

УДК 622.232.72.063.43:681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-6>

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНА

Бубликов Андрій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3015-6754
Scopus Author ID: 55998596600

Яцюк Дмитро Степанович,

аспірант групи 151А-21
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0007-3439-9282

Метою є підвищення ефективності роботи видобувного комбайна через удосконалення алгоритму автоматичного керування швидкістю переміщення виконавчого органу.

Основним критерієм якості процесу керування є забезпечення мінімального часу перехідного процесу на виході системи керування за умови відсутності перевищення перерегулюванням рівня 10%.

Методи. Для дослідження систем автоматичного керування швидкістю переміщення виконавчого органу видобувного комбайна використані методи теорії автоматичного керування, а також системний аналіз. Дослідження проводилося на основі обчислювальних експериментів з використанням комп'ютеризованих методів синтезу системи. Оцінювання ефективності процесу автоматичного керування проведене з використанням методів математичної статистики.

Результати. Встановлено, що для кожного функціонального режиму переміщення виконавчого органу комбайна в закономірностях зміни критеріїв ефективності протікання перехідного процесу в разі зміни параметрів регулятора, з урахуванням обмежень на критерії, присутні мінімальні екстремуми, що відповідають оптимальним настройкам регулятора. При цьому для кожного функціонального режиму переміщення виконавчого органу комбайна ці екстремуми мають місце для різних сполучень значень параметрів регулятора швидкості переміщення виконавчого органу.

Практичне значення. Виявлені закономірності щодо залежності критеріїв якості роботи системи автоматичного керування від параметрів регулятора швидкості руху виконавчого органу видобувного комбайна дадуть змогу врахувати змінність властивостей комбайна як об'єкта автоматичного керування в алгоритмі керування сучасних регуляторів, а отже, збільшити продуктивність роботи комбайна та зменшити зольність вугілля завдяки більш точному відпрацюванню гіпсометрії вугільного пласта.

Ключові слова: видобувний комбайн, тонкі вугільні пласти, регулятор швидкості переміщення органу.

Bublikov Andrii, Yatsiuk Dmytro. Study and synthesis of a system for automatic speed control of movement of the executive body of a mining machine

The goal is to increase the efficiency of the mining combine by improving the algorithm of automatic control of the speed of movement of the executive body.

The main criterion for the quality of the control process is to ensure the minimum time of the transient process at the output of the control system, provided that the level is not exceeded by over-regulation of 10%.

Methods. The methods of the theory of automatic control, as well as system analysis, were used to study the systems of automatic control of the speed of movement of the executive body of the mining combine. The research was conducted on the basis of computational experiments using computerized methods of system synthesis. Evaluation of the effectiveness of the automatic control process was carried out using the methods of mathematical statistics.

The results. It was established that for each functional mode of movement of the combine's executive body in the regularities of changing of the criteria of the efficiency of the transition process, when the parameters of the regulator are changed, taking into account the restrictions on the criteria, the minimal extremes are presented, that correspond to the optimal settings of the regulator. At the same time, for each functional mode of movement of the executive body of the combine, these extremes occur for different combinations of values of the parameters of the speed controller of the movement of the executive body.

Practical meaning. The revealed regularities regarding the dependence of the quality criteria of the automatic control system on the parameters of the speed regulator of the executive body of the mining combine will allow

to take into account the variability of the properties of the combine as an object of automatic control in the control algorithm of modern regulators, and due to this increase the productivity of the combine and reduce the ash content of coal due to more accurate working out of coal seam hypsometry.

Key words: *mining combine, thin coal seams, executive body movement speed regulator.*

Вступ. Технологічний процес видобутку вугілля в забої за умови підземного видобутку вугілля шахтним підприємством, що розглядається у кваліфікаційній роботі, є складовою частиною гірничої галузі України.

Більшість державних вугледобувних підприємств, частка яких у видобутку вугілля оцінюється на рівні до 30%, є шахтами з незначною потужністю вугільних пластів і складними гірничо-геологічними умовами.

Унаслідок військових дій на Донбасі з 2013 року відбулося різке падіння видобутку вугілля – порівняно з періодом до 2013 року видобуток вугілля всіх груп, крім антрацитової, впав більш ніж на 50%, а видобуток антрацитової групи взагалі став неможливим [1]. Але, незважаючи на це, в Україні частка електроенергії, що виробляється за допомогою вугілля, усе ще є досить значною та складає близько третини від усієї виробленої електроенергії. Крім того, слід враховувати суттєвий потенціал вугільного ресурсу нашої країни – загальні ресурси вугілля в Україні із заляганням до 1500 м, за різними оцінками, становлять від 100 до 117,5 млрд тонн, близько половини з яких є підтвердженими (45–56 млрд тонн) [2].

Таким чином, з оглядом на складну економічну ситуацію України, через що поки неможливо кардинальним чином модернізувати енергосистему країни, видобуток вугілля протягом найближчих десятиріч є питанням енергетичної безпеки нашої держави, оскільки вугілля є стратегічно важливим енергоресурсом для паливно-енергетичної галузі України [2, 3].

Видобувний комбайн є складовою частиною очисного механізованого комплексу та виконує такі функції:

- руйнування прошарку вугілля за рахунок обертального руху виконавчих органів, поступального руху корпусу комбайна вздовж забою та поступального руху виконавчих органів за гіпсометрією пласта;

- часткове навантаження зруйнованого вугілля на забійний конвеєр за рахунок обертального руху виконавчих органів.

Рух виконавчих органів і корпусу комбайна забезпечують такі підсистеми [4]:

- корпусна підсистема, яка призначена для об'єднання окремих корпусних вузлів у конструктивно цілісний технічний об'єкт;

- підсистема привода виконавчого органу, яка призначена для забезпечення обертального руху цього органу з відповідними рушійними моментами;

- підсистема переміщення, за допомогою якої рухається корпусна підсистема комбайна з необхідними значеннями швидкості та тягових зусиль;

- підсистема підвіски та переміщення виконавчого органу (ВО), яка призначена для поступальних переміщень виконавчого органу відносно основних жорстко з'єднаних вузлів корпусної підсистеми з відповідними швидкостями та зусиллями (та підтримки заданого положення виконавчого органу відносно вказаних вузлів).

Аналіз видобувного комбайна як об'єкта автоматизації з погляду поставленого завдання показав, що його структура є одномірною з одним керуючим входом (на пілотний електрогідророзподільувач) і одним керованим виходом (швидкість переміщення штока гідродомкрата).

На керуючий вхід з урахуванням того, що пілотний електрогідророзподільувач має пропорційний багатопозиційний поляризований електромагніт, подається електричний сигнал, що змінюється в певному діапазоні (якщо розподільувач не має власного контролера), або керуюча команда по мережі (якщо можливе підключення до контролера розподільувача через канал передачі даних).

Керованою величиною є швидкість переміщення виконавчого органу (ВО) видобувного комбайна.

Збуренням № 1 є перепади тиску в гідросистемі комбайна через зменшення продуктивності насосу внаслідок просадки напруги в електромережі або через підключення до гідросистеми інших споживачів.

Збуренням № 2 є так звана просадка гідропривода за умови руйнування гірничого масиву та створення через це опору руху ВО, а отже, руху штока гідродомкрата. Створення значних опорів переміщенню штока гідродомкрата в процесі руйнування гірничого масиву викликає явище «просадки» гідропривода, коли за аналогічного тиску робочої рідини на поршень гідродомкрата його шток рухається з меншою швидкістю.

