

ВСТУП

Сучасний процес виробництва залізородних котунів складається з прийому та підготовки шихтових матеріалів, виробництва сирих котунів при дозуванні концентрату, вапняку, бентоніту, тощо, зміцнення котунів і обробки зміцнених котунів. Сирі котуни піддаються термічній обробці на КМ у поєднанні з іншими технологічними операціями – завантаження сирих котунів у випалювальні візки, їх транспортування, сушіння, інтенсивний нагрів, високотемпературне випалювання і охолодження шару котунів. Коливання завантаження візків конвеєрної машини сирими котунами коливається у межах $\pm 18-20\%$, це викликає нерівномірну висоту шару котунів, тому для підтримки потрібного шару котунів виникає необхідність в розробці автоматичної системи керування швидкістю переміщення візків в продовж зон конвеєрної машини [1–6]. Одночасно потрібно враховувати те, що КМ працює у різних режимах, навантаженнях, різноманітних збуреннях, з сировиною та енергоносіями, що мають різні характеристики. Зміна цих параметрів приводить до коливань аеродинамічного опору шару котунів, що в свою чергу впливає на кількість присосів під візками, а відповідно й на температуру під ними, порушуючи газопроникність шару та якість котунів на виході машини. Від рівності шару котунів також залежить енергетичні показники та продуктивність КВМ, що потребує зменшення коливань висоти шару котунів на візках КМ шляхом регулювання швидкості переміщення випалювальних візків [7–9].

Окрім того, сучасних умовах досить актуальним є використання на верхньому рівні фабрики огрудування АСУТП, яка являє собою багаторівневу людино-машинну систему управління. В ієрархії програмно-апаратних засобів промислової автоматизації фабрики огрудування знаходяться SCADA-системи, які виконують задачі збирання інформації й управління технологічним процесом у реальному часі, та зберігання історії процесу, мають інтерфейс з оператором [8]. Вони займають верхній рівень ієрархії програмно-апаратних засобів автоматизації. Головне призначення SCADA-систем – збір поточної інформації про роботу устаткування з датчиків і контролерів, первинне перетворення та зберігання зібраної інформації, управління технологічним процесом, представлення поточної інформації у вигляді гістограм, таблиць, графіків, забезпечення зв'язку між оператором та технологічним процесом. У той же час, необхідно розрізнити програмне забезпечення SCADA, яке функціонує у складі АСУТП конкретного об'єкта, і набір інструментальних програмних засобів, призначених для розробки спеціалізованого програмного забезпечення. Ці дві різновидності програмного забезпечення тісно пов'язані, тому в подальшому будемо називати їх системами збору даних і оперативного управління. Найбільш популярними серед інструментальних засобів розробки є: WinCC фірми Siemens, Genesis32 фірми Iconics, iFIX фірми Intellution. Вони функціонують під управлінням Windows 98/NT/2000, що обумовлює їх максимальну відкритість і масштабованість.

Сучасні автоматизовані системи управління фабрик огрудування будуються на базі промислових контролерів, які на нижньому рівні АСУТП використовують інформацію з первинних перетворювачів, обробляють інформацію, що получено, регулюють технологічні параметри, забезпечують аварійну сигналізацію, захист і блокування. Сформована та оброблена контролерами інформація передається до комп'ютеризованих систем верхнього рівня АСУТП, які мають робочі місця диспетчера, оператора-технолога, де відбувається подальша обробка даних процесу і представлення оператору у інтуїтивно зрозумілому вигляді.

Сьогодні доцільно удосконалювати АСУТП фабрики огрудування за рахунок впровадження сучасної SCADA-системи регулювання швидкістю випалювальних візків, що працює в реальному часі та використовує можливість оперативного диспетчерського управління продуктивності КМ. Тому розробка сучасних математичних моделей для регулювання швидкості випалювальних візків КМ, які підтримують заданий рівень висоти шару котунів та забезпечують оптимальний технологічний процес по продуктивності, є актуальною науковою та практичною задачею.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задача дослідження полягає в розробленні математичної моделі регулювання швидкості переміщення випалювальних візків КМ, що прискорює темпи протікання технологічного процесу, дозволяючи вивчати не тільки основні канали управління процесами випалювання котунів, скорочуючи час освоєння нових процесів, а й вдосконалювати вже існуючі, що змінюють продуктивність КМ. Цілі та методи моделювання спрямовані на підвищення ефективності та продуктивності КМ, якості продукції, забезпечення задач планування і управління, а також звільнення оператора від роботи в шкідливих умовах. Це дозволить більш точно керувати процесом термообробки та газодинамічним режимом шару котунів та реально впливати на якість спечених котунів, мінімізувати витрати палива для забезпечення заданої міцності котунів та збільшити продуктивність КМ. Задача моделювання управління швидкістю переміщення випалювальних візків КМ полягає в тому, що для технологічного об'єкта потрібно підібрати такий опис, який у повній мірі відображав дійсне значення продуктивності КМ з точки зору заданої мети моделювання. При розробці системи автоматичного регулювання швидкості переміщення випалювальних візків у продовж всіх зон КМ метою моделювання є дослідження поведінки системи, знаходження оптимальних параметрів регуляторів для роботи системи в необхідному режимі. При цьому удосконалюється керування оператором технологічного процесу випалювання котунів, забезпечуючи їх якість та необхідну продуктивність КМ, завдяки використанню регулювання швидкості випалювальних візків КМ, що реалізовано на базі SCADA-системи. Тому метою даної статті є представлення результатів розробки математичної моделі для регулювання швидкості випалювальних візків КМ із реалізацією сучасної SCADA-системи для управління про-

дуктивністю КМ і регулювання висоти шару котунів на візках КМ.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

На сьогоднішній день проводяться масштабні дослідження в області створення ефективних методів та технологій, що дозволяють вирішувати керування технологічним процесом при автоматичному управлінні агрегатами та механізмами, призначених для виробництва котунів, у тому числі й регулюванні швидкості візків КМ, що досить широко висвітлено у вітчизняній і зарубіжній літературі [1–8]. Для управління переміщення випалювальних візків у продовж технологічних зон КМ використовуються електроприводи з електродвигунами постійного або змінного струму. При реалізації цієї мети застосовуються асинхронні електроприводи с параметричним управлінням, для яких використовуються перетворювачі частоти, що включені в статорні ланцюги асинхронного двигуна [9–12]. Технічні та економічні показники перетворювачів частоти грають головну роль у сфері їх застосування і виявляють доцільність їх промислового впровадження в електроприводі управління швидкістю візків КМ та є найбільш широко поширеними на практиці, їх експлуатація буде застосовуватися і в майбутньому для регулювання швидкості КМ [9, 11–12]. Проте, відомі результати досліджень не в повній мірі відображають протікання технологічного процесу випалювання котунів і з великою помилкою визначають продуктивність при регулюванні швидкості візків КМ. Разом з цим, велика кількість різних публікацій присвячено розробці сучасних SCADA-систем для автоматизації агрегатів і механізмів фабрики огрудкування. Лідерами промислових SCADA-систем є: фірми AdAstra, що розробила систему Trace Mode [8], Slmeider Electric – Monitor Pro [13], US Data – Factory Link [14], Wonderware – Intouch [15], фірми Iconics – Genesis [16] та ін. За допомогою TRACE MODE 5.04 для Windows NT можливо не тільки розробляти розподілені АРМ операторів технологічного процесу, а й запрограмувати контролери, а також зв'язати АСУТП з корпоративною інформаційною системою підприємства і глобальною мережею Internet.

Відомі SCADA-системи використовуються у галузях господарства, де потрібно забезпечувати операторський

контроль за технологічними процесами в реальному часі, які можливо порівняти та зробити обґрунтований вибір на користь той чи іншої системи, що користуються популярністю у фахівців. Так, використовують SCADA-системи відомих західних фірм (Siemens, GE Fanuc, Octagon Systems, PEP, Modicon, Schneider Electric) в автоматичних системах управління газоперекачувальних станцій моніторингу та управління об'єктами енергетики, технології фізико-хімічного поділу сировини, що містить цукор та інших промислових об'єктів [17–25]. У металургійному виробництві та на деяких технологічних дільницях гірничо-збагачувальних підприємствах використовують SCADA систему TRACE MODE, яка є спеціалізованим комплексом рішень для верхніх рівнів АСУ ТП від компанії AdAstra Research Group. SCADA система TRACE MODE здійснює такі функції: управління процесом виробництва; збір даних; архівування даних; віддалене управління обладнанням; тривожна сигналізація; відображення інформації на трендах; генерування звітів. [19, 20, 26]. У той же час, деякі технологічні об'єкти випалу котунів фабрики огрудкування потребують удосконалення АСУТП за рахунок застосування сучасних SCADA-систем.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для моделювання регулювання швидкості палет КМ необхідно використовувати найбільш потужний і універсальний метод дослідження та оцінювання динамічних систем, поведінка яких залежить від випадкових факторів. Враховуючи вище сказане використовуємо графічне середовище імітаційного моделювання Simulink, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні і гібридні, нелінійні і розривні системи. Програма Simulink є додатком до пакету для числового аналізу MATLAB. При моделюванні з використанням Simulink реалізуємо принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки [11]. На рис. 1 зображено математичну модель, розроблену у програмі Simulink на основі наступних розрахунків.

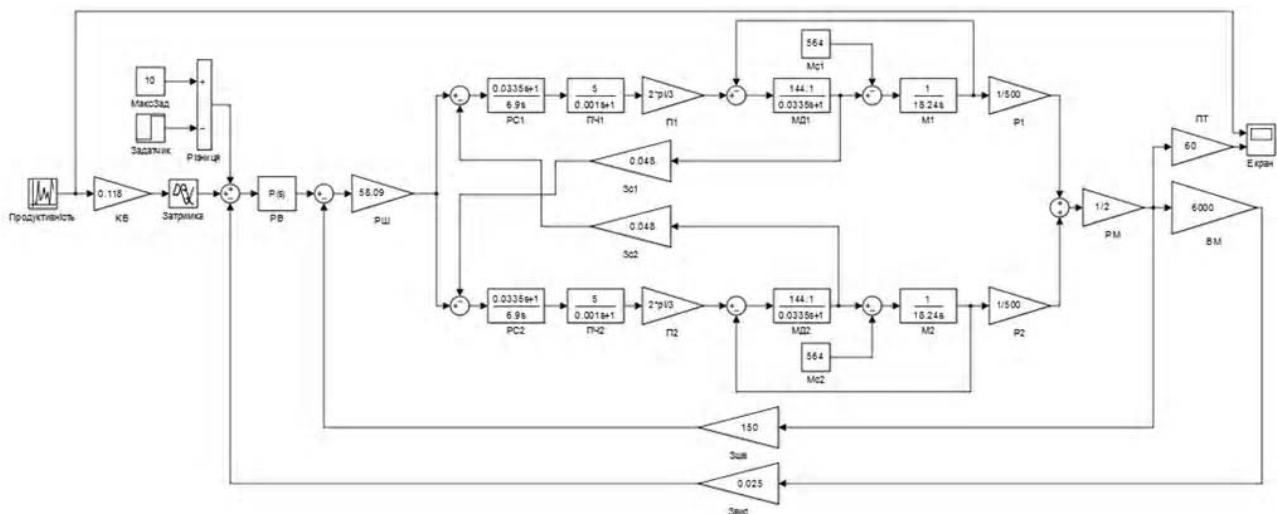


Рисунок 1 – Математична модель процесу регулювання висоти шару котунів

Процес транспортування та регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках потребує електропривод із достатньою потужністю. Потужність електроприводу стрічки візків витрачається на подолання опору руху конвеєра: тертя кочення в ходових роликах візків, тертя ковзання в нижніх поздовжніх, торцевих і бортових ущільнювачах при руху візків, тертя в зачепленнях і тертя при завантаженні котунів на випалювальні візки КМ. Також, необхідно врахувати, що котуни створюють рушійний момент на візках розвантажувальної частини конвеєра, що полегшує роботу приводу. Тому розрахунок потужності електроприводу є першочерговим завданням при побудові системи керування.

У математичній моделі використано вихідні дані конвеєрних машин ОК-306 та LURGI-278 [5–7, 29]. Для моделювання автоматизованої системи необхідно провести розрахунки передавальних функцій елементів, що входять у систему автоматичного регулювання швидкості переміщення випалювальних візків КМ. Так, спрощена математична модель асинхронного двигуна має механічну та електромагнітну ланки зі зворотнім зв'язком по швидкості, які описуються наступними передавальними функціями. Для електромагнітної ланки:

$$W_{ем}(p) = \frac{\beta}{T_{ем}p + 1} = \frac{144,1}{0,0335p + 1}, \quad (1)$$

де $\beta = \frac{M_{кр}}{s_{кр}\omega_0}$, $M_{кр} = 1432,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $s_{кр} = 0,095$ визначається

за каталогом,

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n}, f = 50 \text{ Гц}, p_n = 3;$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \text{ об/хв},$$

$$\beta = \frac{1432,5}{0,095 \cdot 104,67} = 144,1.$$

Електромагнітна стала (2), визначається за формулою:

$$T_{ем} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s_k} = \frac{1}{3 \cdot 14,159 \cdot 0,095} = 0,033 \text{ с}. \quad (2)$$

Передавальна функція механічної ланки:

$$W_{мх}(p) = \frac{1}{Jp} = \frac{1}{18,24p}. \quad (3)$$

Передавальна функція перетворювача частоти має вигляд:

$$W_{пч}(p) = \frac{\kappa_{пч}}{T_{пч}p + 1} = \frac{5}{0,01p + 1}. \quad (4)$$

де $\kappa_{пч} = \frac{f}{U_{пчм}}$, $U_{пчм} = 10 \text{ В}$, $\kappa_{пч} = \frac{50}{10} = 5 \text{ Гц/В}$. $T_{пч}$ приймається за $0,001 \text{ с}$.

