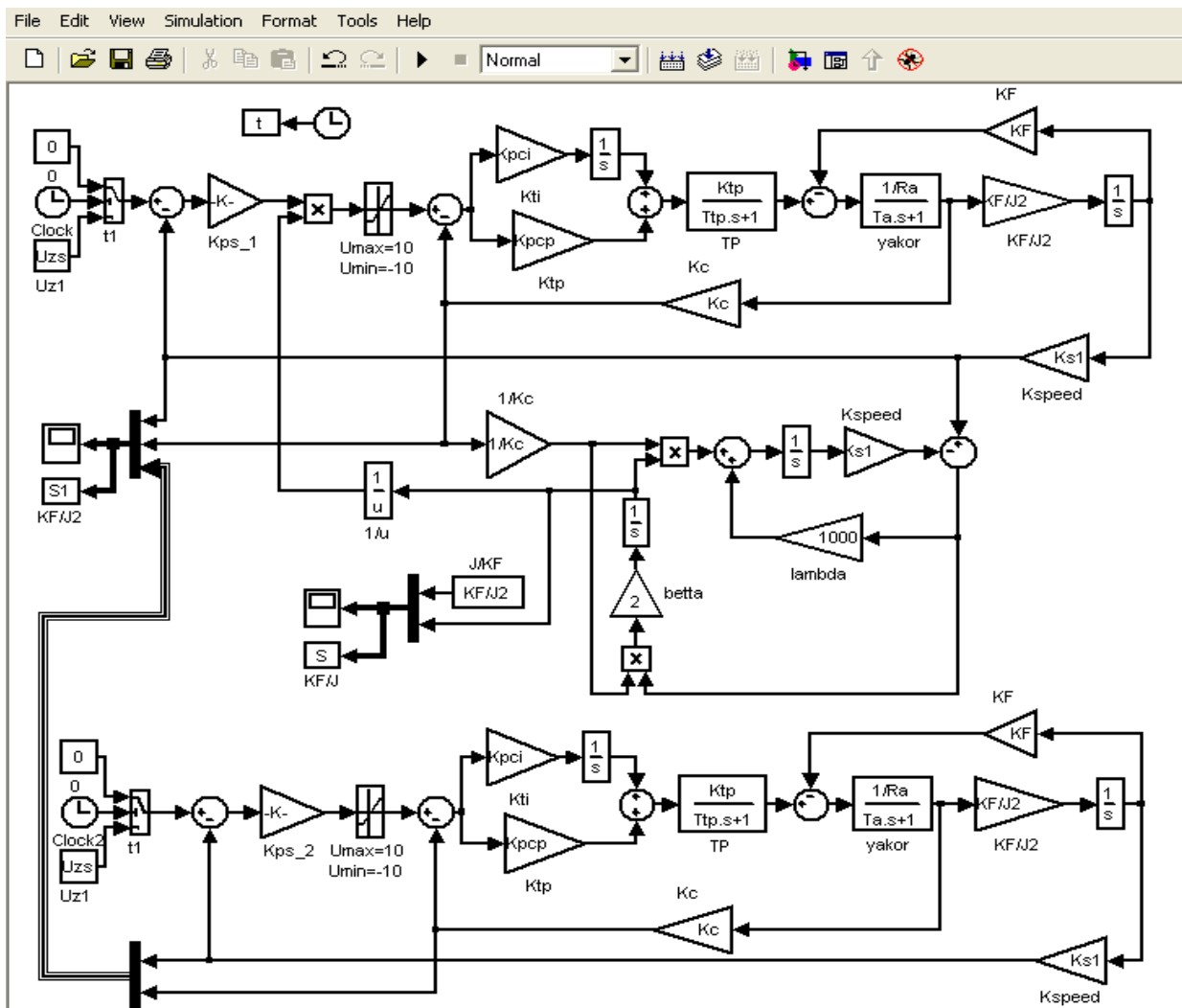
Порівнюючи рис. 8 із рис. 7 можна відмітити, що швидкодія спостерігаючого пристрою вища швидкодії електромеханічної системи.

```

File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack: Base
1 % Розрахунок однозонного електропривода з адаптивною САК ідентифікації моменту інерції
2 % 1.Вихідні дані двигуна
3 % ТИП П101
4 nn=600; % номінальна частота обертань (об/хв)
5 Un=220; % номінальна напруга живлення
6 In=172; % номінальний струм
7 Ra=0.0749; % активний опір якорного кола
8 J1=2.575; % момент інерції
9 p=2; % кількість пар полюсів
10 Lambda=2; % переважувальна здатність
11 % 2.Розрахунок додаткових параметрів двигуна
12 wn=pi*nn/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*nn); % індуктивність якорного кола
16 Ta=La/Ra; % електромагнітна стала часу
17 % 3.Розрахунок САК
18 Ub=10; % базова одиниця (В)
19 Uzs=10; % завдання на швидкість
20 tl=1; % час початку гальмування
21 J2=5; % реальний момент інерції електропривода
22 % 3.1 Тиристорний перетворювач
23 Ttp=0.005; % "мала" (некомпенсована) стала часу ТП
24 Ktp=Un/Ub; % коефіцієнт передачі ТП
25 % 3.2 Розрахунок коефіцієнтів зворотних зв'язків САК
26 Kc=Ub/(In*Lambda); % Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом
27 Ks1=Ub/wn; % Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю двигуна
28 % 3.3 Розрахунок коефіцієнтів регуляторів САК
29 Kpcp=Ra*Ta/(2*Ttp*Ktp*Kc); % коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора струму
30 Kpci=Ra/(2*Ttp*Ktp*Kc); % коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму
31 Kps_1=Kc/(4*Ks1*Ttp); % коефіцієнт підсилення регулятора швидкості для адаптивної САК
32 Kps_2=Kc*J1/(4*Ks1*KF*Ttp); % коефіцієнт підсилення регулятора швидкості при J1