Структурну схему системи автоматичного керування швидкістю переміщення

виконавчого органу видобувного комбайна наведено на рис. 1.

Як видно зі структурної схеми системи автоматичного керування на рис. 1, у разі автоматичного керування швидкістю переміщенням органу використовується принцип керування за від'ємним зворотним зв'язком на основі подачі на вхід регулятора відхилення фактичного значення керованої величини від уставки.

Виконавчим пристроєм є пропорційний багатопозиційний поляризований електромагніт пілотного електрогіддорозподільвача.

Об'єктом керування є гідроциліндр гідродомкрата підсистеми переміщення виконавчого органу видобувного комбайна по висоті.

Керуючим впливом є електричний сигнал на електромагніт, що змінюється в певному діапазоні (якщо розподільвач не має власного контролера), або керуюча команда по мережі (якщо можливе підключення до контролера розподільвача через канал передачі даних). Фактичною керованою величиною є швидкість переміщення штоку гідроциліндра, а результатом її вимірювання може бути електричний сигнал, що змінюється в певному діапазоні (якщо датчик не має власного контролера), або відносна величина, що характеризує фактичну швидкість та змінюється в більш зручному діапазоні, наприклад від 0 до 100% (якщо датчик має власний контролер і результат вимірювання передається мережею з попередньою обробкою).

Для досягнення основної мети – забезпечення мінімального часу перехідного процесу на виході системи автоматичного керування без перевищення перерегулюванням рівня 10%, з урахуванням дії збурюючих впливів, потрібно виконати такі завдання дослідження:

– для проведення обчислювальних експериментів створити імітаційну модель системи автоматичного керування швидкістю переміщення виконавчого органу видобувного комбайна;

– обґрунтувати метод синтезу системи автоматичного керування з урахуванням особливостей роботи об'єкта керування та визначених критеріїв якості роботи системи;

– провести дослідження критеріїв якості керування від параметрів регулятора для різних режимів переміщення органу;

– для кожного з обґрунтованих режимів переміщення виконавчого органу на основі встановлених залежностей критеріїв якості роботи системи від параметрів регулятора визначити оптимальні настройки регулятора швидкості переміщення органу;

– провести дослідження ефективності роботи запропонованого комплексного регулятора швидкості переміщення виконавчого органу видобувного комбайна.

Методи. Модель об'єкта керування має за вхідний сигнал керуючий вплив на пілотний електрогіддорозподільвач (команда по каналу передачі даних щодо уставки швидкості переміщення органу в абсолютних одиницях) і за вихідний сигнал – фактичну швидкість переміщення органу. Вона складається з трьох основних частин – імітаційної моделі пілотного електрогіддорозподільвача, імітаційної моделі силового гіддорозподільвача та імітаційної моделі гідроциліндра (рис. 2).

Вихідним сигналом імітаційної моделі пілотного електрогіддорозподільвача є витрати рідини через нього $Q_{п.сп}$ (діапазон зміни – від 0 до 13 л/хв). З урахуванням діапазонів зміни вхідної та вихідної величин для цього елемента моделі його коефіцієнт підсилення дорівнює:

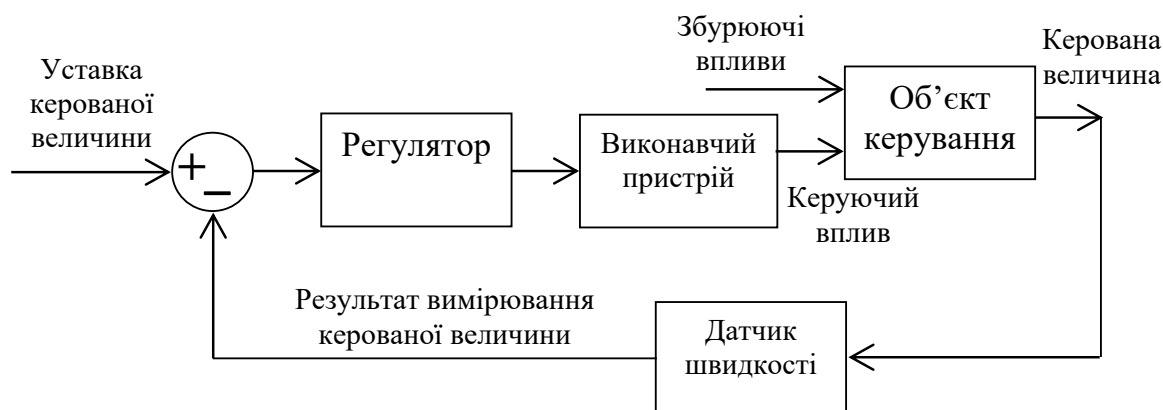


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного керування швидкістю переміщення виконавчого органу видобувного комбайна



Рис. 2. Структурна схема моделі об'єкта управління

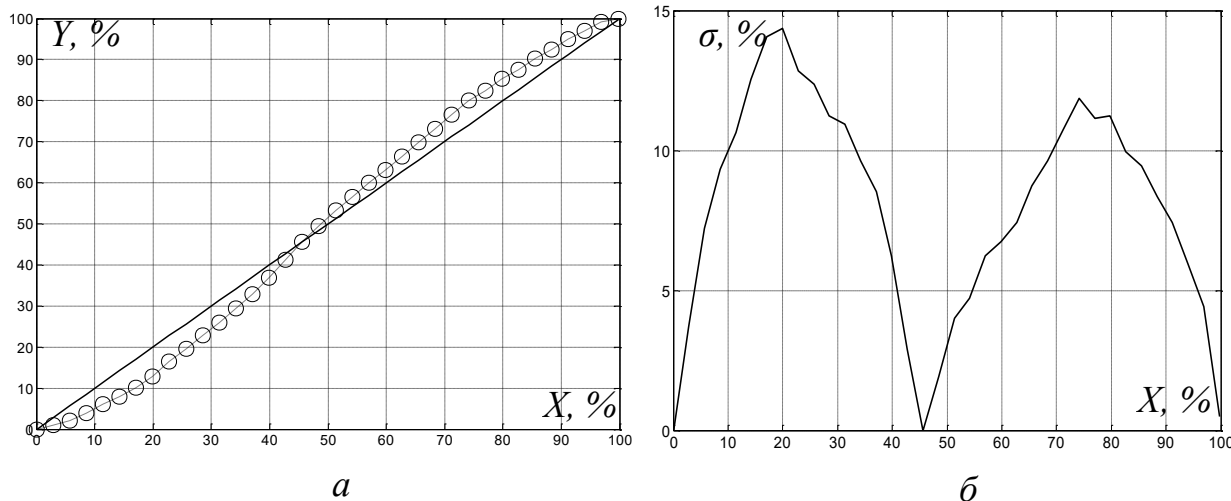


Рис. 3. Результат лінійної апроксимації експериментальної статичної характеристики пілотного електрогідророзподільвача (а) та відносна похибка апроксимації (б)

$$K_{п.сп} = \frac{13}{0,4}, \text{ л·с/хв·м.}$$

Вихідним сигналом імітаційної моделі силового гідророзподільвача є витрати рідини через нього $Q_{с.сп}$ (діапазон зміни – від 0 до 170 л/хв). З урахуванням діапазонів зміни вхідної та вихідної величин для цього елемента моделі його коефіцієнт підсилення дорівнює:

$$K_{с.сп} = \frac{170}{13}.$$

Кількість рідини, що потрапляє в порожнину гідроциліндра в одиницю часу $Q_{зц}$, може бути різною навіть за незмінної витрати рідини через силовий гідророзподільвач $Q_{с.сп}$, оскільки за умови зменшення продуктивності насоса в гідросистемі комбайна через пониженої напругу в електромережі або через підключення до гідросистеми іншого споживача через силовий розподільвач починає проходити менше рідини, навіть коли його поршень не змінював положення. Тобто має місце вплив збурення на об'єкт керування, який враховується через віднімання від витрат рідини на вході гідроциліндра $Q_{зц}$ величини $\Delta Q_{нас}$, що дорівнює величині зменшення витрат рідини на вході гідроциліндра внаслідок зменшення продуктивності насоса (емпірична величина).