Ланка $\frac{2\pi}{p_n} = \frac{2 \cdot 3,14}{3} = 2,1$ розташовується між пере-

творювачем частоти і двигуном, потрібна для перетворення частоти напруги живлення у частоту обертання двигуна [11, 30–32].

Для спрощення синтезу регулятора струму можна знехтувати зворотнім зв'язком по швидкості асинхронного двигуна. Тоді передавальна функція об'єкта регулювання має наступний вигляд:

$$W_{орс}(p) = W_{рс} \cdot \frac{\kappa_{пч}}{T_{пч}p + 1} \cdot \frac{2\pi}{p_n} \cdot \frac{\beta}{T_{ем}p + 1}. \quad (5)$$

Бажана передавальна функція розімкнутого контуру регулювання струму матиме вигляд:

$$W_{бс}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1)}. \quad (6)$$

де $T_{\mu} = 0,001 \text{ с}$, приймає значення постійної часу перетворювача частоти, а передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку регулювання струму, знаходиться за відношенням між максимальною напругою сигналу на вході регулятора $U_{рсм}$ та величиною на виході об'єкта регулювання $I_б$:

$$\kappa_{зс} = \frac{U_{рсм}}{I_б} = \frac{10}{210} = 0,048. \quad (7)$$

де $I_б$ приймається на 50 % більше від номінального.

Величина номінального струму асинхронного двигуна за каталогом становить 140 А, отже базисне значення струму дорівнює: $I_б = 140 \cdot 1,5 = 210 \text{ А}$.

Передавальна функція регулятора струму знаходиться за формулою:

$$W_{рс}(p) = \frac{T_{ем}p + 1}{T_i p}. \quad (8)$$

$$T_i = \frac{p_n}{4 \cdot T_{\mu} \cdot \kappa_{пч} \cdot \pi \cdot \beta \cdot \kappa_{зс}} = \frac{3}{4 \cdot 0,001 \cdot 5 \cdot 3,14 \cdot 144,1 \cdot 0,048} = 6,9. \quad (9)$$

$$W_{рс}(p) = \frac{0,0335p + 1}{6,9p}. \quad (10)$$

Об'єкт регулювання швидкості складається з перетворювача частоти і асинхронного двигуна, а також редуктора і робочого механізму:

$$W_{орш}(p) = W_{рш} \cdot \frac{\kappa_{пч}}{2 \cdot T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{1}{Jp} \cdot W_p \cdot W_{рм}. \quad (11)$$

Передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку регулювання швидкості:

$$\kappa_{зш} = \frac{U_{ршм}}{v} = \frac{10}{0,067} = 150. \quad (12)$$

$W_p(p)$ дорівнює передавальному коефіцієнту редуктора і має значення $\kappa_p = \frac{1}{500} = 0,002$.

При підключенні двох асинхронних двигунів ділить сумарну частоту обертання навпіл, тому є коефіцієнтом $K_{рм} = 0,5$.

Бажана передавальна функція розімкнутого контуру регулювання швидкості матиме вигляд:

$$W_{бш}(p) = W_{рш} \cdot \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)} \cdot \kappa_{зш}. \quad (13)$$

$$W_{рш}(p) = \frac{\kappa_{зс} \cdot J \cdot 3 \cdot \kappa_{рм}}{8 \cdot T_{\mu} \cdot \kappa_{зш} p \cdot \pi \cdot p_H \cdot \kappa_p} = \frac{0,048 \cdot 18,24 \cdot 3 \cdot 0,5}{8 \cdot 0,001 \cdot 150 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 0,002} = 58,09. \quad (14)$$

Передавальна функція виконавчого механізму отримує на вході значення частоти обертання електроприводу і формує на виході висоту шару котунів:

$$W_{вм}(p) = \frac{h_3}{v} = \frac{400}{0,067} = 5970,15. \quad (15)$$

де $h_3 = 400$ мм.

Формула для знаходження передавальної функції зворотного зв'язку по висоті шару:

$$W_{зв}(p) = \frac{U_{звм}}{h_3} = \frac{10}{400} = 0,025. \quad (16)$$

Передавальна функція конвеєрних вагів має вигляд:

$$W_{кв}(p) = K_{кв} = \frac{U_{квм}}{q_{квм}} = \frac{10}{85} = 0,118. \quad (17)$$

де $U_{квм} = 10$ В; $q_{квм} = 85$ кг/с [33].

У моделі (рис. 1) блок **ПРОДУКТИВНІСТЬ** генерує випадкові числа у межах від 55 до 85 кг тривалістю в секунду, моделюючи зміну продуктивності КМ. Блок **КВ** моделює передавальну функцію конвеєрних вагів на основі розрахунків за формулою (17). Блок **ЗАТРИМКА** формує затримку, значення якої приймається в секунду. Ця затримка виникає через те, що конвеєрні ваги розташовані на відстані від краю КМ, тобто потрібен час щоб котуни з позиції вимірювання ваги потрапили на край конвеєра. Також, варто врахувати те, що існує збірний конвеєр, розміщений над конвеєрною стрічкою, що складається з візків КМ, і тому виникає додаткова затримка, що дорівнює часу падіння котунів зі конвеєра на візки. Блок **ЗАДАТЧИК** формує сигнал задатчика висоти шару у межах від 0 до 10 В для моделювання напруги, яка ви-

никає при переміщенні повзунка на панелі керування висотою шару котунів. Блок **РІЗНИЦЯ** знаходить значення різниці між сигналом блоків **ЗАДАТЧИК** та **МАКС-ЗАД**, значення якого дорівнює 10 В. Блок **РІЗНИЦЯ** інвертує сигнал задатчика у межах від 0 до 10 В, оскільки це необхідно для правильного керування електроприводом. Блок **ЗВИС** моделює зворотній зв'язок по висоті шару котунів. Розрахунок даного блоку виконано за формулою (16). Блок **РВ** моделює регулятор висоти у вигляді Р-регулятора. Значення регулятора висоти обчислюються з використанням компонента програми Simulink – Tune. Блок **ЗШВ** моделює зворотній зв'язок по швидкості. Розрахунок даного блоку наведено у формулі (12). Розрахунок блоку регулятора швидкості **РШ** здійснюється за формулою (14). Сигнал із регулятора швидкості потрапляє на дві однакові лінії на блоки **РС1** та **РС2**, які моделюють регулятори струму на основі формули (10). Блоки **ЗС1** та **ЗС2** моделюють зворотній зв'язок по струму на основі формули (6), при чому блоки під'єднані до протилежних ліній для синхронізації електродвигунів. Блоки перетворювачів частот **ПЧ1** та **ПЧ2** моделюють зміну сигналу за законом, обчисленим у формулі (4). Блоки перетворення **П1** та **П2** моделюють перетворення частоти напруги живлення в частоту обертання двигунів. Групи блоків **МД1**, **Мс1**, **М1** та **МД2**, **Мс2**, **М2**, охоплені зворотними зв'язками, моделюють передавальні функції асинхронних електродвигунів.

Блоки **МД1**, **МД2** моделюють електромагнітні складові двигунів, блоки **Мс1**, **Мс2** формують статичний момент, а блоки **М1** та **М2** утворюють механічні ланки. Блоки **Р1**, **Р2** визначають функцію роботи редуктора, що враховує передавальне число. Блок робочого механізму **РМ** моделює привідну зірку конвеєра випалювальних візків. Зірка ділить сумарну частоту обох асинхронних двигунів навпіл.

Блок виконавчого механізму **ВМ** моделює перетворення частоти обертання привідної зірки у висоту шару котунів, розраховується за формулою (15). Блок **ПТ** перетворює частоту обертання зірки у швидкість конвеєра. Елемент **ЕКРАН** показує графік зміни продуктивності КМ та перехідний процес швидкості випалювальних візків.

Для доцільності удосконалення АСУТП фабрики огрудування за рахунок використання регулювання швидкості руху випалювальних візків розроблена сучасна модель інтерфейсу SCADA-системи, що працює в реальному часі та дає можливість оперативного диспетчерського управління. Оскільки у системах автоматизованого управління провідні фабрики огрудування використовують інструментальну систему SCADA TRACE MODE 6, то систему регулювання висоти шару котунів доцільно розробляти з використанням SCADA TRACE MODE 6 [8, 27–28].

Інструментальна система TRACE MODE 6 – це універсальний засіб розробки та налагодження програм для автоматизованих систем управління технологічними процесами і управління виробництвом. Вона складається з інтегрованого середовища розробки та налагоджувального монітору реального часу – профайлера. Інструментальна система інсталюється на робочому місці розроб-

ника АСУТП. У ній створюється набір файлів, які називаються проектом TRACE MODE.

Інтегроване середовище включає повний набір засобів розробки систем автоматизації технологічних процесів, та управління бізнес-процесами виробництва. Доступні засоби створення: операторського інтерфейсу SCADA, розподілених систем керування, промислової бази даних реального часу, програм для промислових контролерів. За допомогою виконавчих модулів TRACE MODE проект АСУТП запускається на виконання в реальному часі. TRACE MODE дозволяє створювати проект відразу для декількох виконавчих модулів – вузлів проекту. Кожному вузлу проекту відповідає одна інсталяція виконавчого модуля. Окрім цього, інтегроване середовище розробки дозволяє поступово нарощувати функціональність АСУТП, починаючи з простого моніторингу та візуалізації технологічного процесу на одному персональному комп'ютері SCADA/HMI і закінчуючи реалізацією складних контурів управління, організацією розподілених обчислень, підключенням додаткових робочих місць і економічних модулів: облік і технічне обслуговування обладнання, облік і управління персоналом та управління виконанням виробництва.

Перевагами даної SCADA-системи також є те, що в систему інтегровано більше десяти різних редакторів проектування автоматизованих систем керування виробництва та управління персоналом. Ці компоненти системи полегшують написання програми та дозволяють об'єднувати різні рівні автоматизації виробництвом без потреби використання інших програмних засобів. Крім того, система TRACE MODE на даний момент є універсальною системою, вона вміщує більше 2500 драйверів для різноманітних пристроїв та засобів автоматизації, а для тих яких немає можливість за допомогою вбудованого редактору без особливих навичок програмування написати програму драйвера.

Присутність унікальної технології автоматичної побудови автоматизованих систем дозволяє декількома рухами створити зв'язки між вузлами розподіленої системи управління, між джерелами даних SCADA і каналами, створити джерела даних за відомою конфігурації контролера та інше. При цьому, інтерфейс програми є інтуїтивно зрозумілий та простий, що дозволяє програмісту скоротити час на написання програми, а вбудовані редактори ведуть постійну перевірку програми, забезпечуючи безпомилковість написання програми [16–22].

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На основі даних та розрахунків у графічному середовищі Simulink, що входить в пакет для числового аналізу MATLAB, побудовано математичну модель системи регулювання швидкістю випалювальних візків КМ, що відповідно до технологічного процесу забезпечує керування висотою шару котунів і в результаті продуктивністю КМ.

Запропонована система та розроблене для неї програмне забезпечення використовувалося для дослідження протікання технологічного процесу при управлінні швидкістю випалювальних візків і визначення можливості практичного застосування на фабриках огрудування. Для побудови моделі процесу регулювання висоти шару ко-

тунів при зміні швидкості переміщення візків проведені розрахунки передавальних функцій елементів моделі, використовуючи вихідні дані випалювальних машин ОК-306 та LURGI-278 [6, 29, 33].

Для демонстрації роботи інтерфейсу SCADA-системи розроблено програмне забезпечення з використанням SCADA TRACE MODE 6. Програма написана графічною мовою програмування FBD та зображена на рис. 2а. Окремо створені канали зв'язку для передачі даних між програмою та екраном, які показані на рис. 2б. Вхідна змінна програми Zad_vys_R отримує по каналу Zad_vys значення висоти шару, виставлене на шкалі повзунком поля «Задатчик висоти шару сирих котунів, мм» екрану. Вхідна змінна $Vaga_R$ по каналу $Vaga$ отримує значення продуктивності, згенеровано випадково у межах від 55 до 85 кг.

Програма виконує алгебраїчні операції над вхідними змінними, генерує похибку, яка для даної системи регулювання приймається в межах 10 мм, для моделювання вимірних даних датчиком висоти, формує вихідні сигнали Екран_1_1_Shv, Екран_1_1_Vys, які по каналам Shv, Vys потрапляють на екран у поля «Швидкість конвеєра палет, м/хв» та «Висота шару котунів, мм».

Кожен канал передачі даних має свої параметри, налаштування та обмеження. Канал $Vaga$ передає дані про продуктивність КМ у програму та на екран. Зображення налаштувань каналу наведено на рис. 3а. У полі ВП встановлюється значення верхньої межі каналу 85 кг, а в поле НП встановлюється значення нижньої межі 55 кг. При демонстрації роботи системи на цей канал подаються дані з генератора випадкових чисел, який генерує число у межах від 0 до 100 кожної секунди. У полі обробки даних встановлені параметри множника 0,3 та зміщення 55. Ці параметри розраховані за формулою у полі масштабування для переведення значень генератора у межах 0–100 В значення ваги у межах 55–85 кг. У полі розмірність для каналу $Vaga$ обрано значення кг. Параметри каналу Vys зображені на рис. 3б. Канал передає дані про висоту шару котунів на конвеєрі у програму та на екран. Значення поля ВП встановлене у 390, оскільки максимальне значення задатчика становить 300 мм, висота постілі розраховується та приймається висотою в 80 мм, найвище значення похибки становить 10 мм, тому в сумі ці дані дають максимальне значення верхньої межі каналу 320 мм. Значення поля НП встановлене у 170 мм, оскільки при мінімальних значеннях задатчика висоти шару 100 мм, постілі 80 мм та найнижчого значення похибки 10 мм підсумкове значення нижньої межі дорівнює 170 мм. Розмірність каналу виставлена в мм. Канал Shv має параметри, зображені на рис. 3в. Його призначення – передавання даних про швидкість переміщення випалювальних візків КМ у програму та на екран. Значення поля ВП приймається за 4, НП – 1, на основі даних аналізу КМ. Розмірність каналу має значення м/хв.