```

Рис. 5. Розрахунки у вигляді m-файлу в пакеті **MatLab**



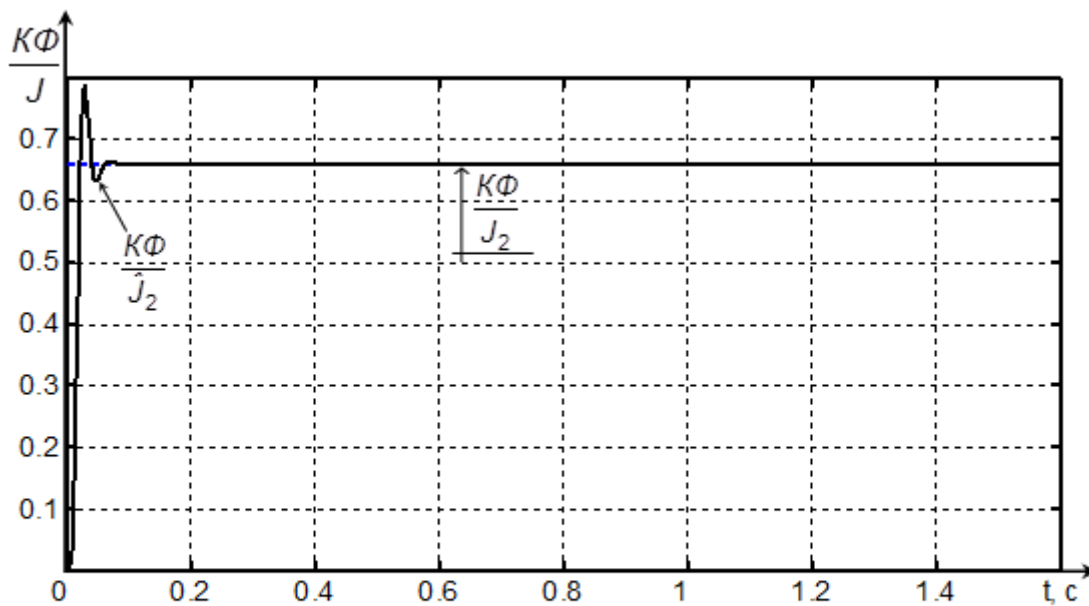


Рис. 8. Графіки перехідних процесів оцінки параметру $\frac{K\Phi}{J_2}$

6. Адаптивна система керування зі спостерігаючим пристроєм ідентифікації опору якорного кола

Вважатимемо, що в електроприводі постійного струму з САК із підпорядкованим регулюванням швидкістю відбувається наперед невідома зміна опору якорного кола, наприклад, за рахунок нестабільної температури навколишнього середовища, що призводить до зміни температури якорної обмотки, а значить дещо змінюється її опір. Для стабілізації динамічних характеристик об'єкту використаємо в САК інформацію зі спостерігаючого пристрою ідентифікації моменту опору. Таким чином, отримаємо адаптивну до зміни якорного опору систему керування. Для спрощення вважатимемо момент опору руху електроприводу сталим.

Адаптивний спостерігаючий пристрій виконаємо у відповідності з основними положеннями викладеними вище. В якості керуючого впливу на нестационарну частину об'єкту розглядатимемо різницю напруги тиристорного перетворювача та ЕРС двигуна ($U_n - E$), а в якості вихідної координати – струм якоря. Невідома лінійна частина об'єкту характеризується наступною передатною функцією:

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{1/R_a}{1 + T_a p}, \quad (8)$$

де $y(p) = I_a(p)$; $u(p) = I_a(p)$.

Приведемо передатну функцію (8) до вигляду (2):

$$W(p) = \frac{1/R_a}{1 + T_a p} = \frac{\frac{1}{R_a T_a}}{p + \frac{1}{T_a}} = \frac{b_1}{p - a_1}. \quad (9)$$

де $a_1 = -\frac{1}{T_a}; b_1 = \frac{1}{R_a T_a}.$

Відповідно (8), ідентифікації належить параметр b_1 . Структурна схема спостерігаючого пристрою для об'єкту керування першого порядку (8) у відповідності до рис. 2 представлена на рис. 3, а. Порівнюючи (9) зі стандартною формою передатної функції типу (2) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\frac{1}{T_a}; a_2 = a_3 = \dots = 0; \\ b_1 &= \frac{1}{R_a T_a}; \quad \hat{b}_1 = \hat{b}_1; \\ \hat{a}'_1 &= \lambda + a_1 = \lambda - \frac{1}{T_a}; \\ \beta_1 &= \beta; \quad \gamma_1 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

З урахуванням (10), структурну схему спостерігача (рис. 3, а) представимо у вигляді рис. 9, а:

$$\left. \begin{aligned} p\hat{y} &= u + a'_1 y - \hat{y}\lambda; \\ \tilde{y} &= y - \hat{y}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Помножимо друге рівняння на λ та підставимо $\hat{y}\lambda = \lambda y - \lambda\tilde{y}$ в перше рівняння (11):

$$p\hat{y} = u + a'_1 y - \lambda y + \lambda\tilde{y} = u + a_1 y + \lambda y - \lambda y + \lambda\tilde{y} = u + a_1 y + \lambda\tilde{y}. \quad (12)$$

З урахуванням (12), отримаємо кінцеве структурне представлення на рис. 9, б:

Структурна схема адаптивної САК швидкою зі спостерігаючим пристроєм ідентифікації опору якірного кола R_a у відповідності до рис 9, б представлена на рис. 10.