Вихідним сигналом імітаційної моделі гідроциліндра є фактична швидкість переміщення його штока $V_{шт}$ (діапазон зміни – від 0 до 0,4 м/с). З урахуванням діапазонів зміни вхідної та вихідної величин для цього елемента моделі його коефіцієнт підсилення дорівнює:

$$K_{зц} = \frac{0,4}{170}, \text{ м·хв/л·с.}$$

Коефіцієнт підсилення гідроциліндра $K_{зц}$ є змінною величиною, оскільки для гідроциліндрів властиве таке явище, як «просадка» – зменшення швидкості переміщення штоку внаслідок збільшення опору переміщенню штока. Тобто опір переміщенню штока внаслідок присутності зовнішнього навантаження є другим збурюючим впливом, що враховується в моделі об'єкта керування через коригувальний коефіцієнт k_F , який є емпіричною величиною.

Далі проведемо ідентифікацію кожного елемента моделі об'єкта керування на основі експериментальних даних.

Аналіз експериментальної статичної характеристики пілотного електрогідророзподільвача (круглі маркери на рис. 3, а) показує, що вона є нелінійною [5]. Це підтверджує рис. 3, б, на якому видно, що за апроксимації експериментальної статичної характеристики прямою лінією (суцільна лінія на рис. 3, а) виникають

відносні похибки апроксимації понад 10%, що є неприпустимим.

Тому за допомогою інструмента застосунку Simulink Basic Fitting проведена апроксимація експериментальної статичної характеристики пілотного електрогідророзподілювача ступеневим поліномом третього порядку (рис. 4).

Вид полінома показаний у верхньому вікні на рис. 4 справа. На цьому вікні також можна побачити візуально, що апроксимуюча крива проходить досить близько до експериментальної статичної характеристики. Кількісна оцінка точності апроксимації показана на нижньому рис. 4 справа, з якого видно, що похибка апроксимації у відносних одиницях не перевищує 1,5%. Це підтверджує високу точність апроксимації цієї експериментальної характеристики ступеневим поліномом третього порядку.

Зазначимо, що експериментальна статична характеристика пілотного електрогідророзподілювача дана у відносних одиницях, де за віссю абсцис відносно переміщення якоря електромагніту розподілювача, а за віссю ординат – відносна кількість рідини, що проходить через розподілювач в одиницю часу.

Далі визначимо динамічну модель пілотного електрогідророзподілювача на основі експериментальної кривої розгону [5]. Для цього використаємо спеціальний інструмент програми MATLAB System Identification Tool.

Результат ідентифікації динамічної моделі пілотного електрогідророзподілювача показаний на рис. 5.

З рис. 5 можна зробити висновок, що динамічні властивості пілотного електрогідророзподілювача описуються аперіодичною ланкою з постійною часу 0,155 с. Коефіцієнт підсилення цього елемента системи за результатами ідентифікації становив 0,13 л/хв·%. Він відрізняється від розрахованого вище коефіцієнта підсилення пілотного електрогідророзподілювача, оскільки експериментальна крива розгону отримана для випадку вхідної величини у відносних одиницях відповідно до статичної характеристики елемента (рис. 3).

Далі визначимо динамічну модель силового гідророзподілювача на основі експериментальної кривої розгону також за допомогою спеціального інструмента програми MATLAB System Identification Tool [6].

Результат ідентифікації динамічної моделі силового гідророзподілювача показаний на рис. 6.

З рис. 6 можна зробити висновок, що динамічні властивості силового гідророзподілювача описуються аперіодичною ланкою з постійною часу 0,377 с. Коефіцієнт підсилення цього елемента системи за результатами ідентифікації становив 13,1.

Ідентифікація динамічної моделі гідроциліндра також проводиться на основі

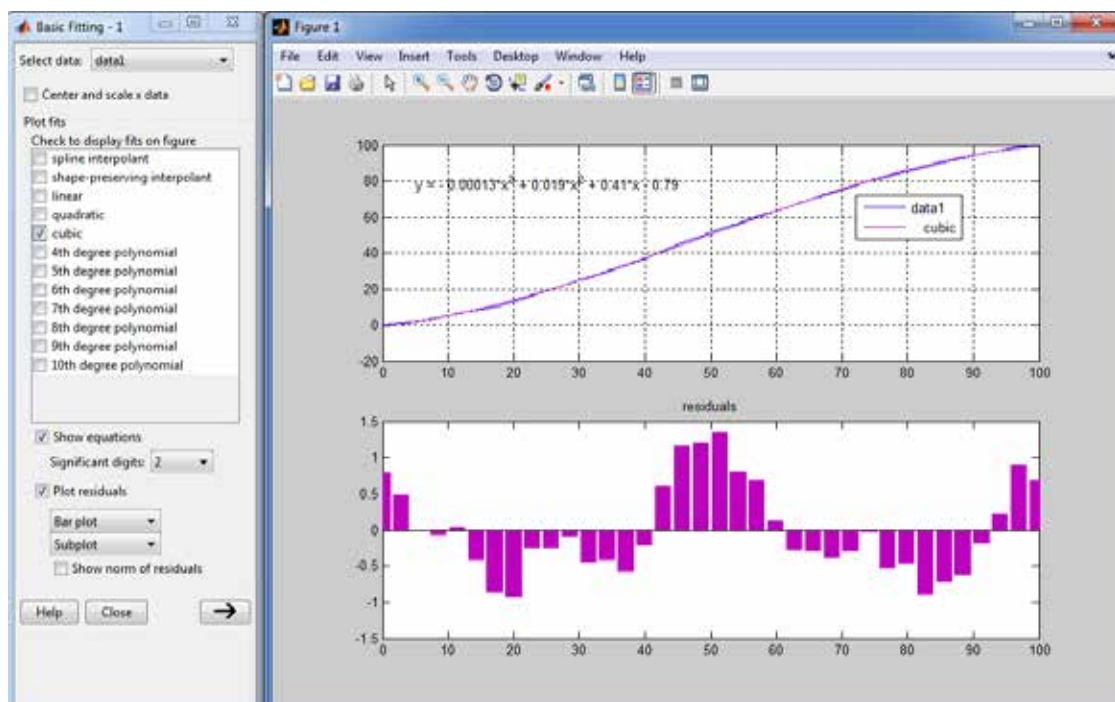


Рис. 4. Результат апроксимації експериментальної статичної характеристики пілотного електрогідророзподілювача ступеневим поліномом третього порядку