Параметри каналу Zad_vys зображено на рис. 3г. Канал призначений для передачі задатчика рівня сирих котунів із екрану до програми. Тут поля ВП та НП мають значення відповідно 300 та 100, оскільки саме на такий рівень сирих котунів розрахована машина LURGI-278. Поля ВГ та НГ приймають значення верхнього та ниж-

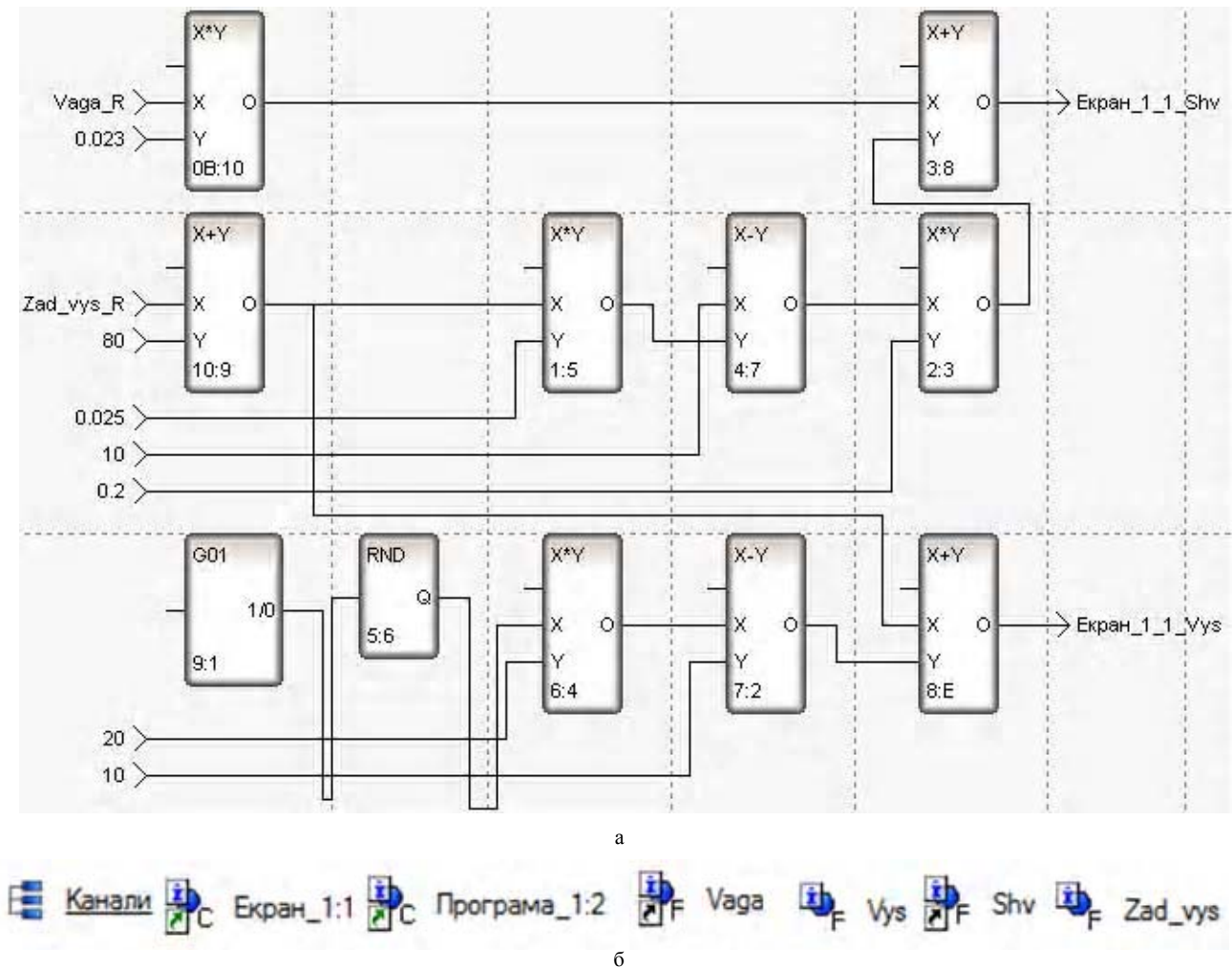


Рисунок 2 – Програмне забезпечення (а) і канали для передачі даних (б) SCADA-системи

нього попереджувального рівня, встановлені на рівнях 240 та 220. Оскільки номінальна висота котунів на КМ становить 320 мм, то безпечне відхилення від цього рівня приймається у межах 20 мм. ВА та НА – верхній та нижній аварійний рівень, мають значення 280 та 120. При виході установки висоти за межі цих рівнів є ризик перевантаження електроприводу. Значення розмірності каналу в мм. На старті встановлюється номінальне значення висоти 240 мм, яке можна змінювати під час роботи системи.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Проведені експерименти підтвердили працездатність і практичну застосовність запропонованої математичної моделі системи автоматичного регулювання швидкістю випалювальних візків КМ. У результаті моделювання отримано перехідні процеси зміни продуктивності КМ при регулюванні швидкості візків КМ. Графіки вхідних і вихідних сигналів, зображено на рис. 4.

З отриманих графіків видно, що в залежності від зміни продуктивності КМ змінюється швидкість переміщення візків зі встановленою затримкою. При сигналі на датчику 8В, що відповідає виставленій висоті рівня 240 мм без постілі, швидкість електроприводу, а відповідно і швидкість переміщення візків, регулюється в межах від 3,2 до 3,8 м/с.

При проведенні моделювання встановлено значення регулятора висоти шару котунів у випалювальних візках, воно дорівнює 1,051. Це значення обчислене з використанням компонента програми Simulink – Tune. Коефіцієнти блоків перетворення $PI1$ та $PI2$ моделюють перетворення частоти напруги живлення в частоту обертання асинхронних двигунів і мають значення 2,09, а значення блоків $P1$, $P2$, що визначають функцію роботи редуктора, яка враховує передавальне число, становить 0,002. Блок робочого механізму PM моделює привідну зірку конвеєра та її передавальна функція становить 0,5, а блок $PI3$, що перетворює частоту обертання зірки у швидкість конвеєра, має значення 60.

Приклад роботи SCADA-системи зображено на рис. 5. У верхній частині екрану зображено конвеєр палет та збірний конвеєр у горизонтальній площині. На основі попередньо зроблених розрахунків, продуктивність КМ коливається у межах 55–85 кг/с. Над зображенням конвеєра випалювальних візків розміщено поле «Висота шару котунів, мм». У нього виводиться значення висоти шару котунів, виміряна датчиком рівня. Значення може коливатись у межах 170–390 мм, у залежності від заданого рівня, з урахуванням висоти шару постілі, яка становить 80 мм, та похибки, величиною 10 мм. Під зображен-

Имя: Vaga Кодировка: TCS5
 Комментарий: Продуктивность збирного конвеера

Границы: Использовать

Обработка: Использовать

Системные: Основные

Тип: Input

Размерность: кг

Период: 1 сек

Единица измерения: сек

Автопосылка: Включить

Индекс:

Отработка:

На старте: 0

Архивация: Дополнительно

Параметры: ВП: 85, ВА: 0, ВГ: 0, НГ: 0, НА: 0, НП: 55, Гистерезис: 0

Масштабирование: Масштабирование

Масштабирование: Масштабирование

Исходные данные: In: 0.3, Множитель: 55, Смещение: 0

Выходные данные: Max, Min

Кнопка: Рассчитать

а

Имя: Vys Кодировка: TCS5
 Комментарий: Высота шару котунів на конвеерній стрічці палет, включно з 80 мм постілі

Границы: Использовать

Обработка: Использовать

Системные: Основные

Тип: Input

Размерность: мм

Период: 1 цикл CALC

Единица измерения: цикл CALC

Автопосылка: Включить

Индекс:

Отработка:

На старте: 0

Архивация: Дополнительно

Параметры: ВП: 390, ВА: 0, ВГ: 0, НГ: 0, НА: 0, НП: 170, Гистерезис: 0

Масштабирование: Масштабирование

Масштабирование: Масштабирование

Исходные данные: In: 1, Множитель: 0, Смещение: 0

Выходные данные: Max, Min

Кнопка: Рассчитать

б

Имя: Shv Кодировка: TCS5
 Комментарий: Швидкість палет конвеера

Границы: Использовать

Обработка: Использовать

Системные: Основные

Тип: Input

Размерность: м/мин

Период: 1 цикл CALC

Единица измерения: цикл CALC

Автопосылка: Включить

Индекс:

Отработка:

На старте: 0

Архивация: Дополнительно

Параметры: ВП: 4, ВА: 0, ВГ: 0, НГ: 0, НА: 0, НП: 1, Гистерезис: 0

Масштабирование: Масштабирование

Масштабирование: Масштабирование

Исходные данные: In: 1, Множитель: 0, Смещение: 0

Выходные данные: Max, Min

Кнопка: Рассчитать

в

Имя: Zad_vys Кодировка: TCS5
 Комментарий: Задатчик высоты рівня сирих котунів на палетах, без постілі

Границы: Использовать

Обработка: Использовать

Системные: Основные

Тип: Output

Размерность: мм

Период: 1 цикл CALC

Единица измерения: цикл CALC

Автопосылка: Включить

Индекс:

Отработка:

На старте: 240

Архивация: Дополнительно

Параметры: ВП: 300, ВА: 280, ВГ: 260, НГ: 220, НА: 120, НП: 100, Гистерезис: 0

Масштабирование: Масштабирование

Масштабирование: Масштабирование

Исходные данные: A: 0, Смещение: 0, Множитель: 1, Q: 0

Выходные данные: Max, Min

Кнопка: Рассчитать

г

Рисунок 3 – Налаштування каналів Vaga (а), Vys (б), Shv (в) і Zad_vys (г)

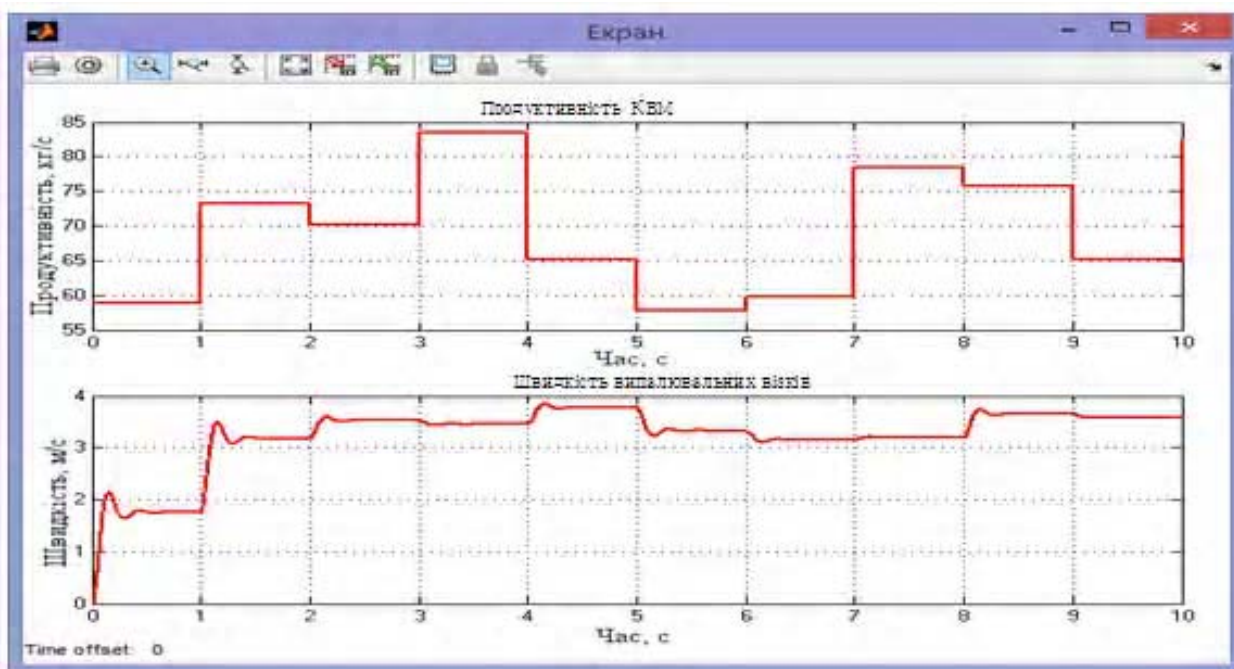


Рисунок 4 – Перехідні процеси продуктивності КМ і регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках КМ

ням конвеєра візків знаходиться поле «Швидкість руху випалювальних візків, м/хв», яке показує значення швидкості візків на основі даних, вимірних датчиком швидкості. Швидкість не перевищує 4 м/с і змінюється в залежності від продуктивності. У нижній частині екрану знаходиться поле «Задатчик висоти шару сирих котунів, мм» із елементом керування у вигляді повзунка зі шкалою. Номінальне значення висоти шару котунів становить 320 мм, з яких 80 мм складає висота постілі, тому дана область на шкалі має зелений колір. Аварійна висота шару, коли є ризик перевантаження електроприводу, на шкалі має червоний колір. У полі жовтого кольору дублюється значення заданої висоти.