Оцінка $\hat{b}_1$ параметру $\frac{1}{R_a T_a}$ використовується для налагодження ПІ-регулятора струму. Виконаємо стандартне налагодження контуру регулювання струму на модульний (технічний) оптимум:

$$W_{pc}(p) \cdot \frac{K_m}{T_m p + 1} \cdot \frac{1/R_a}{T_a p + 1} \cdot K_c = \frac{1}{2T_m p (T_m p + 1)},$$

звідки регулятор струму визначатиметься, як:

$$W_{pc}(p) = \frac{R_a(T_a p + 1)}{2T_{m\pi}K_{m\pi}K_c p} = \underbrace{\frac{R_a T_a}{2T_{m\pi}K_{m\pi}K_c}}_{\text{П-частина}} + \underbrace{\frac{R_a}{2T_{m\pi}K_{m\pi}K_c} \cdot \frac{1}{p}}_{\text{І-частина}}$$

Розділимо $W_{pc}(p)$ на два співмножники:

$$W_{pc}(p) = R_a W'_{pc}(p) = R_a \frac{(T_a p + 1)}{2T_{m\pi}K_{m\pi}K_c p} = R_a \left(\underbrace{\frac{T_a}{2T_{m\pi}K_{m\pi}K_c}}_{\text{П-частина}} + \underbrace{\frac{1}{2T_{m\pi}K_{m\pi}K_c} \cdot \frac{1}{p}}_{\text{І-частина}} \right), (13)$$

де $R_a = \hat{R}_a$ – оцінка опору якоря двигуна (змінна частина регулятора).

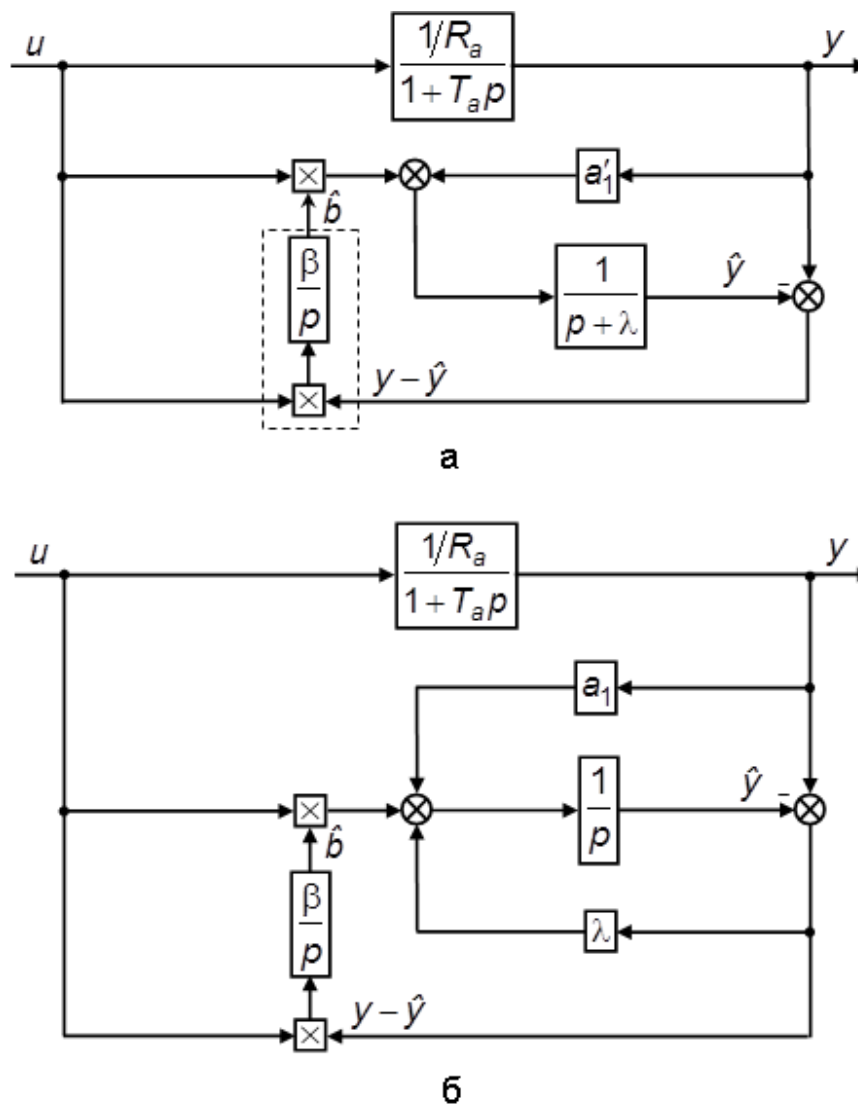
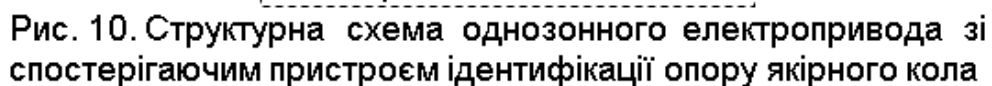


Рис. 9. Структурна схема адаптивного спостерігача об'єкту 1-го порядку відповідно до (8)



Отже при наперед невідомому законі зміни опору якоря двигуна адаптивна САК матиме практично постійні динамічні характеристики за рахунок відповідної зміни передатного коефіцієнта $\hat{R}_a$ регулятора струму.

Вихідні дані, режим роботи та розрахунок основних параметрів електромеханічної системи за винятком регуляторів і коефіцієнтів налагодження (λ та β) такий самий як і в прикладі з адаптивною до зміни моменту інерції САК (див. п. 5).

Коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора струму розраховується за виразом: $K_{pc}^{(n)} = \frac{T_a}{2T_m K_m K_c}$.

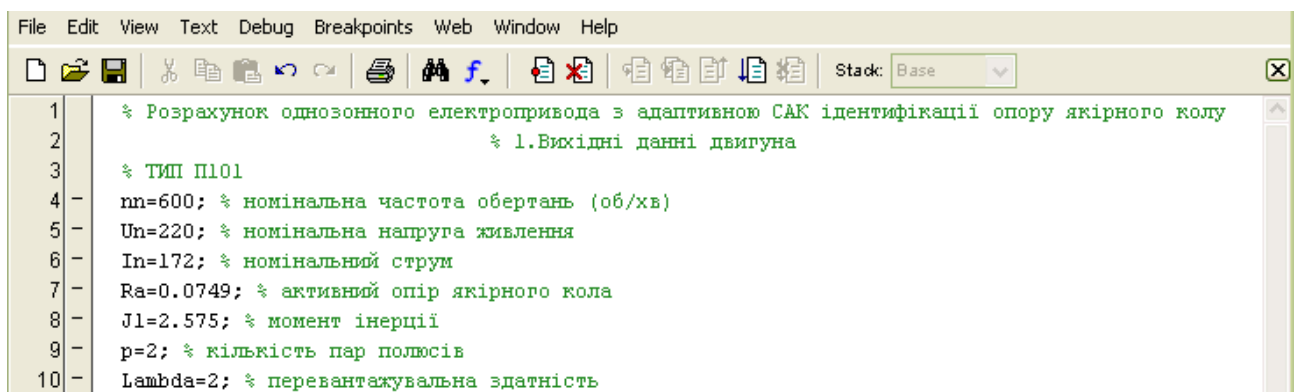
Коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму розраховується: $K_{pc}^{(i)} = \frac{1}{2T_m K_m K_c}$.

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості: $K_{pw} = \frac{K_c J_1}{4T_m K_w K\Phi}$.

Значення невідомих параметрів налагодження спостерігаючого пристрою: $\lambda = 1000$ та $\beta = 50$.

Час обчислення перехідного процесу – $t_{max} = 1,5$ с. Крок обчислень диференційних рівнянь – $t_d = 0,0001$ 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. 11 наведений приклад розрахунку параметрів розглянутої електромеханічної системи у вигляді m-файлу в пакеті **MatLab**. При складанні моделі електромеханічної системи необхідно передбачити обмеження оцінки опору якорного кола. Така необхідність викликана наявністю операції ділення. В початковій момент обчислення можливе появлення надто неточної оцінки опору (оцінений опір надто великий). Рекомендовано обмежувати оцінку опору в межах від 0 до $10 \cdot R_a$. Програма моделювання електромеханічної системи в пакеті бібліотек **Simulink** представлена на рис. 12. Графіки перехідних процесів в однозонному електроприводі постійного струму у заданих режимах роботи при наявності адаптації до зміни опору якорного кола представлені на рис. 13. Крива зміни оцінки параметру $\frac{K\Phi}{j}$ представлена на рис. 14. Порівнюючи рис. 14 із рис. 13 можна відмітити, що швидкодія спостерігаючого пристрою вища швидкодії контуру струму системи.



```

1  % Розрахунок однозонного електропривода з адаптивною САК ідентифікації опору якорного кола
2                                     % 1. Вихідні дані двигуна
3
4  % ТИП П101
5  nm=600; % номінальна частота обертань (об/хв)
6  Un=220; % номінальна напруга живлення
7  In=172; % номінальний струм
8  Ra=0.0749; % активний опір якорного кола
9  J1=2.575; % момент інерції
10 p=2; % кількість пар полюсів
11 Lambda=2; % перевантажувальна здатність
  
```

Рис. 11. Розрахунки у вигляді m-файлу в пакеті **MatLab**

```

11 -                                     % 2.Розрахунок додаткових параметрів двигуна
12 - wn=pi*nn/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*nn); % індуктивність якірного кола
16 - Ta=La/Ra; % електромагнітна стала часу
17 -                                     % 3.Розрахунок САК
18 - Ub=10; %базова одиниця (В)
19 - Uzs=10; % завдання на швидкість
20 - tl=1; % час початку гальмування
21 - J2=5; % реальний момент інерції електропривода
22 -                                     % 3.1 Тиристорний перетворювач
23 - Ttp=0.005; % "мала" (некомпенсована) стала часу ТП
24 - Ktp=Un/Ub; % коефіцієнт передачі ТП
25 -                                     % 3.2 Розрахунок коефіцієнтів зворотних зв'язків САК
26 - Kc=Ub/(In*Lambda); % Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом
27 - Ks=Ub/wn; % Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю двигуна
28 -                                     % 3.3 Розрахунок коефіцієнтів регуляторів САК
29 - Krcp=Ta/(2*Ttp*Ktp*Kc);% коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора струму
30 - Krci=1/(2*Ttp*Ktp*Kc); % коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму
31 - Kps=Kc*Jl/(4*Ks*KF*Ttp); % коефіцієнт підсилення регулятора швидкості

```

Рис. 11. Розрахунки у вигляді m-файлу в пакеті **MatLab** (продовження)