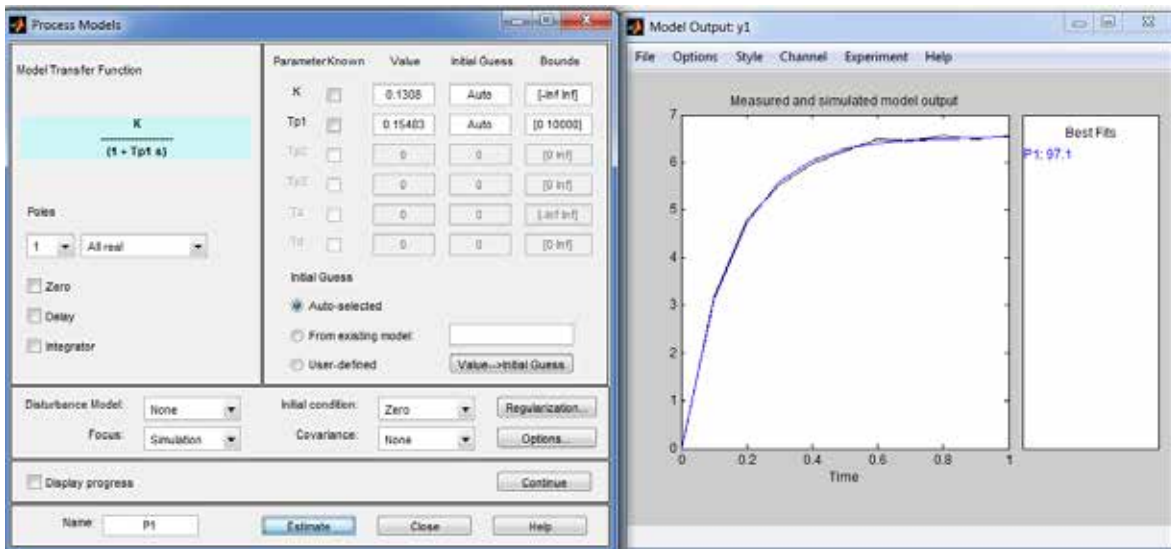


Рис. 5. Результат ідентифікації пілотного електрогідорозподілювача за динамічними властивостями

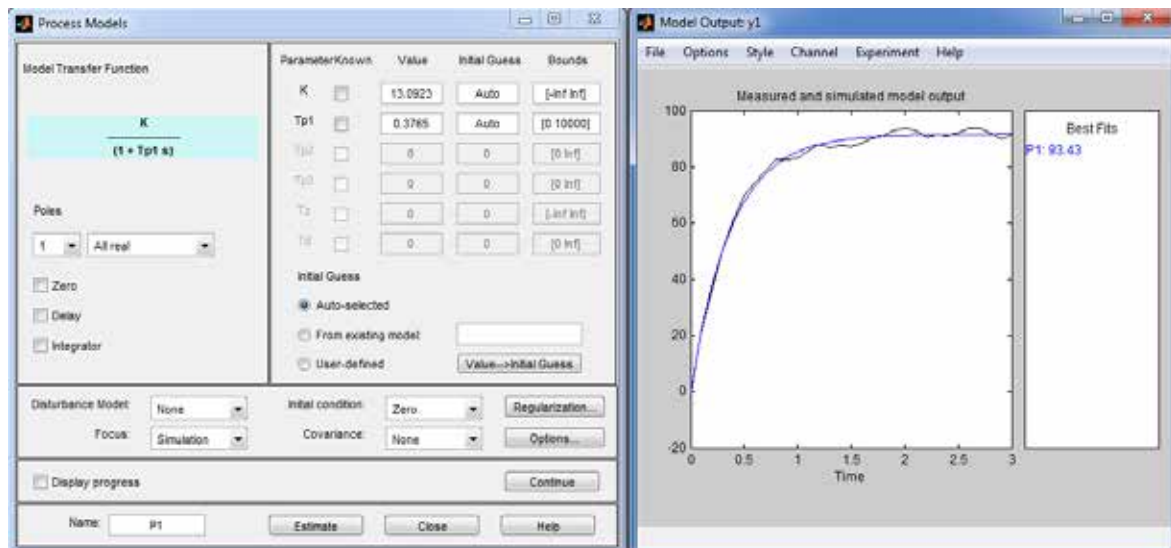


Рис. 6. Результат ідентифікації силового електрогідорозподілювача за динамічними властивостями

експериментальної кривої розгону за допомогою спеціального інструменту програми MATLAB System Identification Tool.

З рис. 7 можна зробити висновок, що динамічні властивості гідроциліндра підсистеми переміщення виконавчого органу видобувного комбайна описуються коливальною ланкою з постійною часу 0,41 с і коефіцієнтом демпфування 0,46. Коефіцієнт підсилення цього елемента системи за результатами ідентифікації становив 0,00234 м·хв/л·с.

На основі результатів ідентифікації елементів моделі об'єкта керування в застосунку Simulink програми MATLAB розроблена його імітаційна модель, що показана на рис. 8.

У моделі об'єкта керування рівняння, що апроксимує експериментальну статичну характеристику, задане за допомогою блока користувальницьких функцій (блок «Статична характеристика пілотного гідорозподілювача» на рис. 8). При цьому, оскільки за всією абсцисою експериментальної статичної характеристики переміщення якоря задається у відносних одиницях, у блоці «Нормування діапазону» на рис. 8 діапазон зміни 0–0,4 м/с перетворюється в діапазон зміни 0–100%.

Імітаційні динамічні моделі пілотного електрогідорозподілювача, силового розподілювача та гідроциліндра введені у блоки на рис. 8 з відповідними назвами.

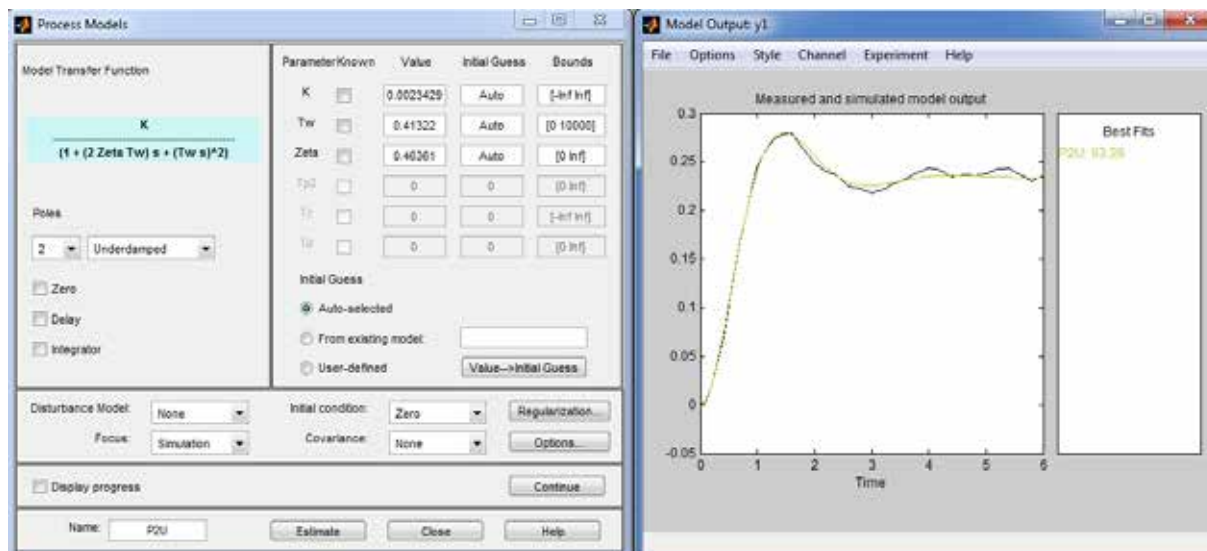


Рис. 7. Результат ідентифікації гідроциліндра підсистеми переміщення ВО комбайна за динамічними властивостями