На графіку рис. 5 в нижній частині екрану динамічно виводиться значення продуктивності, висоти шару котунів та швидкості випалювальних візків лініями зеленого, червоного та синього кольору відповідно. Вертикальна шкала з лівого краю графіка показує розмірність відображеної величини в залежності від обраного сигналу в нижній частині графіка. Горизонтальна шкала показує час вимірювання параметрів.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз результатів моделювання показав, що запропонована модель забезпечує виконання наступних технічних вимог, що пред'являються до КМ, а саме: регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках зміною швидкості конвеєра, при цьому максимальна висота шару, включаючи постіль, складає 400 мм і коли-

вається у межах, що не перевищують 3%. Максимальна швидкість руху випалюваних візків КМ складає 4 м/хв. Регулювання відбувається на основі аналізу вантажопотоку конвеєра. Кількість котунів на випалювальних візках коливається у межах 20 % при продуктивності 250 т/год, що складає приблизно 55–85 кг/с.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне завдання автоматизації – регулювання швидкості переміщення випалювальних візків вздовж технологічних зон конвеєрної машини, що забезпечує по умовам експлуатації потрібну висоту шару котунів на візках і максимальну продуктивність КМ. Для дослідження технологічних процесів на КМ розроблена математична модель системи автоматичного регулювання швидкості випалювальних візків конвеєрної машини. Для цього використано графічне середовище імітаційного моделювання Simulink пакету для числового аналізу MATLAB.

Для оперативного диспетчерського управління технологічним процесом фабрики огрудкування розроблена сучасна модель інтерфейсу SCADA-системи для регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках і продуктивності КМ з використанням інструментальної системи SCADA TRACE MODE 6. Результати досліджень SCADA-системи регулювання висоти шару котунів на візках і продуктивності конвеєрної машини LURGI-278 показали її працездатність, що вказує на можливість використання в промислових умовах. Запропо-

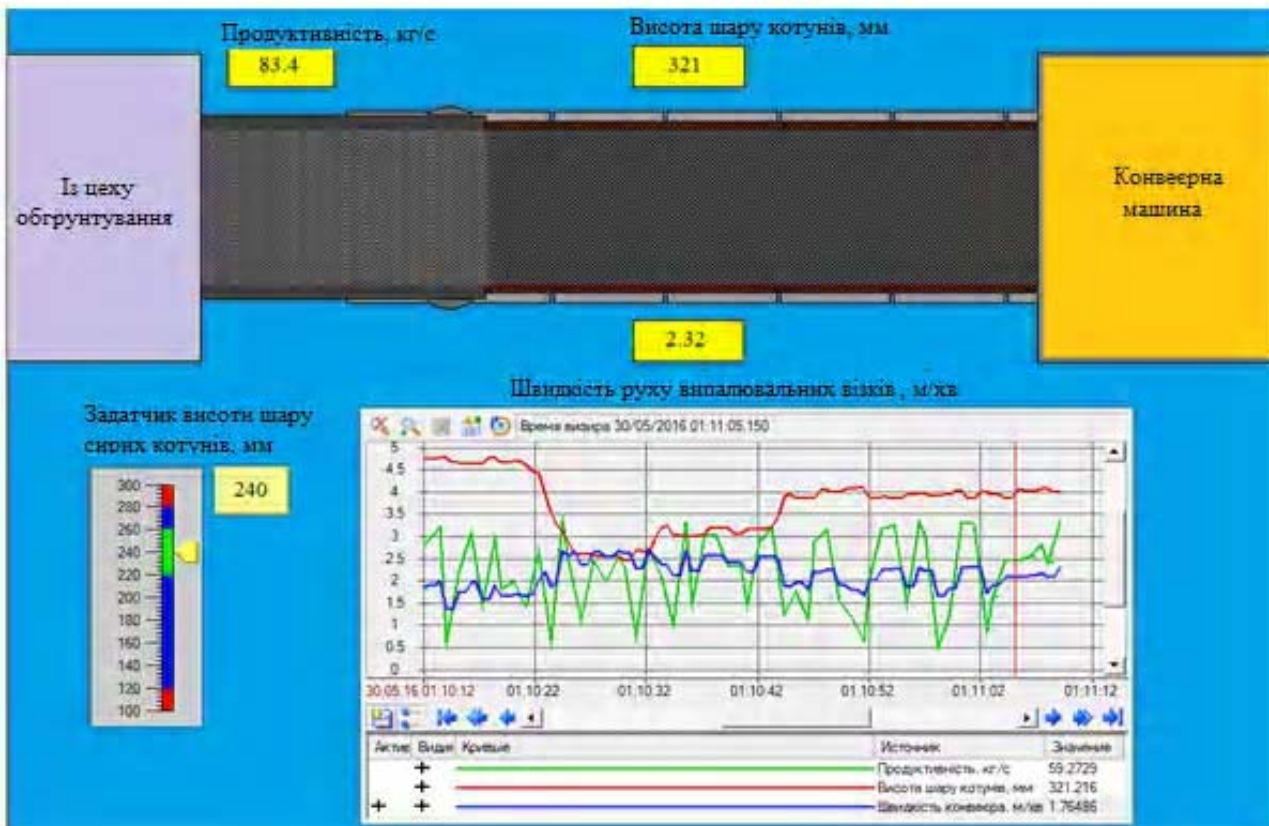


Рисунок 5 – Приклад роботи SCADA-системи при регулюванні висоти шару котунів на випалювальних візках КМ

нована система необхідна для забезпечення виконання технічних вимог при випалюванні котунів на КВ і комфортної роботи оператора з отриманими даними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пирматов Д. С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине / Д. С. Пирматов // Сборник трудов всероссийской конференции : Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ-2010. – Воронеж, 2010. – № 5 – С. 88–89.
2. Дубинина Т. П. Исследования температурного режима формирования окатышей / Т. П. Дубинина // Качество минерального сырья. – 2011. – С. 292–307.
3. Рубан С. А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С. А. Рубан, В. Й. Лобов // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2008. – № 1 – С. 69–74.
4. Vyacheslav Lobov Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine / Vyacheslav Lobov, Karina Lobova, Mykhailo Koltiar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 4. – P. 34–38.
5. Пирматов Д. С. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины / Д. С. Пирматов, В. А. Кривоносов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3 – С. 38–42.
6. Брагин В. В. Автоматизация процесса термообработки окатышей Лурги-278 ОАО «Северный ГОК»: научный проект / Брагин В. В. – Екатеринбург : ТОРЭКС. 2007. – 60 с.
7. Бережной Н. Н. Математическое моделирование температурного поля окатыша / Н. Н. Бережной, В. М. Серебренников, А. В. Зайцев // Вісник Криворізького технічного університету: 36. наук. праць. – Кривий Ріг : КТУ, 2008. – Вип. 20. – С. 188–193.
8. SCADA TRACE MODE в АСУТП обогащения руды Северного ГОКа (Кривой Гор) [Електронний ресурс] // AdAstra Research Group, Ltd. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: www.tracemode.ua/apps/news/gok_obogashenie/.
9. Чумак А. С. Дискретная система нечеткого управления электроприводом обжиговой машины / А. С. Чумак, М. Г. Данилова // Журнал Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 9 – С. 95–97.
10. Чумак А. С. Дискретная система нечеткого управления электроприводом обжиговой машины / А. С. Чумак, М. Г. Данилова // Журнал Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 9 – С. 95–97.
11. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя [Електронний ресурс]: electrono.ru/elektricheskie-mashiny/regulirovanie-chastoty-vrashheniya-asinxronnogo-dvigatelya. – Назва з екрану.
12. Система управляемый преобразователь – асинхронный двигатель [Електронний ресурс]: http://model.exponenta.ru/epivod/glv_050.htm. – Назва з екрану.
13. schneider-electric.com.au: Modernize your Monitor Pro software with less risk, less cost and less effort [Електронний ресурс]: schneider-electric.com.au/documents/product-services/en/services/field-services/monitor-pro-modernization-brochure.pdf. – Назва з екрану.
14. fiord.com: Перенос решений из SCADA [Електронний ресурс]: www.fiord.com/images/industry_avt/soft/pcvue/2015%2010%20-%20Migration%20Factory%20Link%20Ru.pdf. – Назва з екрану.
15. wonderware.kz: Описание программного обеспечения [Електронний ресурс]: wonderware.kz/pdf/Wonderware_InTouch_1015.pdf. – Назва з екрану.
16. Швецов Д. SCADA-система GENESIS32 в сквозной автоматизации производства // ИСУП. – 2007. – № 4. – С. 5.
17. Демида Б. Реалізація принципів паралельного збору інформації на прикладі SCADA- системи «TraceMode» / Б. Демида, Д. Зербіно, Д. Пелешко // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – 2005. – № 543. – С. 3–10.
18. adastra.ru: ТРЕЙС Моуді – інтегрована SCADA-i soft logic-система для розробки АСУТП [Електронний ресурс]: adastra.ru. – Назва з екрану.
19. Кузнецов А. Genesis for Windows – графічна SCADA-система для розробки АСУ ТП // Сучасні технології автоматизації. – 1997. – № 3. – С. 37–41.
20. schneider-electric.com: SCADA Systems [Електронний ресурс]: http://www.schneider-electric.com/solutions/ww/fr/med/20340568/application/pdf/1485_se-whitepaper-letter-scadaoverview-v005.pdf. – Назва з екрану.
21. The Fundamentals of SCADA / Bentley Systems, Incorporated. 2004. – 18 p.
22. Barnes Ken. Review of Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems / Ken Barnes, Briam Johnson, Reva Nickelson // Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. – 2004. – P. 76.
23. Алексеев М. А. Методы повышения надежности распределенных SCADA систем управления авиацией и ПВО ВС Украины / М. А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Новітні технології – для захисту повітряного простору : восьма наукова конференція Харківського Університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 18–19 квітня 2012 р.: тези доповідей. – Харків : ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. – С. 46–47.
24. Андреев Е. Б. SCADA-системы: взгляд изнутри / Е. Б. Андреев, Н. А. Куцевич, О. В. Синенко. – М. : Издательство «РТСофт», 2004. – 176 с.
25. Куцевич Н.А. SCADA-системы. Взгляд со стороны // Промышленные АСУ и контроллеры. – 1999. – № 1. – 4 с.
26. adastra.ru: Крупнейший металлургический завод Китая выбирает TRACE MODE [Електронний ресурс]: www.adastra.ru/news/20040419/. – Назва з екрану.
27. TRACE MODE 6: Интегрированная среда разработки [Електронний ресурс]: <http://www.adastra.ru/products/dev/>. – Назва з екрану.
28. Trace Mode 6 Быстрый старт. Руководство пользователя. – М. : AdAstra Research Group, Ltd, 2006. – 114 с.
29. Спиваковский А. О. Транспортирующие машины : учеб. пособие для машиностроительных вузов. 3-е изд., перераб. / А. О. Спиваковский, В. К. Дьячков. – М. : Машиностроение, 1983. – С. 487.
30. Масандилов Л. Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. / Л. Б. Масандилов, В. В. Москаленко. – М. : Энергия, 1978. – 96 с.
31. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К. : Либідь, 1997. – 544 с.
32. Валюх О. А. Элементы теории автоматического управления : навчальний посібник / О. А. Валюх, В. М. Максимів. – Львів : Афіша, 2002. – 123 с.
33. Бессараб В. И. Проектирование и эксплуатация оборудования фабрик окомкования : справ. изд. / В. И. Бессараб. – Металлургия, 1986. – С. 15.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2016.

Після доробки 16.01.2016.

Лобов В. И.¹, Лобова К. В.²

¹Канд. техн. наук, доцент кафедры информатики, автоматизации и систем управления ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

²Студентка ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТЬЮ ОБЖИГОВЫХ ТЕЛЕЖЕК КОНВЕЙЕРНЫХ МАШИН

Актуальность. Решена актуальная задача разработки современных математических моделей для исследования регулирования скоростью обжиговых тележек конвейерной машины, которая позволяет поддерживать заданный уровень высоты слоя окатышей и обеспечивает оптимальный технологический процесс по обжигу окатышей и максимальную производительность.

Цель работы – представление результатов разработки математической модели для регулирования скорости обжиговых тележек конвейерной машины с реализацией современной SCADA-системы для управления производительностью конвейерной машины путем регулирования скорости перемещения ее обжиговых тележек, которая приводит к изменению высоты слоя окатышей на этих тележках.

Метод. Для оценки динамических характеристик системы электропривода и моделирования регулирования скорости перемещения обжиговых тележек конвейерной машины используется мощный и универсальный метод исследования – графическая среда имитационного моделирования Simulink, который является приложением к пакету для численного анализа MATLAB. При моделировании с использованием Simulink используется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты.

Результаты. В предлагаемой математической модели используются исходные данные конвейерных машин ОК-306 и LURGI-278. Для построения математической модели автоматизированной системы регулирования скорости перемещения обжиговых тележек конвейерной машины выполнены расчеты передаточных функций элементов, входящих в эту систему. В математической модели асинхронный двигатель представлен упрощенной механической и электромагнитной звеньями с обратной связью по скорости, которые определены передаточными функциями. В результате моделирования получены переходные процессы при регулировке высоты слоя окатышей на обжиговых тележках и определено их влияние на производительность конвейерной машины.

Для целесообразности совершенствования АСУТП фабрики окомкования за счет использования математической модели для регулирования скорости движения обжиговых тележек разработана современная модель интерфейса SCADA-системы, которая работает в реальном времени, и дает возможность оперативного диспетчерского управления. Поскольку в системах автоматизированного управления ведущие фабрики окомкования используют инструментальную систему SCADA TRACE MODE 6, то систему регулирования высоты слоя окатышей целесообразно разрабатывать с использованием SCADA TRACE MODE 6.