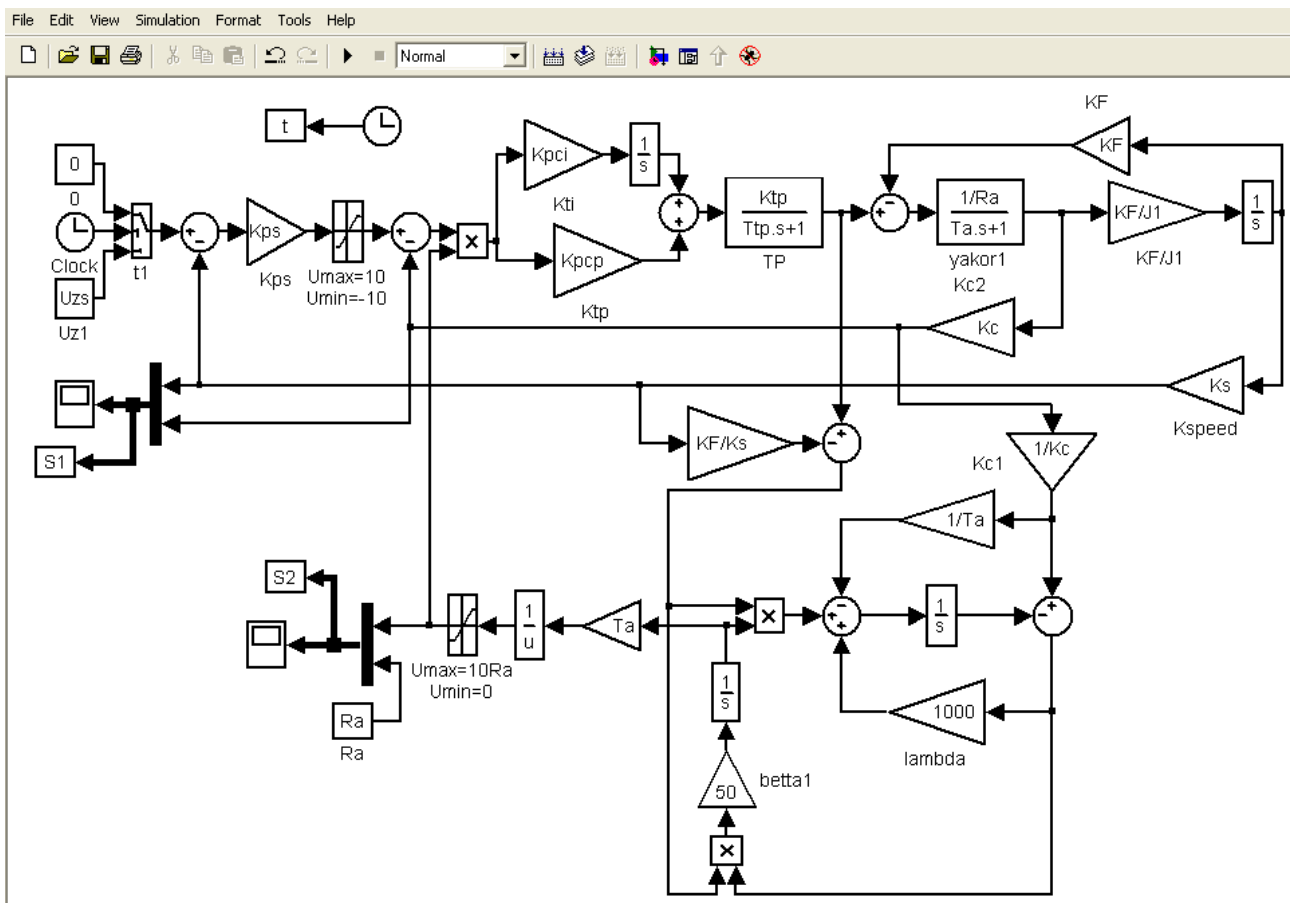


Рис. 12. Модель однозонного електропривода з адаптивною до зміни опору якорного кола САК швидкістю в пакеті **Simulink**

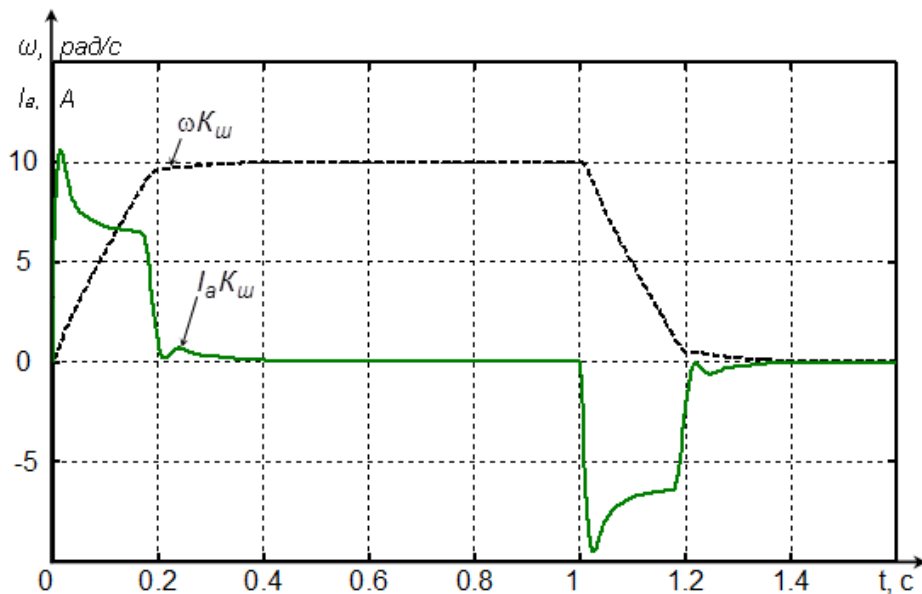


Рис. 13. Графіки перехідних процесів в однозонному електроприводі з адаптивною до зміни опору якорного кола САК