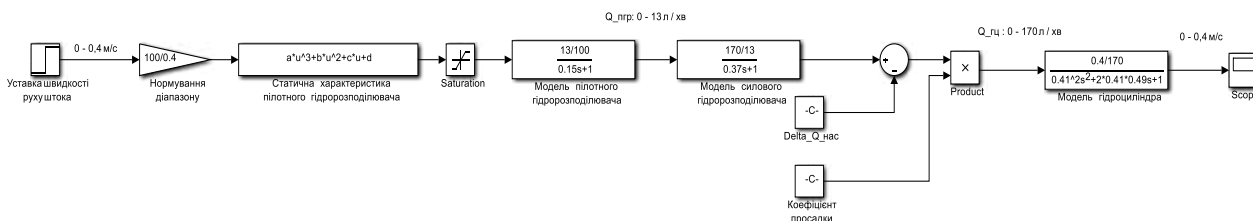


Рис. 8. Структурна схема імітаційної моделі об'єкта управління, що реалізована в застосунку Simulink програми Matlab

Перше збурення (зменшення витрат рідини на вході гідроциліндра через зменшення продуктивності насоса) задане блоком Delta_Q_нас і вводиться у модель через суматор. Друге збурення («просадка» гідроциліндра через опір переміщенню штока) задане блоком «Коефіцієнт просадки» на рис. 8 і вводиться у модель через операцію множення.

Результати. Аналіз структури створеної імітаційної моделі об'єкта керування показав, що можна виділити шість основних режимів переміщення виконавчого органу видобувного комбайна з позиції синтезу системи автоматичного управління:

- рух виконавчого органу без навантаження на шток гідроциліндра та з нормальним тиском у гідросистемі;
- рух виконавчого органу без навантаження на шток гідроциліндра зі зниженим тиском у гідросистемі на 20% (граничне значення);
- рух виконавчого органу з незначною «просадкою» гідроциліндра через навантаження на шток гідроциліндра (на 10%) і з нормальним тиском у гідросистемі;

– рух виконавчого органу з незначною «просадкою» гідроциліндра через навантаження на шток гідроциліндра (на 10%) і зі зниженим тиском у гідросистемі на 20%;

– рух виконавчого органу зі значною «просадкою» гідроциліндра через навантаження на шток гідроциліндра (на 20%) і з нормальним тиском у гідросистемі;

– рух виконавчого органу зі значною «просадкою» гідроциліндра через навантаження на шток гідроциліндра (на 20%) і зі зниженим тиском у гідросистемі на 20%.

Синтез системи автоматичного керування проводитимемо на основі комп'ютеризованих методів із використанням спеціалізованого інструмента PID Tune програми MATLAB. Цей інструмент дає змогу автоматизувати процедуру настройки ПІД-регулятора.

З метою синтезу системи автоматичного управління для кожного обґрунтованого вище режиму переміщення виконавчого органу видобувного комбайна за допомогою застосунку PID Tune визначено залежність критеріїв якості роботи системи від параметрів регулятора.

За результатами аналізу табл. 1 і рис. 9 можна дійти висновку, що для режиму переміщення виконавчого органу видобувного комбайна без опору руху штока гідроциліндра та з нормальним тиском у гідросистемі існує єдина настройка регулятора, за якої спостерігається мінімальний час входу швидкості в діапазон $\pm 1\%$ від уставки (3,8 с) без подальшого виходу швидкості з нього. Це настройка № 7 на рис. 9, за якої, як видно з рис. 9, б та табл. 1, перерегулювання є меншим за 1%. Цій настройці відповідає коефіцієнт інтегральної складової 0,472, а інші параметри регулятора при цьому мають дорівнювати нулю.

Далі аналогічні залежності були визначені для другого режиму переміщення органу комбайна. Результати наведені в табл. 2, а у графічному виді представлені на рис. 10.

За результатами аналізу рис. 10 можна дійти висновку, що для режиму переміщення виконавчого органу видобувного комбайна без опору руху штока гідроциліндра та зі зменшеним на 20% тиском у гідросистемі теж існує єдина настройка регулятора, за якої спостерігається мінімальний час входу швидкості в діапазон $\pm 1\%$ від уставки (4,15 с) без подальшого виходу швидкості з нього.

З рис. 10, б та табл. 2 видно, що саме в разі настройки № 8 регулятора перерегулювання є меншим за 1%. Цій настройці відповідає коефіцієнт інтегральної складової 0,456, а інші параметри регулятора при цьому мають дорівнювати нулю.

Далі аналогічні залежності були визначені для третього режиму переміщення органу комбайна. Результати наведені

Таблиця 1

Результати досліджень залежності критеріїв якості роботи системи автоматичного управління від варіантів настройок ПІ-регулятора для першого режиму переміщення ВО комбайна

Номер настройки регулятора	Коефіцієнт підсилення інтегруючої складової	Коефіцієнт підсилення пропорційної складової	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %	Відносна усталена похибка, %
1	0,127	0	26	0	0
2	0,17	0	18,7	0	0
3	0,23	0	12,3	0	0
4	0,3	0	7,8	0	0
5	0,37	0	5	0	0
6	0,42	0	4,24	0	0
7	0,472	0	3,8	0,98	0
8	0,5	0	5,9	5,5	0
9	0,55	0	8	12	0
10	0,6	0	9,7	23,5	0

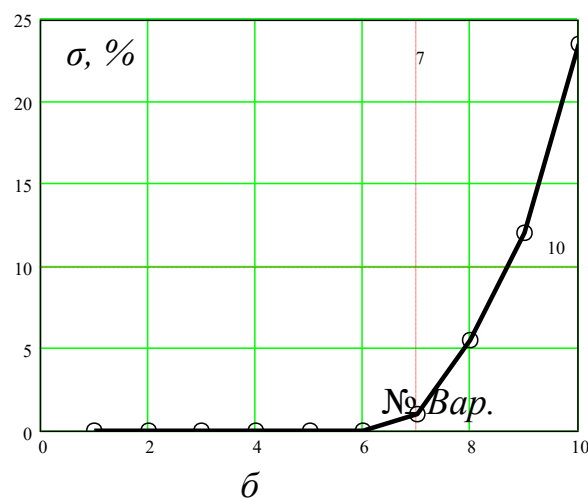
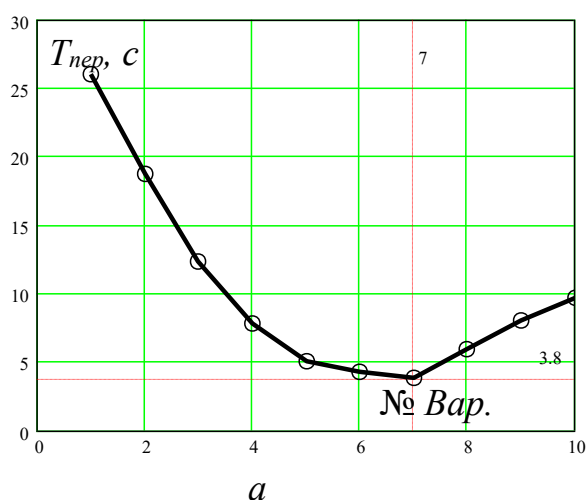