Выводы. На основе использования выходных данных технологического процесса обжига окатышей на конвейерной обжиговой машине и выполненных расчетов в графической среде Simulink MATLAB построена математическая модель системы для регулирования скорости обжиговых тележек конвейерной машины в соответствии с технологическим процессом позволяет исследовать влияние на процесс обжига окатышей за счет управления высотой слоя окатышей и производительность конвейерной машины.

Предложенную современную модель интерфейса SCADA-системы, которая работает в реальном времени и дает возможность оперативного диспетчерского управления, может быть использовано в реальных промышленных условиях.

Ключевые слова: фабрика окомкования, конвейерная машина, обжиговые тележки, окатыши, скорость, математическая модель, SCADA-система, результаты моделирования.

Lobov V. Y.¹, Lobova K. V.²

¹PhD, Associate Professor of the Department Informatics, Automation and Control Systems SHEI “Kryvyi Rih National University”, Kryvyi Rih, Ukraine

²Student SHEI “Kryvyi Rih National University”, Kryvyi Rih, Ukraine

MODELING SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED REGULATION OF CONVEYOR MACHINES ROASTING TRUCKS

Context. Resolves an actual task of developing advanced mathematical models to study regulation of the roasting trucks speed of the conveyor machine that allows to maintain a predetermined level of height pellet layer and provides optimal process for firing pellets and maximum performance

Objective is a presentation of the mathematical model development results for the regulation roasting trucks speed of the conveyor machine with implementation modern SCADA-system for controlling the conveyor machine performance by regulating its moving speed roasting trucks, which leads to a change of height of the pellet layer on the trucks.

Method. To evaluate the dynamic characteristics of the drive system and the simulation control the speed of movement of the roasting trucks conveyor machine uses a powerful and universal method of research – graphical environment Simulink simulation modeling, which is a supplement to the package MATLAB for numerical analysis. When using Simulink simulation uses the principle of visual programming, in accordance with which the user on the screen of the library of standard blocks and creates a device model performs calculations.

Results. The proposed mathematical model used baseline data of conveyor machines ОК-306 and LURGI-278. To construct a mathematical model of the automated speed control system for moving the roasting trucks conveyor machines have calculated transfer functions of elements included in the system. As a result of simulation obtained transients when adjusting the height of the pellet layer on the roasting carts and determine their impact on the performance of the conveyor machine.

For the feasibility of improving the control system pelletizing plant by the use of a mathematical model for the regulation of the speed of roasting trucks designed modern model interface SCADA-system that works in real time, and enables operational dispatch management. As the SCADA TRACE MODE 6, the height of the pellet layer control system should be developed using SCADA TRACE MODE 6 pelletizing plant systems leading automated management tool using the system.

Conclusions. On the basis of the use of the output of the technological process of roasting of the pellets on the conveyor of the burning car and the calculations in a graphical environment Simulink MATLAB built a mathematical model of the system for controlling the speed of the roasting trucks conveyor machine in accordance with technological process allows to investigate influence on pellet burning process by controlling the height of the pellet layer and the performance of the conveyor machine.

The proposed model of a modern SCADA-system interface that works in real time and enables operational dispatch management, can be used in real industrial environments.

Keywords: pelletizing factory, conveyor machine, roasting trucks, pellets, speed, mathematical model, SCADA-system simulation, the simulation results.

REFERENCES

1. Pirmatov D. S. Matematicheskaya model' teplovoy obrabotki okatyshey v obzhigovoy mashine [Tekst], *Sbornik trudov vserossiyskoy konferentsii: Novyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovani, upravlenii, proizvodstve NT-2010*. Voronezh, 2010, No. 5, pp. 88–89.
2. Dubinina T. P. Issledovaniya temperaturnogo rezhima formirovaniya okatyshey, *Kachestvo mineral'nogo syr'ya*, 2011, pp. 292–307.
3. Ruban S. A., Lobov V. Y. Rozrobka printsipiv keruvannya temperaturnim rezhimom protsesu vipalyuvannya kotuniv z vikoristannyam prognozuyuchikh ANFIS-modeley [Tekst], *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2008, No. 1, pp. 69–74.
4. Vyacheslav Lobov, Karina Lobova, Mykhailo Koltiar Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 4, pp. 34–38.
5. Pirmatov D. S., Krivonosov V. A. Optimizatsiya rezhima termoobrabotki okatyshey v ASU TP konveyernoy obzhigovoy mashiny, *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2013, No. 3, pp. 38–42.
6. Bragin V. V. Avtomatizatsiya protsesa termoobrabotki okatyshey Lurgi-278 OAO «Severnyy GOK»: nauchnyy proyekt. Yekaterinburg, TOREKS. 2007, 60 p.
7. Berezhnoy N. N., Serebrenikov V. M., Zaytsev A. V. Matematicheskoye modelirovaniye temperaturnogo polya okatysya, *Visnik Krivoriz'kogo tekhnichnogo universitetu: Zb. nauk. prats'*. Kriviy Rig: KTU, 2008, Vip. 20, pp. 188–193.
8. SCADA TRACE MODE v ASUTP obogashcheniya rudy Severnogo GOKa (Krivoy Rog) [Yelettronniy resurs], *AdAstra Research Group, Ltd*, 2015. Rezhim dostupu do resursu: www.tracemode.ua/apps/news/gok_obogashenie
9. Chumak A. S., Danilova M. G. Diskretnaya sistema nechetkogo upravleniya elektroprivodom obzhigovoy mashiny, *Zhurnal Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 9, pp. 95–97.
10. Chumak A. S., Danilova M. G. Diskretnaya sistema nechetkogo upravleniya elektroprivodom obzhigovoy mashiny, *Zhurnal Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 9, pp. 95–97.
11. Regulirovaniye chastoty vrashcheniya asinkhronnogo dvigatelya [Yelettronniy resurs]: electrono.ru/elektricheskie-mashiny/regulirovanie-chastoty-vrashheniya-asinxronnogo-dvigatelya. Nazva z yekranu
12. Sistema upravlyayemyy preobrazovatel' – asinkhronnyy dvigatel' [Yelettronniy resurs]: http://model.exponenta.ru/epivod/gly_050.htm. Nazva z yekranu.
13. schneider-electric.com.au: Modernize your Monitor Pro software with less risk, less cost and less effort [Yelettronniy resurs]: schneider-electric.com.au/documents/product-services/en/services/field-services/monitor-pro-modernization-brochure.pdf. Nazva z yekranu.
14. fiord.com: Perenos resheniy iz SCADA [Yelettronniy resurs]: www.fiord.com/images/industry_avt/soft/pcvue/2015%2010%20%20Migration%20Factory%20Link%20Ru.pdf. Nazva z yekranu.
15. wonderware.kz: Opisaniye programmnoy obespecheniya [Yelettronniy resurs]: wonderware.kz/pdf/Wonderware_InTouch_1015.pdf. Nazva z yekranu.
16. Shvetsov D. SCADA-sistema GENESIS32 v skvoznoy avtomatizatsii proizvodstva, *ISUP*, 2007, No. 4, 5 p.
17. Demida B., Zerbino D., Peleshko D. Realizatsiya printsipiv paralelnogo zboru informatsii na prikladi SCADA-sistemi "TraceMode", *Vysnik Nats. un-tu "Lviv's'ka politekhnika" "Komp'yuterni nauki ta informatssyns texnologii"*, 2005, No. 543, pp. 3–10.
18. adastra.ru: TREYS Moudi – integrovana SCADA-i soft logic-sistema dlya rozrobki ASUTP [Yelettronniy resurs]: adastra.ru. Nazva z yekranu.
19. Kuznetsov A. Genesis for Windows – grafichna SCADA-sistema dlya rozrobki ASU TP, Suchasni tekhnologii' avtomatyzatsii', 1997, No. 3, pp. 37–41
20. schneider-electric.com: SCADA Systems [Yelettronniy resurs]: http://www.schneider-electric.com/solutions/ww/fr/med/20340568/application/pdf/1485_se-whitepaper-letter-scadaoverview-v005.pdf. Nazva z yekranu.
21. The Fundamentals of SCADA/ Bentley Systems, Incorporated. 2004, 18 p.
22. Barnes Ken, Briam Johnson, Reva Nickelson Review of Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems, *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory*, 2004, P. 76.
23. Alekseyev M. A., Sirotkina Ye. I. Metody povysheniya nadezhnosti raspredelennykh SCADA sistem upravleniya aviatsiyey i PVO VS Ukrainy, *Novitni texnologii tekhnologii zakhistu povitryanogo prostoru: Vos'ma naukova konferentsiya Kharkivs'kogo Universitetu Povitryanikh Sil imenu Ivana Kozheduba, 18–19 kvitnya 2012 r.: tezi dopovidey*. Kharkiv, KHUPS im. I. Kozheduba, 2012, pp. 46–47.
24. Andreyev Ye. B., Kutsevich N. A., Sinenko O. V. SCADA-sistemy: vzglyad iznutri. Moscow, Izdatel'stvo «RTSoft», 2004, 176 p.
25. Kutsevich N.A. SCADA-sistemy. Vzglyad so storony, *Promyshlennyye ASU i kontrolyery*, 1999, No. 1, 4 p.
26. adastra.ru: Krupneyshiy metallurgicheskii zavod Kitaya vybirayet TRACE MODE [Yelettronniy resurs]: www.adastra.ru/news/20040419/. Nazva z yekranu.
27. TRACE MODE 6: Integrirovannaya sreda razrabotki [Yelettronniy resurs]: <http://www.adastra.ru/products/dev/>. Nazva z yekranu.
28. Trace Mode 6 Bystryy start. Rukovodstvo pol'zovatelya. Moscow. AdAstra Research Group, Ltd, 2006, 114 p.
29. Spivakovskiy A. O., D'yachkov V. K. Transportiruyushchiye mashiny: Ucheb. posobiye dlya mashinostroitel'nykh vuzov. 3-ye izd., pererab. Moscow, Mashinostroyeniye, 1983, P. 487.
30. Masandilov L. B., Moskalenko V. V. Regulirovaniye chastoty vrashcheniya asinkhronnykh dvigateley. 2-ye izd., pererab. i dop. Moscow, Energiya, 1978, 96 p.
31. Popovich M. G., Koval'chuk O. V. Teoriya avtomatichnogo keruvannya: Pidruchnik. Kiev, Libid', 1997, 544 p.
32. Valyukh O. A., Maksimiv V. M. Yelementi teorii avtomatichnogo keruvannya. Navchal'nyy posibnik. L'viv, Afisha, 2002, 123 p.
33. Bessarab V. I. Proyektirovaniye i ekspluatatsiya oborudovaniya fabrik okomkovaniya : sprav. Izd. Metallurgiya, 1986, P. 15.

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем
Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна

²Аспірант кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії
харчових технологій, Одеса, Україна

ПРИНЦИПИ, АЛГОРИТМИ І РЕЗУЛЬТАТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ

Актуальність. Самоналагодження параметрів регуляторів є актуальним при керуванні об'єктами технологічного типу, тому що зміни властивостей сировини й енергоносіїв, деградація устаткування в ході технологічного процесу змінюють не тільки значення керованих змінних, але й характер власного руху систем автоматичного регулювання в замкнутому контурі. У математичних моделях такі впливи відносять до параметричних збурень і відображають їх у тому числі за допомогою змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування. Для ряду технологічних об'єктів керування діапазон його зміни може перевищувати значення десять. При цьому типові системи регулювання з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість і переходять у позиційний режим роботи. Щоб зберегти компроміс між показниками якості й стійкістю процесів у системі з такими об'єктами, необхідно використовувати самоналагодження параметрів регулятора.

Мета. Підвищення ефективності самоналагоджувальної системи керування, яка для ідентифікації змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування використовує складову власного руху.

Метод. Пропонується вдосконалення принципів і алгоритмів роботи самоналагоджувальної системи, які підвищують її стійкість і динамічну точність. Для цього в склад вихідної системи включаються нові ланки і зв'язки. Враховуючи наявність у системі нелінійних і нестационарних ланок, для її дослідження обране імітаційне моделювання в середовищі Simulink пакета програм Matlab.

Результати. Сплановані і проведені комп'ютерні експерименти з моделями альтернативних структур системи за умов, які наближені до реальних умов її функціонування. Проведене тестування типовими моделями змін коефіцієнта передачі об'єкта. Отримані графіки і числові показники, що характеризують ефективність роботи самоналагоджувальної системи вихідної і удосконаленої структур.

Висновки. Для підвищення стійкості і динамічної точності системи необхідно зменшити інерційність її контуру самоналагодження, вплив фазових зрушень фільтрованих змінних у цьому контурі на формування оцінок імовірносних характеристик, а також вплив коефіцієнта передачі об'єкта на похибку регулювання контуру самоналагодження.

Ключові слова: самоналагоджувальна САК, коефіцієнт передачі, власний рух, смуговий фільтр, оптимальний параметричний синтез.