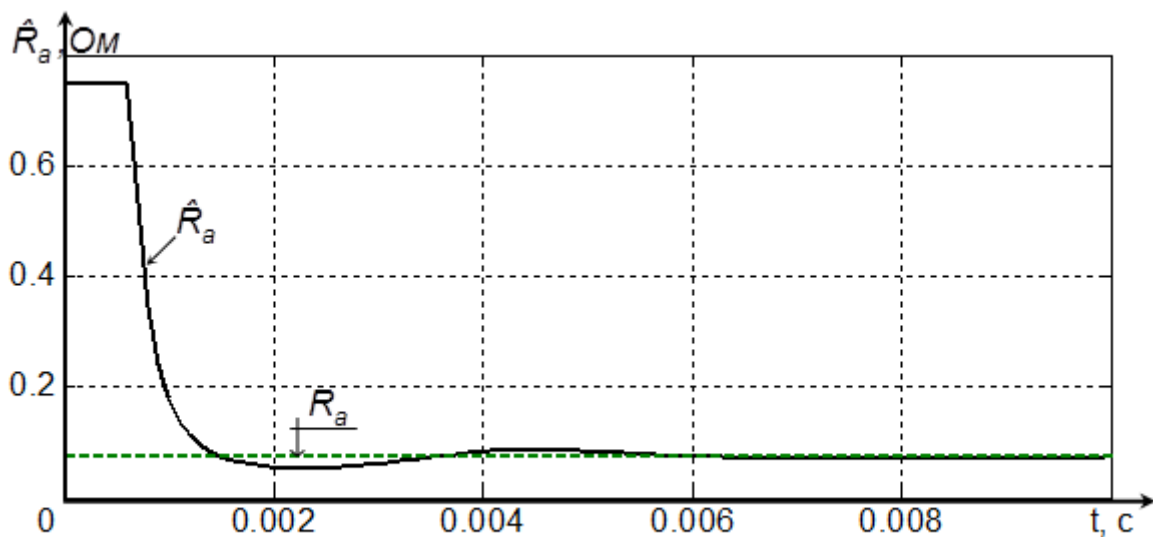


Рис. 14. Оцінка опору якорного кола

Використовуючи принципи побудови адаптивної САК до зміни моменту інерції та опору якорного кола можна побудувати систему керування, що забезпечить одночасну адаптацію до зміни як моменту інерції, так і опору. На рис. 15 представлена структурна схема адаптивної до зміни моменту інерції та опору якорного кола САК в математичному пакеті **MatLab** за допомогою бібліотек **Simulink**.

Коефіцієнти підсилення регулятора струму визначається у відповідності до розрахунків параметрів адаптивної до зміни опору якорного кола САК (п. 6, 7). П-регулятор швидкості визначається аналогічно з регулятором швидкості в адаптивній до зміни моменту інерції САК (п. 4, 5).