Рис. 9. Залежності від варіантів настройок ПІ-регулятора: а – часу перехідного процесу; б – перерегулювання для першого режиму переміщення ВО комбайна

Результати досліджень залежності критеріїв якості роботи системи автоматичного управління від варіантів настройок ПІ-регулятора для другого режиму переміщення ВО комбайна

Номер настройки регулятора	Коефіцієнт підсилення інтегруючої складової	Коефіцієнт підсилення пропорційної складової	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %	Відносна усталена похибка, %
1	0,15	0	27	0	0
2	0,19	0	20,6	0	0
3	0,23	0	16,4	0	0
4	0,28	0	12,7	0	0
5	0,34	0	9,7	0	0
6	0,39	0	7,6	0	0
7	0,42	0	6,95	0	0
8	0,456	0	4,15	1,0	0
9	0,53	0	5,35	9,5	0
10	0,6	0	7,1	18,1	0

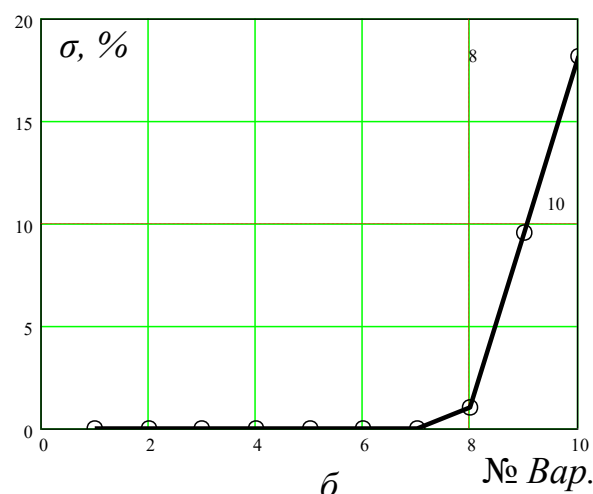
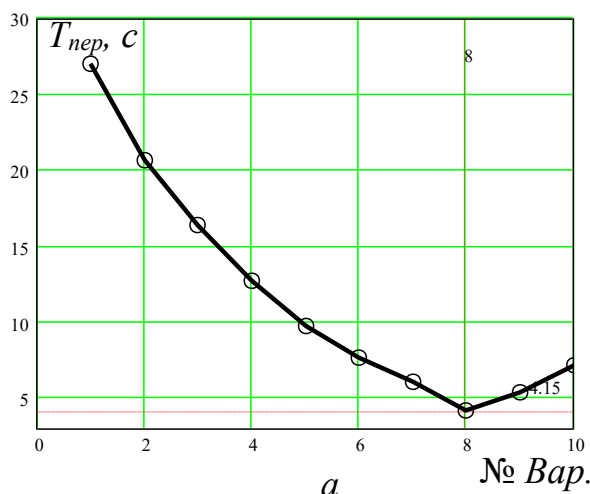


Рис. 10. Залежності від варіантів настройок ПІ-регулятора: а – часу перехідного процесу; б – перерегулювання для другого режиму переміщення ВО комбайна

в табл. 3, а у графічному виді представлені на рис. 11.

За результатами аналізу рис. 11 можна дійти висновку, що для режиму переміщення виконавчого органу видобувного комбайна з незначним опором руху штока гідроциліндра та нормальним тиском у гідросистемі також існує єдина настройка регулятора, за якої спостерігається мінімальний час входу швидкості в діапазон $\pm 1\%$ від уставки (3,96 с) без подальшого виходу швидкості з нього. Це настройка № 8 на рис. 11, за якої, як видно з рис. 11, б та табл. 3, перерегулювання є меншим за 1%. Цій настройці відповідає коефіцієнт інтегральної складової 0,5, а інші параметри регулятора при цьому мають дорівнювати нулю.

Далі аналогічні залежності були визначені для четвертого режиму переміщення органу

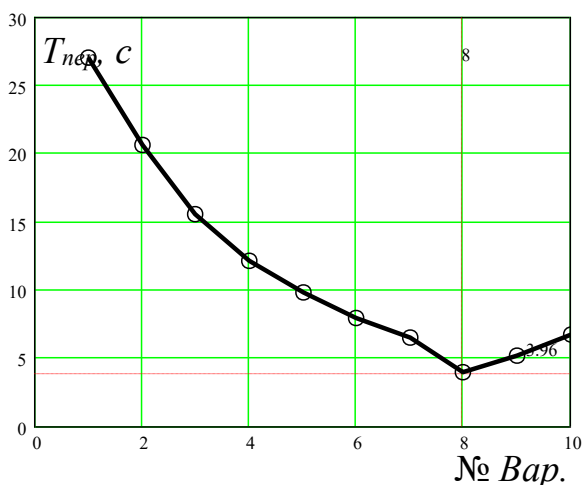
комбайна. Результати наведені в табл. 4, а у графічному виді представлені на рис. 12.

За результатами аналізу рис. 12 можна дійти висновку, що для режиму переміщення виконавчого органу видобувного комбайна з незначним опором руху штока гідроциліндра та зменшеним на 20% тиском у гідросистемі також існує єдина настройка регулятора, за якої спостерігається мінімальний час входу швидкості в діапазон $\pm 1\%$ від уставки (4,07 с) без подальшого виходу швидкості з нього. Це настройка № 7 на рис. 12, за якої, як видно з рис. 12, б та табл. 4, перерегулювання є меншим за 1%. Цій настройці відповідає коефіцієнт інтегральної складової 0,505, а інші параметри регулятора при цьому мають дорівнювати нулю.

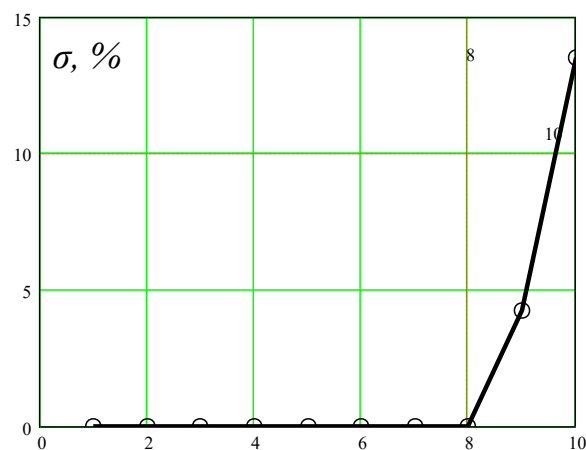
Далі аналогічні залежності були визначені для п'ятого режиму переміщення органу

Результати досліджень залежності критеріїв якості роботи системи автоматичного управління від варіантів настройок ПІ-регулятора для третього режиму переміщення ВО комбайна

Номер настройки регулятора	Коефіцієнт підсилення інтегруючої складової	Коефіцієнт підсилення пропорційної складової	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %	Відносна усталена похибка, %
1	0,15	0	27	0	0
2	0,19	0	20,6	0	0
3	0,24	0	15,5	0	0
4	0,29	0	12,1	0	0
5	0,34	0	9,73	0	0
6	0,39	0	7,84	0	0
7	0,43	0	6,6	0	0
8	0,5	0	3,96	0	0
9	0,55	0	5,1	4,2	0
10	0,65	0	6,7	13,5	0



а



б

№ Вар.