НОМЕНКЛАТУРА

A^z – константа, яка визначає запас стійкості лінійної САР;

$\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}(t, \tau_{oc})$ і $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}(t, \tau_{oc})$ – оцінки середньоквадратичних відхилень змінних на виходах обчислювачів оцінок;

$f_k(t)$ – координатні неконтрольовані збурювання;

$f_p(t)$ – параметричні неконтрольовані збурювання;

$f_n(t)$ – широкосмугові шуми;

k_o – коефіцієнт передачі ОК;

k_m – коефіцієнт передачі моделі ОК;

k_r – коефіцієнт передачі регулятора САР;

L – логічна функція перемикавання;

t_n, t_{mod} – моменти часу, відповідні до початку й кінцю моделювання;

$y(t)$ – керована змінна, як функція часу t ;

$y^z(t)$ – задане значення керованої змінної;

$\tilde{y}(t)$ – складова $y(t)$, яка характеризує власний рух у замкнутому контурі САР (середньочастотна);

$y_l(t)$ – складова $y(t)$, викликана координатними збуреннями $f_k(t)$ (низькочастотна);

$y_n(t)$ – складова $y(t)$, викликана шумами $f_n(t)$ (високочастотна);

$y_m(t)$ – змінна на виході моделі ОК;

$\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)$ – змінні на виходах смугових фільтрів;

s – оператор диференціювання;

t_{oc} – ковзний інтервал часу усереднення змінних;

W – передатний оператор;

ω_L, ω_H – частоти зрізів смугових фільтрів у низькочастотній і високочастотній області;

σ^z – задане значення середньоквадратичного відхилення;

АЧХ – амплитудо-частотна характеристика;

ОК – об'єкт керування;

САР – система автоматичного регулювання;

САРС – САР самоналагоджувальна;

САК – система автоматичного керування;

ФНЧ – фільтр низької частоти.

ВСТУП

Питання самоналагодження було й залишається актуальним при керуванні об'єктами технологічного типу [1], тому що зміни властивостей сировини й енергоносіїв, деградація устаткування в ході технологічного процесу змінюють не тільки значення керованих змінних, але й характер власного руху систем автоматичного регулювання (САР) у замкнутому контурі. У математичних моделях такі впливи відносять до параметричних збурень і відображають їх у тому числі за допомогою змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування. Для ряду технологічних об'єктів керування (ОК) діапазон його зміни може перевищувати значення десять [2]. При цьому типові САР з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість «у малому» і переходять у позиційний режим роботи. Щоб зберегти компроміс між показниками якості й стійкістю процесів у САР такими ОК, необхідно використовувати самоналагодження параметрів регулятора.

Об'єкт дослідження в даній статті – самоналагоджувальна система автоматичного керування об'єктом технологічного типу.

Предмет дослідження – принципи підвищення стійкості і динамічної точності контура самоналагодження.

Мета досліджень – показати можливості вдосконалювання алгоритмів самоналагодження як способу підвищення ефективності систем керування об'єктами технологічного типу.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розроблена вдосконалена структура САРС, яка представлена на рис. 1. Вона включає до свого складу елементи вихідної структури, що показані без виділення кольором і додаткові елементи, що виділені кольором. Математична модель системи, яка відповідає цій структурній схемі, представлена двома взаємозалежними системами диференціальних і алгебраїчних рівнянь: (1)–(3) – для САР і (4)–(16) – для блоку самоналагодження.

$$\left\{ \begin{aligned} y_o(t) &= W^o(s) \cdot (u(t) + f_k(t)) \cdot k_o(t) + f_n(t), & (1) \\ y(t) &= W^{lf}(s) \cdot y_o(t) + y(t=0), & (2) \\ u(t) &= W^r(s) \cdot e(t) \cdot k_r(t) + u(t=0) = \\ &= W^r(s) \cdot (y^z - y(t)) \cdot k_r(t) + u(t=0). & (3) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} y_m(t) &= W^m(s) \cdot u(t), & (4) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_a(t) &= W^{bf}(s) \cdot y(t), & (5) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_{ma}(t) &= W^{bf}(s) \cdot y_m(t), & (6) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_L(t) &= L(\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)), & (7) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_k(t) &= \begin{cases} \tilde{y}_a(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_a(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases}, & (8) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{y}_{mk}(t) &= \begin{cases} \tilde{y}_{ma}(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_{ma}(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases}, & (9) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t) &= \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_k^2(t)}, & (10) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t) &= \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_{mk}^2(t)}, & (11) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1(t) &= \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t) \cdot u_{sd}(t), & (12) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_2(t) &= \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t) \cdot u_{sd}(t) \cdot k_m(t), & (13) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} k_m(t) &= W^{pr}(s) \cdot e_1(t) + k_m(t=0) = \\ &= W^{pr}(s) \cdot (\sigma_1(t) - \sigma_2(t)) + k_m(t=0), & (14) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_{sd}(t) &= W^{sd}(s) \cdot e_2(t) + u_{SD}(t=0) = \\ &= W^{sd}(s) \cdot (\sigma^z - \sigma_1(t)) + u_{sd}(t=0), & (15) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} k_r(t) &= A^z / k_o(t). & (16) \end{aligned} \right.$$

Ставиться завдання порівняти точність САРС вихідної структури й удосконаленої САРС за показниками

$$I_1 = \int_{t_n}^{t_{mod}} e^2(t) dt / (t_{mod} - t_n), \quad (17)$$

$$I_3 = \int_{t_n}^{t_{mod}} (k_o(t) - k_m(t))^2 dt / (t_{mod} - t_n). \quad (18)$$

при впливі на систему координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$ випадкового характеру, тестових змін параметричних збурень $f_p(t) = k_o(t)$ лінійного, гармонійного й стрибкоподібного виду.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Як правило, нормативи й правила виконання технологічних процесів накладають обмеження на алгоритми (способи) самоналагодження [1]. Самоналагодження за рахунок подачі на систему керування штучних тестових сигналів, перевід її в розімкнутий режим або на межу стійкості часто неприйнятні, тому що виникає ризик порушень регламентів. У таких умовах, на наш погляд, кращими є алгоритми самоналагодження, які припускають пасивну ідентифікацію поточних значень змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Вона використовує природно виникаючі рухи керованої змінної $y(t)$ у замкнутому контурі системи керування при впливі на процес зовнішніх неконтрольованих координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$ випадкового характеру [4]. Така можливість з'являється завдяки тому, що для більшості ОК технологічного типу в спектральному складі керованої змінної $y(t)$ вдається виділити складову власного руху САР (її замкнутого контуру), яка проявляється у вигляді випадкових коливань середньої частоти $\tilde{y}(t)$ на тлі більш низькочастотних коливань $y_l(t)$, викликаних координатними збуреннями $f_k(t)$, і більш високочастотних коливань $y_n(t)$, викликаних шумами $f_n(t)$. Для виділення $\tilde{y}(t)$ доцільно використовувати лінійні смугові фільтри, рекомендації з вибору яких наведені в [5]. Оскільки $\tilde{y}(t)$ – випадковий процес, то змінний у часі коефіцієнт передачі $k_o(t)$ ОК будуть характеризувати не миттєві значення $\tilde{y}(t)$, а його усереднені в часі параметри, зокрема, оцінка дисперсії $\hat{D}_{\tilde{y}}(t_{oc}, t)$, отримана на ковзному інтервалі часу t_{oc} . В [5] показано, що оцінка $\hat{D}_{\tilde{y}}(t_{oc}, t)$ пропорційна $k_o^2(t)$ ОК. Після визначення поточних значень $k_o(t)$, може бути обчислений і коефіцієнт передачі $k_r(t)$ регулятора САР, який забезпечує заданий ступінь її стійкості. Самоналагоджувальна САР вихідної структури розглянута в [6], де досліджувався вплив змін спектрального складу координатних збурень і шумів на показники якості її роботи при різних параметрах блоку самоналагодження.

Поряд з позитивними якостями, результати моделювання САРС вихідної структури показують недостатню точність підстроювання коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі до змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Перелік причин низької точності розглянемо нижче.

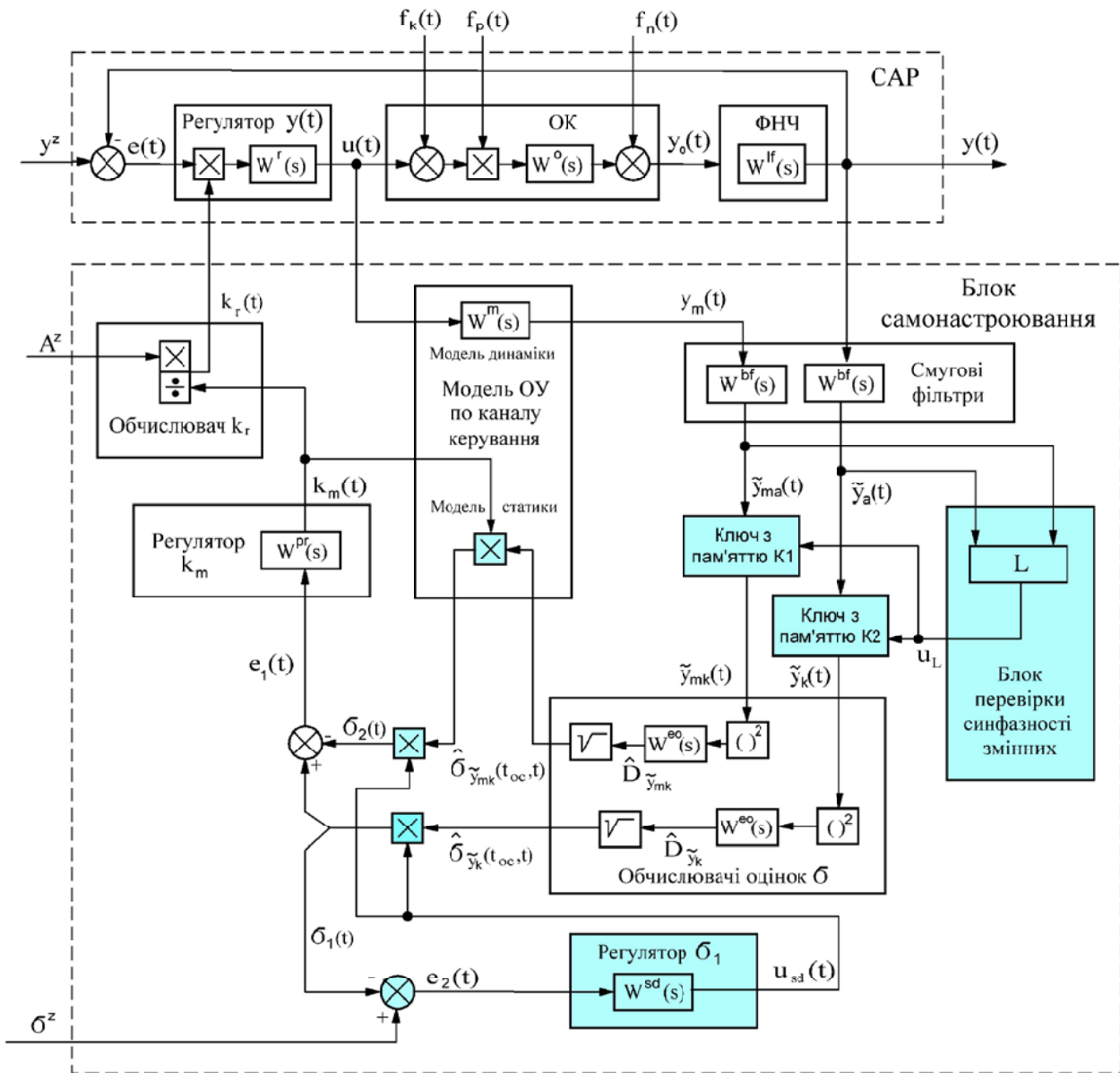


Рисунок 1 – Структурна схема САРС

Перша причина. У ланцюг зворотного зв'язку регулятора k_m входять інерційності смугових фільтрів і обчислювачів оцінок, що змушує обмежувати коефіцієнт передачі регулятора k_m для збереження стійкості контуру самоналагодження. Це неминуче позначається на точності відтворення змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК.

Друга причина. Зміна коефіцієнта передачі об'єкта $k_o(t)$ не викликає фазового зрушення фільтрованих змінних ОК і його моделі $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ у часі, тому що при цьому буде змінюватися амплітуда змінних, але їх фази (знаки) залишаються однаковими. А розбіжність динамічних властивостей об'єкта керування і його моделі, тобто неоднакові запізнення й інерційності викличуть фазове зрушення змінних $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$. Крім того, у реальних умовах у складі збурень можуть з'являтися, наприклад, східчасті складові. Вони приводять до появи в складі керованої змінної $y(t)$ складових широкого спектрального складу, з яких середньочастотні складові не

можуть бути відфільтровані смуговими фільтрами. Це також викликає фазові зрушення між змінними $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$. Важливо, що всі розглянуті фазові зрушення цих змінних змінюють поточну різницю оцінок $e_1(t)$ без змін при цьому коефіцієнта передачі об'єкта керування. САРС вихідної структури не враховує природу появи поточної різниці $e_1(t)$, а саме виникла вона в результаті зміни коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта або в результаті фазових зрушень змінних $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$. Це й зменшує точність визначення коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі об'єкта керування.

Третя причина пов'язана із змінним коефіцієнтом передачі контуру самоналагодження. При зменшенні коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування зміни керованої змінної $y(t)$, викликані змінами і збурень і керуючих впливів, зменшуються. А це приводить до зменшення абсолютних значень поточної різниці оцінок $e_1(t)$. У випадку збільшення коефіцієнта передачі об'єкта різниця,

навпаки – збільшується. Т.ч., у САРС вихідної структури при змінах коефіцієнта передачі об'єкта $k_o(t)$ змінюється коефіцієнт передачі контуру самоналагодження. При високих коефіцієнтах передачі контуру самоналагодження процеси в ньому будуть мати високу коливальність, а при низьких – будуть повільними. Це, в обох випадках, знижує точність визначення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо принципи підвищення ефективності контуру самоналагодження, які реалізуються додатковими елементами САРС. Результати їх застосування будуть проілюстровані нижче в розділі «Результати».