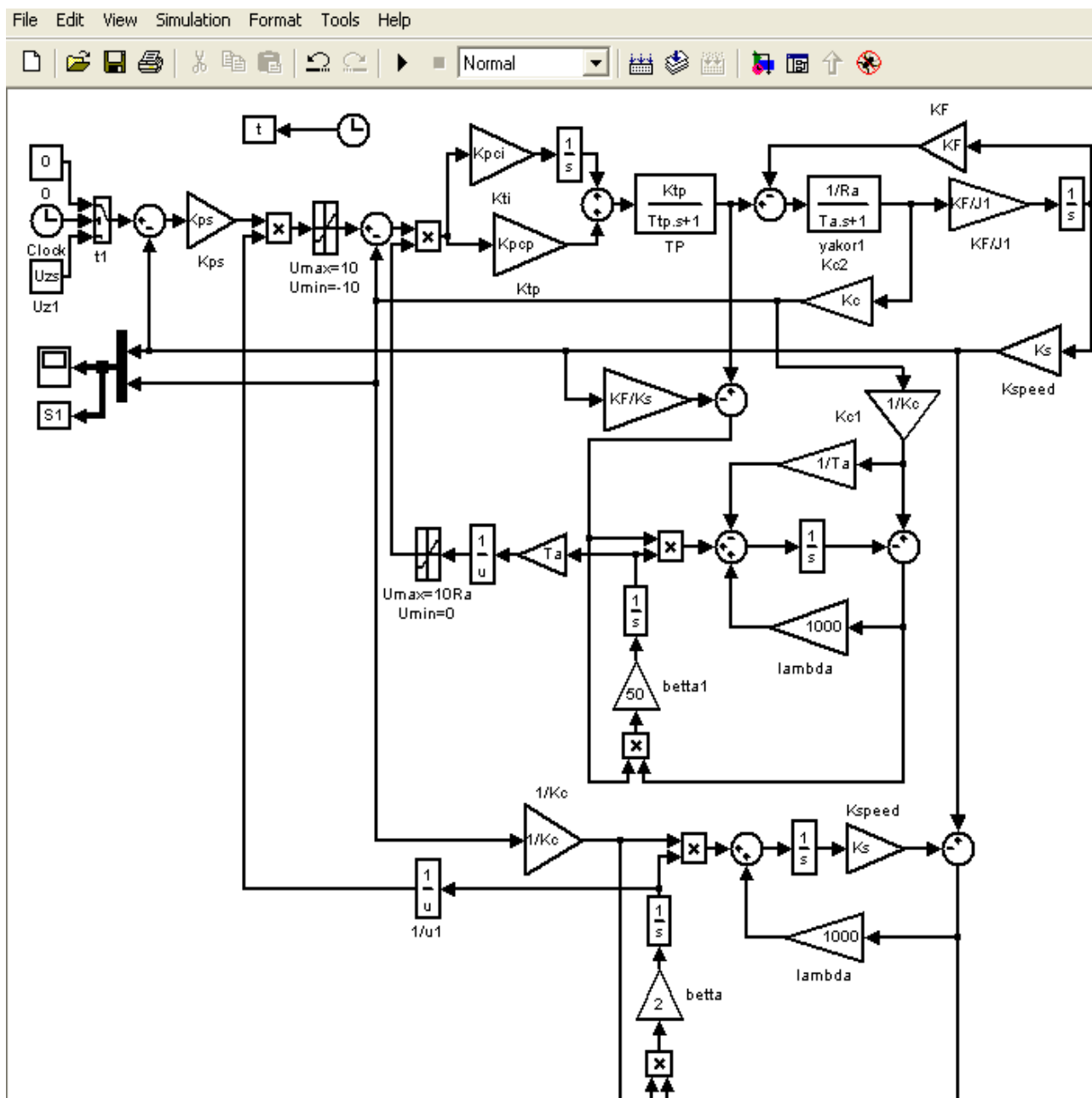


Рис. 15. Модель однофазного електропривода з адаптивною до зміни моменту інерції та опору якорного кола САК швидкістю в пакеті **Simulink**

8. Глосарій

Гіпотеза квазістаціонарності – гіпотеза, яка передбачає, що час затухання перехідних процесів за кожною із змінних стану значно менший, ніж інтервал квазістаціонарності. За таких умов процеси в об'єкті керування поділяються на «швидкі» (змінювання змінних стану) і «повільні» (змінювання параметрів). Параметри об'єкту змінюються, але вважаються сталими тільки протягом інтервалу квазістаціонарності.

Нестационарні параметри системи – параметри, що змінюються під впливом зовнішніх збурень (зміна моменту інерції, підвищення температури

зовнішнього середовища тощо) або залежать від режиму роботи (нагрівання обмоток), умов експлуатації системи тощо.

Адаптивна САК – система, що здатна в процесі виконання основної задачі керування за рахунок змінювання параметрів і структури регулятора поповнювати нестачу інформації про об'єкт керування і, впливаючи на його зовнішні збурення, поліпшувати якість свого функціонування.

Ідентифікація параметрів – визначення параметрів об'єкту керування шляхом використання алгоритмів оцінки.

Спостерігаючий пристрій ідентифікації – пристрій, що забезпечує знаходження оцінки параметрів системи за вимірюваними векторами стану.

9. Питання для самоперевірки

1. Які чинники призводять до суттєвого збільшення динамічних похибок в САК?
2. За рахунок чого можна зменшити похибки регулювання в САК?
3. На вирішення яких задач направлене адаптивне керування?
4. У яких випадках використовуються прийоми адаптації?
5. Які збурюючі фактори можуть впливати на динаміку електромеханічних систем?
6. В якому вигляді може бути отримана інформація про стан системи?
7. Яким чином можна отримати інформацію про стан системи?
8. Як можна виміряти відхилення фази досліджуваної системи від фази моделі на будь-якій частоті?
9. Який недолік є притаманним для способів визначення імпульсних перехідних функцій?
10. Призначення спостерігаючих пристроїв?
11. Які спостерігаючі пристрої можна називати «адаптивними»?
12. Наведіть приклади адаптивних САК.

10. Теми рефератів

1. Уявлення про адаптивні системи керування електроприводами.
2. Самонастроювальні системи керування.
3. Методи пошуку в системах екстремального керування.
4. Ідентифікація об'єктів керування.
5. Принципи побудови без пошукових адаптивних систем.
6. Адаптивні системи з еталонною моделлю.

II. ЛАБОРАТОРНИЙ МОДУЛЬ

Задача – оволодіти навичками:

- складання структурних представлень адаптивних до зміни моменту інерції та опору якірного кола САК швидкістю однозонного електропривода;
- розрахунку параметрів двоконтурного однозонного електропривода з адаптивною до зміни моменту інерції та опору якірного кола САК швидкістю;
- моделювання двоконтурного однозонного електропривода з адаптивним спостерігаючим пристроєм ідентифікації параметрів САК швидкістю із підпорядкованим регулювання в математичному пакеті MatLab;
- оптимізації систем підпорядкованого керування швидкістю в електроприводі постійного струму з адаптивним спостерігаючим пристроєм ідентифікації моменту інерції та опору якірного кола;
- дослідження електропривода з пружним зв'язком та спостерігачем моменту навантаження із адаптивною до зміни моменту інерції та опору якірного кола двигуна САК швидкістю.

Завдання на моделювання

1. За допомогою бібліотек **Simulink** математичного пакету **MatLab** та m-файлу розрахунку параметрів системи виконати моделювання однозонного електропривода постійного струму із адаптивною до зміни моменту інерції САК швидкістю (параметри двигуна див. Додаток А, табл. 1). Дослідження виконати при різних значеннях моменту інерції (Додаток Б, табл. 1). За результатами досліджень заповнити таблицю 1 (Додаток Б).

2. За допомогою бібліотек **Simulink** математичного пакету **MatLab** та m-файлу розрахунку параметрів системи виконати моделювання однозонного електропривода постійного струму із адаптивною до зміни опору якірного кола двигуна САК швидкістю (параметри двигуна див. Додаток А, табл. 1). Дослідження виконати при різних значеннях опору якірного кола двигуна (Додаток Б, табл. 2). За результатами досліджень заповнити таблицю 2 (Додаток Б).

3. За допомогою бібліотек **Simulink** математичного пакету **MatLab** та m-файлу розрахунку параметрів системи виконати моделювання однозонного електропривода постійного струму із адаптивною до зміни моменту інерції та опору якірного кола двигуна САК швидкістю (параметри двигуна див. Додаток А, табл. 1). Дослідження виконати при різних значеннях моменту інерції та опору якірного кола двигуна (Додаток Б, табл. 3). За результатами досліджень заповнити таблицю 3 (Додаток Б).