Рис. 11. Залежності від варіантів настройок ПІ-регулятора: а – часу перехідного процесу; б – перерегулювання для третього режиму переміщення ВО комбайна

комбайна. Результати наведені в табл. 5, а у графічному виді представлені на рис. 13.

За результатами аналізу рис. 13 можна дійти висновку, що для режиму переміщення виконавчого органу видобувного комбайна зі значним опором руху штока гідроциліндра та нормальним тиском у гідросистемі теж існує єдина настройка регулятора, за якої спостерігається мінімальний час входу швидкості в діапазон $\pm 1\%$ від уставки (3,94 с) без подальшого виходу швидкості з нього. Це настройка № 6 на рис. 13, за якої, як видно з рис. 13, б та табл. 5, перерегулювання є меншим за 1%. Цій настройці відповідає коефіцієнт інтегральної складової 0,55, а інші параметри регулятора при цьому мають дорівнювати нулю.

Далі аналогічні залежності були визначені для шостого режиму переміщення органу комбайна. Результати наведені в табл. 6, а у графічному виді представлені на рис. 14.

За результатами аналізу рис. 14 можна дійти висновку, що для режиму переміщення виконавчого органу видобувного комбайна зі значним опором руху штока гідроциліндра та зменшеним на 20% тиском у гідросистемі теж існує єдина настройка регулятора, за якої спостерігається мінімальний час входу швидкості в діапазон $\pm 1\%$ від уставки (3,94 с) без подальшого виходу швидкості з нього. Це настройка № 6 на рис. 14, за якої, як видно з рис. 14, б та табл. 6, перерегулювання є меншим за 1%. Цій настройці відповідає коефіцієнт інтегральної

Таблиця 4

Результати досліджень залежності критеріїв якості роботи системи автоматичного управління від варіантів налаштувань ПІ-регулятора для четвертого режиму переміщення ВО комбайна

Номер налаштування регулятора	Коефіцієнт підсилення інтегруючої складової	Коефіцієнт підсилення пропорційної складової	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %	Відносна усталена похибка, %
1	0,18	0	25,1	0	0
2	0,24	0	17,7	0	0
3	0,29	0	14	0	0
4	0,34	0	11,25	0	0
5	0,41	0	8,4	0	0
6	0,47	0	6,8	0	0
7	0,505	0	4,07	0,99	0
8	0,56	0	5,34	6,5	0
9	0,61	0	6,6	11,5	0
10	0,65	0	6,94	15,5	0

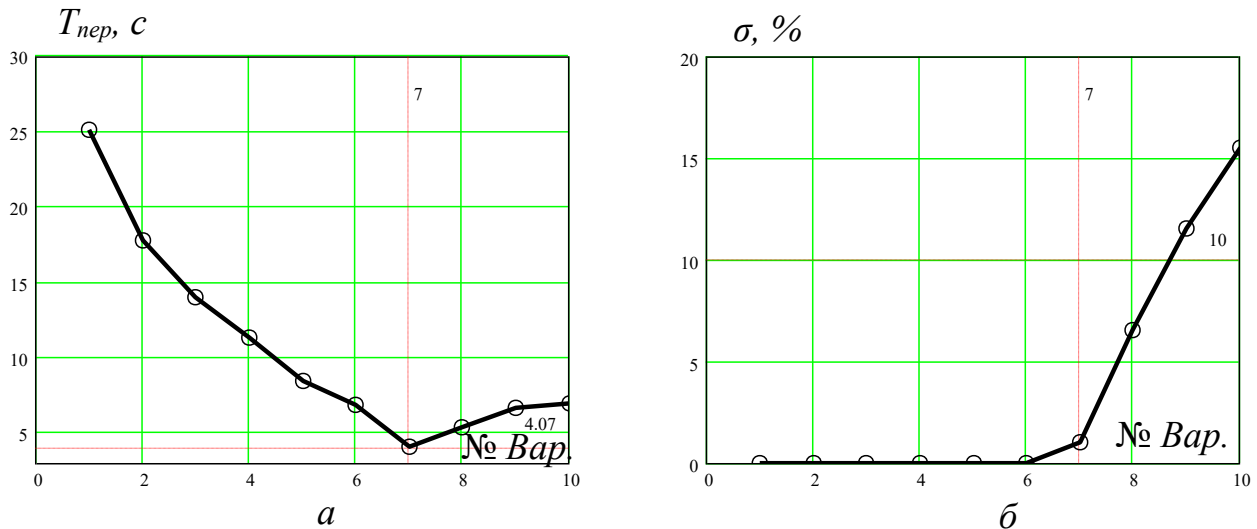


Рис. 12. Залежності від варіантів налаштувань ПІ-регулятора: а – часу перехідного процесу; б – перерегулювання для четвертого режиму переміщення ВО комбайна

Таблиця 5

Результати досліджень залежності критеріїв якості роботи системи автоматичного управління від варіантів налаштувань ПІ-регулятора для п'ятого режиму переміщення ВО комбайна

Номер налаштування регулятора	Коефіцієнт підсилення інтегруючої складової	Коефіцієнт підсилення пропорційної складової	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %	Відносна усталена похибка, %
1	0,25	0	17	0	0
2	0,32	0	12,3	0	0
3	0,38	0	9,65	0	0
4	0,44	0	7,6	0	0
5	0,5	0	6,0	0	0
6	0,55	0	3,94	0,15	0
7	0,6	0	4,9	3,8	0
8	0,65	0	6,22	8,0	0
9	0,7	0	6,7	12,0	0
10	0,75	0	6,75	16,3	0

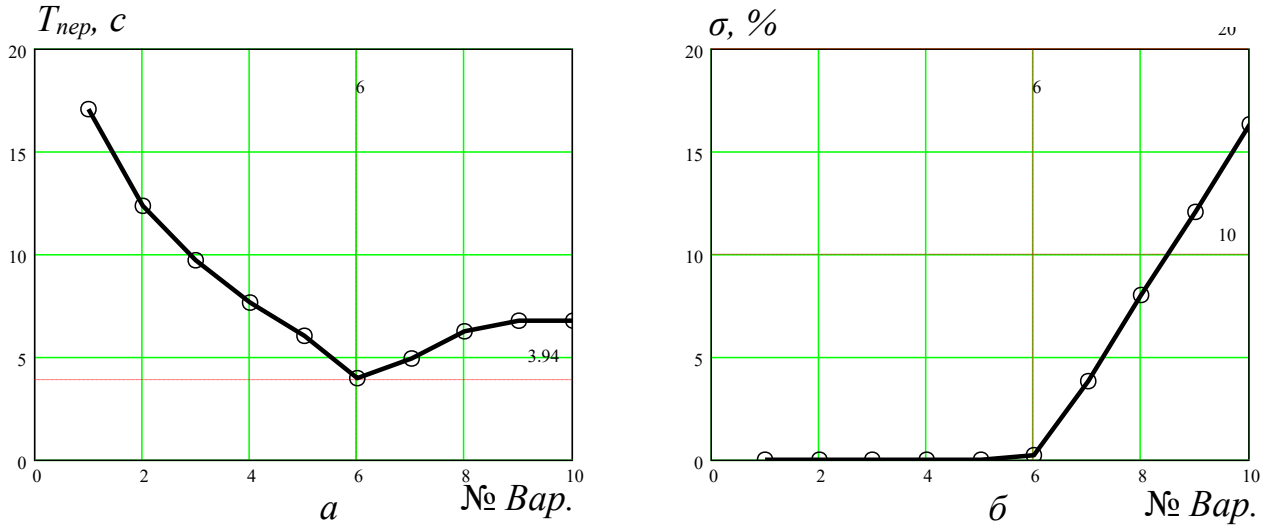


Рис. 13. Залежності від варіантів настройок ПІ-регулятора: а – часу перехідного процесу; б – перерегулювання для п'ятого режиму переміщення ВО комбайна