1. Зменшення інерційності контуру самоналагодження. Досягається за рахунок виключення з контуру регулятора k_m послідовно включених інерційностей смугових $W^{bf}(s)$ і осереднюючих $W^{eo}(s)$ фільтрів. Блок множення, який реалізує модель статичної ОК, конкретніше – модель його коефіцієнта передачі $k_m(t)$ переноситься від моделі динаміки ОК $W^m(s)$ до виходу обчислювача оцінки $\hat{G}_{\tilde{y}_{mk}}$. Контур самоналагодження стає малоінерційним. У результаті поліпшується його динаміка й розширюється запас стійкості, а також знімається проблема установки початкових умов в інерційних ланках. Це дозволяє збільшити коефіцієнт передачі контуру самоналагодження й підвищити динамічну точність відтворення коефіцієнтом передачі $k_m(t)$ моделі змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК при збереженні запасу стійкості контуру.

2. Зменшення впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження. Досягається за рахунок включення до складу системи блоку перевірки синфазності змінних і ключів з пам'яттю К1, К2. Алгоритм їх функціонування наступний. Коли змінні $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ змінюються синфазно (знаки їх однакові), вплив негативних факторів, розглянутих раніше, мінімальний. У такі інтервали часу блок перевірки синфазності змінних встановлює індикатор $u_i=1$, замикаються ключі К1, К2 і їх вихідні змінні $\tilde{y}_k(t)$ й $\tilde{y}_{mk}(t)$ повторюють змінні $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ на входах. Коли синфазність $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$ під впливом негативних факторів порушується, блок перевірки синфазності змінних у момент часу t_k встановлює індикатор $u_i=0$, ключі К1, К2 розмикаються й на їхніх виходах запам'ятовуються й зберігаються на всьому поточному інтервалі порушень синфазності значення $\tilde{y}_a(t=t_k)$, $\tilde{y}_{ma}(t=t_k)$.

3. Стабілізація оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої керованої змінної об'єкта на заданому значенні із одночасним пропорційним масштабуванням оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої змінної його моделі. Досягається за рахунок включення до складу САРС регулятора σ_1 і двох блоків множення, які виконують функцію масштабування. При змінах коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК регулятор, змінюючи керуючий вплив $u_{sd}(t)$, стабілізує значення змінної на заданому рівні. Стабілізація здійснюється масштабуванням оцінки до значення (12). Щоб зберегти пропорційність змінних, також одночасно масштабується й оцінка до значення (13). Т.ч., змінні значення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК вже менше

впливають на значення помилки регулювання $e_1(t)$ контуру самоналагодження. Тому надалі будемо формулювати цей принцип більш коротко – стабілізація нормованої помилки контуру самоналагодження.

Оскільки в структурі САРС є кілька взаємозалежних контурів регулювання, нелінійні й нестационарні ланки, то аналітичне рішення задач її аналізу утруднене. Тому для дослідження системи обране імітаційне моделювання в середовищі Simulink пакета програм Matlab, у якому проведений багатфакторний комп'ютерний експеримент із моделями ОК й збурень, що характерні для об'єктів технологічного типу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

В комп'ютерних експериментах використовувалися наступні моделі.

Передатні функції «еквівалентного» ОК – інерційної частини ОК й ФНЧ:

$$W^o(s) = \frac{1}{T_o s + 1} \cdot \exp(-\tau_o s),$$

$$W^{lf}(s) = \frac{\omega_{lf}^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_{lf} s + \omega_{lf}^2}, \quad (17)$$

де $\tau_o = 1$, $T_o = 2$ – нормовані значення часу запізнення й постійної часу [7]; $\omega_{lf} = 3$ – частота зрізу ФНЧ. В (2) $y(t=0) = y_o(t)$.

Параметричні збурення – змінний коефіцієнт передачі ОК:

$$f_p(t) = k_o(t) = 1 + s_l \cdot t, \quad (18a)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = 4 \cdot \sin(0,005 \cdot t), \quad (18б)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1 + 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t), & 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t) \geq 0 \\ 1 + 0,55 \cdot \sin(0,005 \cdot t), & 6 \cdot \sin(0,005 \cdot t) < 0 \end{cases}, \quad (18в)$$

або
$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}, \quad (18г)$$

де $s_l = 0,002$ або $s_l = -0,002$.

Координатні збурення:

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = -5 + \tilde{f}_k(t), \quad (19a)$$

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = \tilde{f}_k(t) - 5 + \begin{cases} 1, & t < 150 + 150 \cdot n \\ 0, & t \geq 150 + 150 \cdot n \end{cases}, \quad (19б)$$

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = \tilde{f}_k(t) - 5 + \begin{cases} 1, & t < 300 + 300 \cdot n \\ -1, & t \geq 300 + 300 \cdot n \end{cases}, \quad (19в)$$

де m_{fk} – детермінована складова; $\tilde{f}_k(t)$ – випадкова складова, яка формувалася за допомогою фільтра з передатною функцією $W^{fk}(s) = \omega_{fk}^2 / (s^2 + 1,414 \cdot \omega_{fk} s + \omega_{fk}^2)$ із сигналу псевдобілого шуму при частоті зрізу $\omega_{fk} = 0,5$ рад/с; n – ціла частина від $t_{mod} / 150$, t_{mod} – час моделювання.

Високочастотні шуми $f_n(t)$ формувалися із сигналу псевдобілого шуму за допомогою смугового фільтра з передатною функцією

$$W_1^{fn}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot 6s + 6^2} \cdot \frac{8^2}{s^2 + 1,414 \cdot 8s + 8^2} \quad (20)$$

Передатна функція інерційної частини регулятора $y(t)$:

$$W^r(s) = 1 + 1/T_{iz}s + 1/T_{iz}T_{iz1}s^2, \quad (21)$$

де $T_{iz}=3,15$, $T_{iz1}=8,33$ – постійні часу. Їхні значення, як і $k_r(t=0) = A^z = 1,63$, відповідають мінімуму інтегрального квадратичного критерію помилки регулювання. Підстави для вибору $W^r(s)$ представлені в [8]. В (3) $u(t=0) = y(t=0)/k_o(t)$.

Передатна функція моделі динаміки ОК:

$$W^m(s) = \frac{1}{(T_ms + 1)} \cdot \exp(-\tau_ms), \quad (22)$$

де $\tau_m = 1,55$; $T_m = 2$ – значення часу запізнення й постійної часу. Первісне значення τ_m дорівнює $\tau_o^{ekv} = 1,55$ «еквівалентного» ОК з урахуванням ФНЧ (17).

Передатна функція лінійних смугових фільтрів:

$$W^{bf}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_L s + \omega_L^2} \cdot \frac{\omega_H^2}{s^2 + 1,414 \cdot \omega_H s + \omega_H^2}, \quad (23)$$

де ω_L , ω_H – частоти зрізу в низькочастотній і високочастотній області фільтрів Баттерворта [9]). Чисельні значення частот зрізів визначаються в процедурі оптимізації.

Індикатор блоку перевірки синфазності змінних:

$$u_L(t) = L(\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)) = \begin{cases} 1, \text{sgn}(\tilde{y}_a(t)) \cdot \text{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)) = 1 \\ 0, \text{sgn}(\tilde{y}_a(t)) \cdot \text{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)) = -1 \end{cases} \quad (24)$$

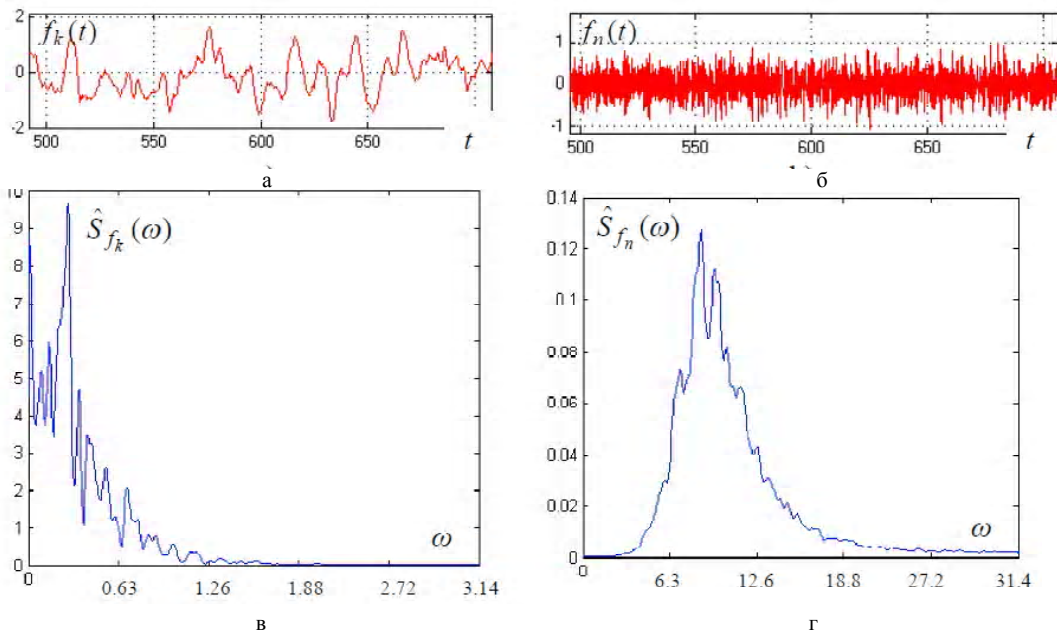


Рисунок 2 – Фрагменти реалізацій у часі (а, б) і оцінки спектральної щільності (в, г) координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$, які впливають на САР

Передатна функція осереднюючих фільтрів:

$$W^{oe}(s) = \frac{1}{(T_{oe}s + 1)} \quad (25)$$

для експонентного усереднення випадкових процесів $\tilde{y}_k^2(t)$, $\tilde{y}_{mk}^2(t)$ на ковзному інтервалі $t_{oc} = 2 \cdot T_{oe}$ і розрахунку оцінок $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$ [10]. Чисельне значення T_{oe} визначається в процедурі оптимізації.

Передатна функція регулятора k_m :

$$W^{Pr}(s) = k_{pr}(1 + 1/T_{izp}s + 1/T_{izp}T_{izp1}s^2), \quad (26)$$

де k_{pr} ; T_{izp} , T_{izp1} – коефіцієнт передачі й постійні часу. Їхні чисельні значення визначаються в процедурі оптимізації.

В (14) $k_m(t=0) = k_o(t=0) = 1$.

Передатна функція регулятора σ_1 :

$$W^{sd}(s) = k_{sd}(1 + 1/T_{isd}s), \quad (27)$$

де k_{sd} ; T_{isd} – коефіцієнт передачі й час ізодрому. Їхні чисельні значення визначаються в процедурі оптимізації. В (15) $u_{sd}(t=0) = 1$.

Мета проведення експериментів – визначити точність підтримки керованої змінної на заданому значенні і точність визначення поточних значень коефіцієнта передачі моделі відносно коефіцієнта передачі об’єкта керування при різних варіантах структури САРС.

Слід зазначити, що показник (17) був обраний у якості критерію при оптимізації роботи САРС. Його мінімум забезпечувався добором параметрів (23), (25)–(27) за допомогою програми Design Optimization пакета Matlab. Показник (18) служить для оцінки точності самоналагодження коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ до змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Комп’ютерні експерименти передбачали цілеспрямоване імітаційне моделювання варіантів структурних схем по рис. 1 у середовищу Simulink пакета програм Matlab.

При проведенні комп'ютерних експериментів необхідно було забезпечити попередньо прийняті умови про низькочастотний характер координатних збурень $f_k(t)$ і високочастотний характер шумів $f_n(t)$ щодо частотної області, де спостерігається власний рух САР об'єктом технологічного типу.

Дані рисунків 2 і 3 підтверджують коректність вибору моделей збурень і шумів для даної САР.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

1. Зменшення інерційності контуру самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 4. Він дозволяє по характеру зміни змінних $k_o(t)$, $k_m(t)$ порівняти стійкість і динамічну точність САРС вихідної структури і САРС із малоінерційним контуром самоналагодження.