4. За допомогою бібліотек **Simulink** математичного пакету **MatLab** та m-файлу розрахунку параметрів системи виконати моделювання однозонного електропривода постійного струму з пружністю в механічній передачі при наявності адаптивної до зміни опору якірного кола двигуна САК швидкістю з урахуванням корекції системи за різницею швидкостей двигуна та виконавчого механізму і компенсації момента навантаження за допомогою спостерігача повного порядку (параметри двигуна див. Додаток А, табл. 1).

Дослідження виконати у відповідності до табл. 4 (Додаток Б). За результатами досліджень заповнити таблицю 4 (Додаток Б).

5. Проаналізувати отримані результати та зробити висновок щодо взаємозалежності основних параметрів електромеханічної системи, що характеризують та впливають на динаміку спостерігачів (коефіцієнти налагодження λ та β , модуль дійсного кореню характеристичного рівняння, співвідношення моментів інерції, бажане співвідношення моментів інерції, частота незатухаючих коливань).

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

- М-файл та програма в пакеті бібліотек Simulink однозонного електропривода з адаптивною до зміни моменту інерції САК швидкістю.
- Заповнена таблиця 1 за результатами виконаних досліджень (Додаток Б).
- М-файл та програма в пакеті бібліотек Simulink однозонного електропривода з адаптивною до зміни опору якорного кола двигуна САК швидкістю.
- Заповнена таблиця 2 за результатами виконаних досліджень (Додаток Б).
- М-файл та програма в пакеті бібліотек Simulink однозонного електропривода з адаптивною до зміни моменту інерції та опору якорного кола двигуна САК швидкістю.
- Заповнена таблиця 3 за результатами виконаних досліджень (Додаток Б).
- М-файл та програма в пакеті бібліотек Simulink однозонного електропривода постійного струму з пружністю в механічній передачі при наявності адаптивної до зміни опору якорного кола двигуна САК швидкістю з урахуванням корекції системи за різницею швидкостей двигуна та виконавчого механізму і компенсації моменту навантаження за допомогою спостерігача повного порядку.
- Заповнена таблиця 4 за результатами виконаних досліджень (Додаток Б).
- Висновки щодо завдання 5.

Додаток А. Параметри двигунів постійного струму

Таблиця 1

Параметри двигунів постійного струму

№*	Тип	P _н , кВт	n _н , об/мин	U _н ,В	I _н , А	R _а , Ом	J _{дв} , кг·м ²
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

№	$J_{ел.пр.}^*$, кг·м ²	t_p^* , с	$I_{двmax}^*$, А	$\hat{J}_{ел.пр.max}^*$, %
1	$J_{дв}$			
2	$2,0 \cdot J_{дв}$			
3	$4,0 \cdot J_{дв}$			
4	$8,0 \cdot J_{дв}$			

*Примітка:

1. $J_{ел.пр.}$ – реальний (заданий) момент інерції електропривода.
2. t_p – час розгону до номінальної швидкості (час першого досягнення заданої швидкості).
3. $I_{двmax}$ – максимальний струм двигуна.
4. $\hat{J}_{ел.пр.max}$ – максимальне значення оцінки моменту інерції електропривода (визначити у відсотках відносно заданого значення).
5. Прийняти регулятор швидкості пропорційним, регулятор струму – пропорційно-інтегральним.

Таблиця 2

Результати досліджень

№	$R_{я}^*$, Ом	t_p , с	$I_{двmax}$, А	t_R^* , с
1	$0,5 \cdot R_a$			
2	R_a			
3	$2,0 \cdot R_a$			
4	$4,0 \cdot R_a$			
5	$8,0 \cdot R_a$			

*Примітка:

1. $R_{я}$ – реальний (заданий) опір якорного кола двигуна.
2. t_R – час першого досягнення заданого опору якорного кола.

Таблиця 3

Результати досліджень

№	$J_{ел.пр.}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$R_{я}, \text{Ом}$	$t_p, \text{с}$	$I_{двmax}^*, \text{А}$	$\hat{J}_{ел.пр.max}, \%$	$t_R, \text{с}$
1	$J_{дв}$	R_a				
2	$2,0 \cdot J_{дв}$	$2,0 \cdot R_a$				
3	$2,0 \cdot J_{дв}$	$0,5 \cdot R_a$				
4	$4,0 \cdot J_{дв}$	$2,0 \cdot R_a$				
5	$4,0 \cdot J_{дв}$	$0,5 \cdot R_a$				

Таблиця 2

Результати досліджень

Режим* роботи	$\omega_0, \text{с}^{-1}$	$\Omega_0, \text{с}^{-1}$	γ_0	Форма	$\omega_{1max}, \text{рад/с}$	$\omega_{2max}, \text{рад/с}$	$M_{пmax}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$t_p^*, \text{с}$
Пуск електропривода до номінальної швидкості під номінальним реактивним навантаженням	$\frac{1}{4T_{mn}}$	20	5,8	бін*				
				Бат**				
			3,0	бін*				
				Бат**				
		40	5,8	бін*				
				Бат**				
			3,0	бін*				
				Бат**				
	$\frac{3}{4T_{mn}}$	20	5,8	бін*				
				Бат**				
			3,0	бін*				
				Бат**				
		40	5,8	бін*				
				Бат**				
			3,0	бін*				
				Бат**				

*Примітки:

Для всіх режимів роботи прийняти $\gamma = 1,2$.

бін* – біноміальна форма розподілу характеристичного рівняння.

Бат** – стандартний розподіл за формою Баттерворта.

t_p – час розгону до номінальної швидкості (час першого досягання заданої швидкості).

Момент інерції та опір якорного кола двигуна визначаються відповідно до таблиці 1 (додаток А).

Перелік літературних джерел

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