Таблиця 6

Результати досліджень залежності критеріїв якості роботи системи автоматичного управління від варіантів настройок ПІ-регулятора для шостого режиму переміщення ВО комбайна

Номер настройки регулятора	Коефіцієнт підсилення інтегруючої складової	Коефіцієнт підсилення пропорційної складової	Час перехідного процесу, с	Перерегулювання, %	Відносна усталена похибка, %
1	0,25	0	20,05	0	0
2	0,32	0	14,8	0	0
3	0,38	0	11,75	0	0
4	0,44	0	9,46	0	0
5	0,5	0	7,53	0	0
6	0,576	0	3,94	0,99	0
7	0,61	0	5,1	3,8	0
8	0,65	0	5,32	7,5	0
9	0,7	0	5,4	11,0	0
10	0,75	0	5,43	15,2	0

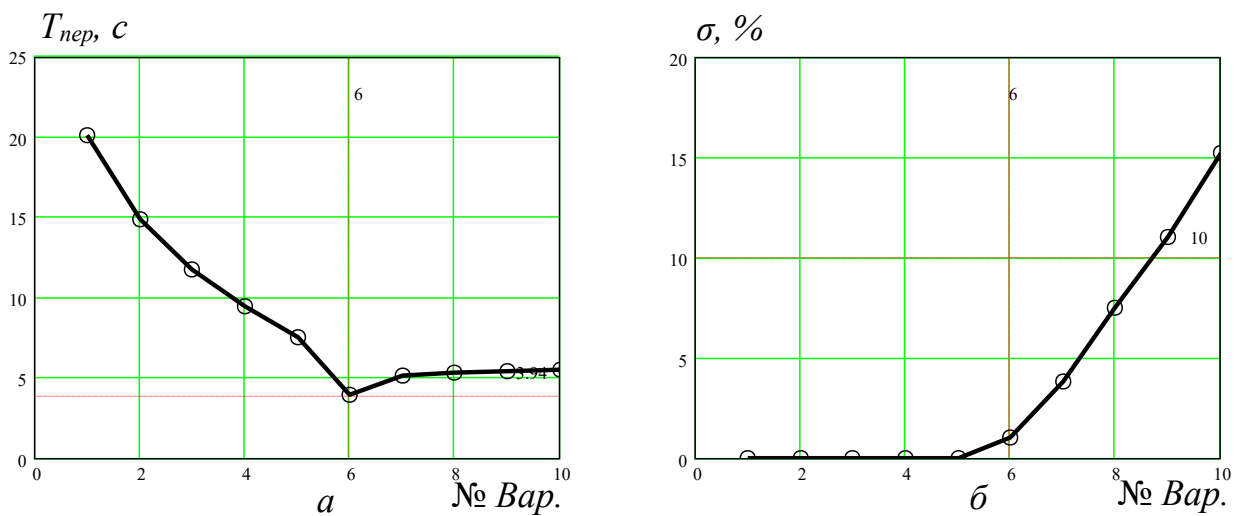


Рис. 14. Залежності від варіантів настройок ПІ-регулятора: а – часу перехідного процесу; б – перерегулювання для шостого режиму переміщення ВО комбайна

складової 0,576, а інші параметри регулятора при цьому мають дорівнювати нулю.

Висновки. Дослідження залежності часу входу швидкості переміщення виконавчого органу видобувного комбайна в діапазон $\pm 1\%$ від уставки за умови відсутності подальшого виходу з нього від різних варіантів настройки регулятора показали, що для всіх режимів переміщення органу незалежно від коливань тиску в гідросистемі комбайна й опору руху штока гідроциліндра ця залежність є параболічною з мінімальним екстремумом, що відповідає оптимальній настройці регулятора.

Було виявлено, що для всіх режимів переміщення органу комбайна оптимальним є І-регулятор з коефіцієнтом підсилення, що практично не змінюється зі зміною тиску в гідросистемі та незначно збільшується зі збільшенням опору руху штока гідроциліндра.

Також встановлено, що навіть незначне відхилення коефіцієнта підсилення інтегральної складової регулятора від свого оптимального значення призводить до суттєвого погіршення критеріїв якості роботи системи автоматичного управління на 20% та більше.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бобро Д. Вугільна промисловість України в умовах гібридної війни. *Аналітична записка: електронні ресурси Національного інституту стратегічних досліджень*. 2017. 24.
2. Немчинов М. Що чекає на українські шахти: електронні ресурси інформаційного агентства «Радіо свобода». *Міністерство енергетики та вугільної промисловості України*. 2018.
3. Стан розвитку паливно-енергетичного комплексу України за 11 місяців 2017 року (за фактичними даними). *Міністерство енергетики та вугільної промисловості України*.
4. Бубликов А., Козарь М., Проценко М. та ін. Автоматизація технологічних процесів підземних гірничих робіт. *Національний гірничий університет*. 2012. 304 с.
5. Чекулаєв Є. Виконавчі механізми та регулюючі органи. *ДГМА*. 2005. 168 с.
6. Бубликов А., Шевченко В., Надточий В., Яцюк Д. & Прядко Н. Модифікований алгоритм автоматичного керування видобувним комбайном за навантаженням двигуна приводу різання. *Збірник наукових праць НГУ*. 2022. 69. С. 179–192.

REFERENCES:

1. Bobro, D. (2017). Vuhilna promyslovist Ukrainy v umovakh hibrydnoi viiny [The coal industry of Ukraine in the conditions of a hybrid war]. *Analitychna zapyska: elektronni resursy Natsionalnoho instytutu stratehichnykh doslidzhen*. 24 [in Ukrainian].
2. Nemchynov, M. (2018). Shcho chekaie na ukrainski shakhty: elektronni resursy informatsiinoho ahentstva "Radio Svoboda" [What awaits Ukrainian mines: electronic resources of the information agency "Radio Freedom"]. *Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy* [in Ukrainian].
3. Stan rozvytku palyvno-enerhetychnoho kompleksu Ukrainy za 11 misiatsiv 2017 roku (za faktychnymy danymy) [State of development of the fuel and energy complex of Ukraine for 11 months of 2017 (according to actual data)]. *Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy* [in Ukrainian].
4. Bublikov, A., Kozar, M., Protsenko, M. ta in. (2012). Avtomatyziatsiia tekhnolohichnykh protsesiv pidzemnykh hirnychykh robit [Automation of technological processes of underground mining works]. *Natsionalnyi hirnychiy universytet*. 304 p. [in Ukrainian].
5. Chekulaiev, Ye. (2005). Vykonavchi mekhanizmy ta rehuliuuchi orhany [Executive mechanisms and regulatory bodies]. *DHMA*. 168 p. [in Ukrainian].
6. Bublikov, A., Shevchenko, V., Nadtochy, V., Yatsiuk, D., & Priadko, N. (2022). Modyfikovanyi alhorytm avtomatychnoho keruvannia vydobuvnym kombainom za navantazhenniam dvyhuna pryvodu rizannia [Modified algorithm of automatic control of the mining harvester according to the load of the engine of the cutting drive]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. 69, pp. 179–192 [in Ukrainian].