Відзначимо, що даний рисунок відбиває динаміку цих варіантів системи для конкретного прикладу, тобто при впливі координатних збурень (19а), шумів (20) і при збігу динамічних властивостей моделі (22) з ОК (17). Разом з тим, характер реакції змінних САРС на зменшення ко-

ефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК був подібним для всього широкого діапазону функціонування, який розглядався при моделюванні системи. Аналіз рис. 4 показує:

– у САРС вихідної структури зміни коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ у період часу, який передує зоні нестійкої роботи, носять низькочастотний характер у порівнянні зі змінами керованої змінної $y(t)$. Для розглянутого прикладу середньоквадратична частота коливань $k_m(t)$ $f_{k_m}^{ms} = 1/T_{k_m}^{ms} \approx 0,006$ Гц, а для $y(t)$ $f_y^{ms} = 1/T_y^{ms} \approx 0,1$ Гц (див. рис. 4а). Відповідно, нормовані значення середньоквадратичних періодів $T_{k_m}^{msn} = T_{k_m}^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 103$ і $T_y^{msn} = T_y^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 6,5$. При зменшенні $k_o(t)$ виникають досить тривалі відрізки часу $T_{k_m}^{ms} / 2 \approx 80$ с, на яких $k_m(t)$ під впливом координатних збурень $f_k(t)$ наближається до нуля. На цих відрізках коефіцієнт передачі $k_o(t)$ регулятора $y(t)$, який визначається обчислювачем k_p , суттєво зростає. САР стає нестійкою, а САРС непрацездатною;

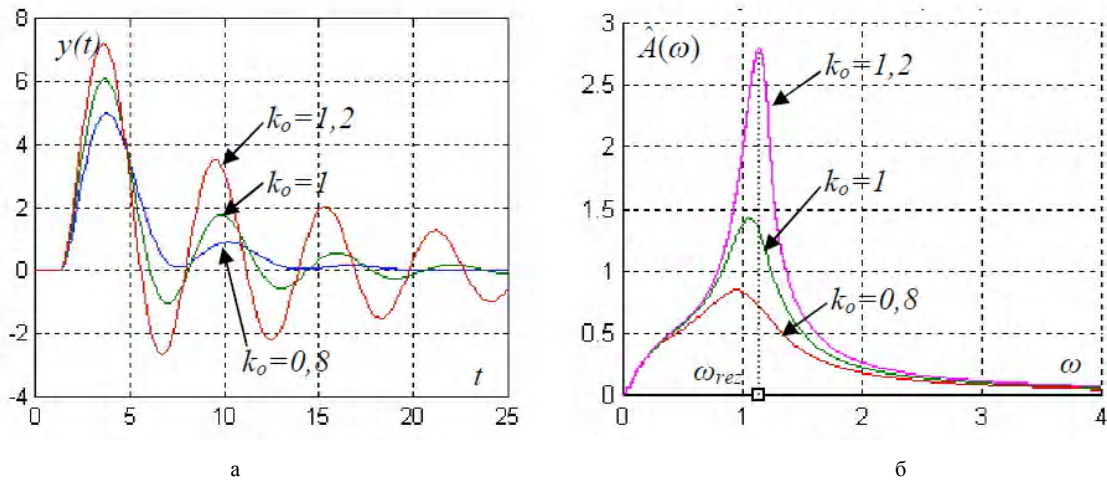


Рисунок 3 – Перехідні (а) і амплітудо-частотні (б) характеристики САР при різних коефіцієнтах передачі k_o ОК (ω_{rez} – резонансна частота)

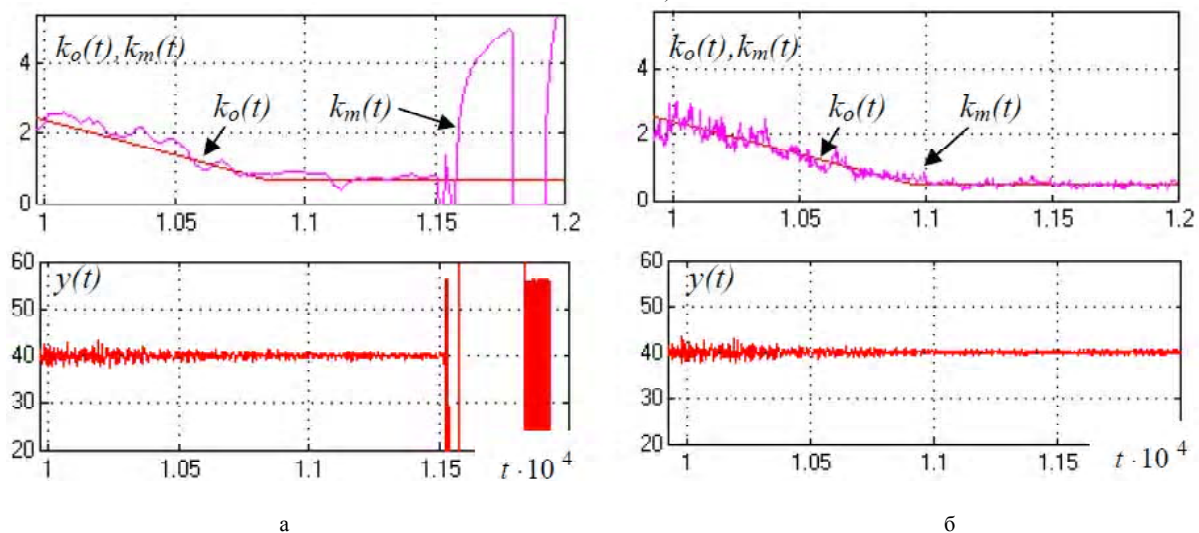
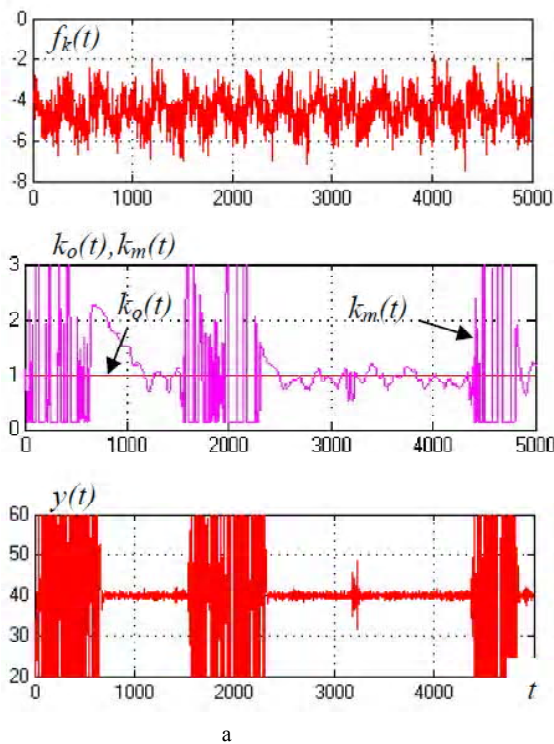


Рисунок 4 – Фрагменти змін змінних САРС на зменшення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК:
 а – вихідної структури; б – системи із малоінерційним контуром самоналагодження

– у САРС із малоінерційним контуром самоналагодження зміни коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ більш високочастотні. Для розглянутого прикладу середньоквадратична частота коливань $k_m(t)$ $f_{k_m}^{ms} = 1/T_{k_m}^{ms} \approx 0,04$ Гц, а для $y(t)$ $f_y^{ms} = 1/T_y^{ms} \approx 0,12$ Гц (див. рис. 4б). Відповідно, нормовані значення середньоквадратичних періодів $T_{k_m}^{msn} = T_{k_m}^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 16$ і $T_y^{msn} = T_y^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 5,3$. Такий же характер мають і зміни коефіцієнта передачі $k_r(t)$ регулятора $y(t)$. Короткі відрізки часу $T_{k_m}^{ms} / 2 \approx 12,5$ с, на яких спостерігається ріст $k_r(t)$, змінюються такими ж по тривалості відрізками часу, на яких $k_r(t)$ зменшується. При цьому САРС залишається стійкою, тому що ці відрізки менші за час перехідного процесу (див. рис. 3а).

2. Зменшення впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 5. Він дозволяє порівняти реакції змінних у системі на присутність факторів, які викликають фазові зрушення для САРС вихідної структури й САРС із зменшенням впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження.

Щоб виключити вплив змін коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК на процес самоналагодження, експеримент проводився при постійному номінальному значенні $k_o=1$, але в присутності факторів, які викликають фазові зрушення змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$, а саме: у складі координатних збурень $f_k(t)$ спостерігалися східчасті складові (використана модель $f_k(t)$ (19в)) і запізнення в моделі τ_m перевищувало запізнення «еквівалентного» ОК $\tau_m = 1,5 \cdot \tau_o^{ekv}$. Процес самоналагодження в САРС вихідної структури



а

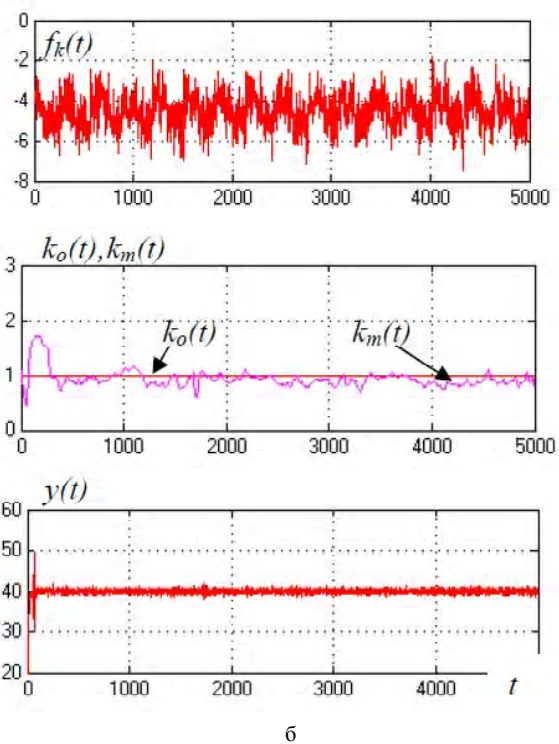
нестійкий через зрушені по фазі коливання змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$, які відбиваються в коливаннях помилки регулювання $e_1(t)$ контуру самоналагодження й, у підсумку, у коливаннях коефіцієнта передачі $k_r(t)$ регулятора $y(t)$ САРС (див. рис. 5а). При додаванні в структуру САРС блоку перевірки синфазності змінних і ключів з пам'яттю несинфазні зміни змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$ блокуються й процес самоналагодження стає стійким (див. рис. 5б).

3. Стабілізація нормованої помилки контуру самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 6. Він дозволяє порівняти реакції змінних у системі вихідної структури і у САРС зі стабілізацією оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$ і пропорційним масштабуванням $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$, які виконують регулятор σ_1 і два блоки множення.

Аналіз рисунку 6 показує:

– у САРС вихідної структури (див. рис. 6а) при збільшенні коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК зростають абсолютні значення оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, а потім і коливання помилки $e_1(t)$ контуру самоналагодження, що негативно позначається на точності його роботи – зростають коливання $k_m(t)$ відносно $k_o(t)$;

– введення в структуру САРС регулятора σ_1 і блоків множення дозволяє стабілізувати змінну $\sigma_1(t)$ на заданому рівні σ^z (див. рис. 6б). Так як масштабується не тільки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, але пропорційно також і $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$, то коливання помилки $e_1(t)$, а значить і коефіцієнт передачі контуру самоналагодження, уже практично не зале-



б

Рисунок 5 – Фрагменти змін змінних САРС на присутність факторів, які викликають фазові зрушення: а – для вихідної структури; б – для системи із зменшенням впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження

жать від значень $k_o(t)$ ОК. Як наслідок, зростає точність даного контуру, про що можна судити за значеннями показника I_3 .

У цілому результати експериментів підтверджують, що реалізація в САРС запропонованих принципів підви-

щує стійкість і динамічну точність контуру самоналагодження. Наприклад, на рис. 7 показана робота САРС удосконаленої структури в умовах, наближених до

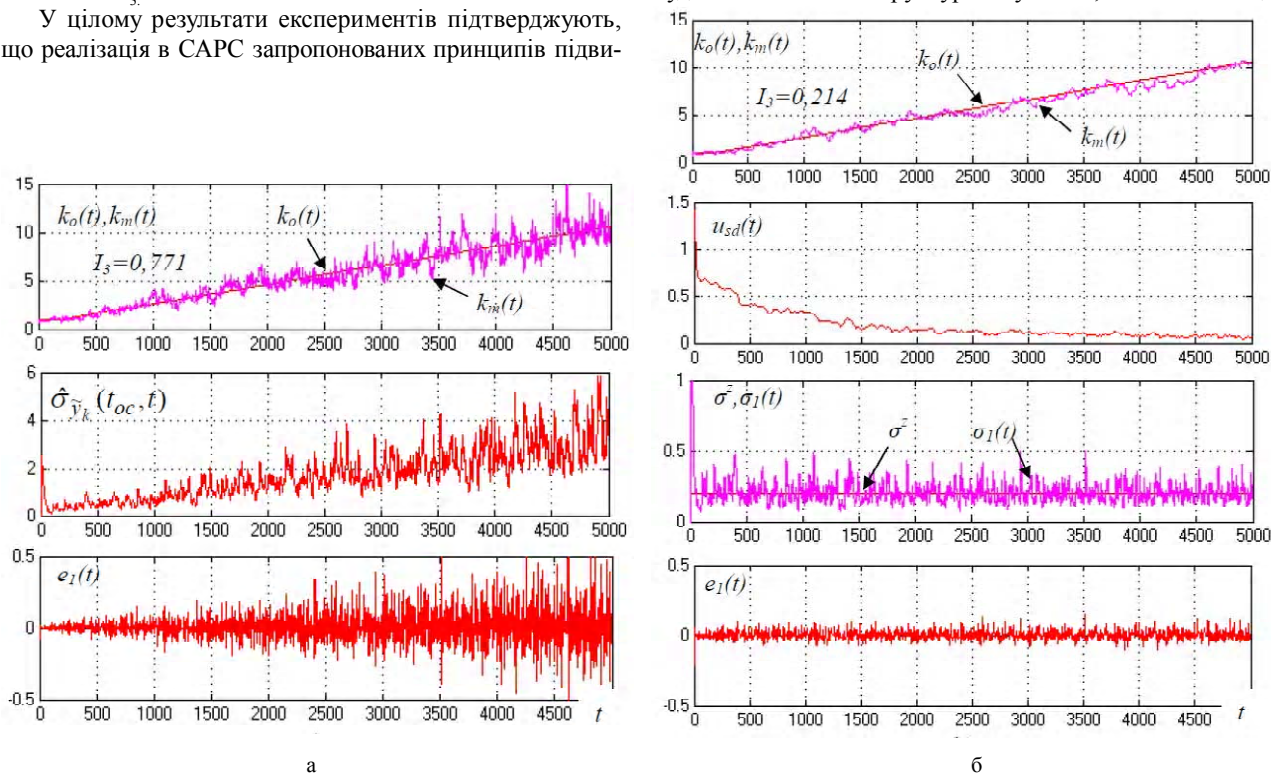


Рисунок 6 – Фрагменти змін змінних САРС:

а – вихідної структури; б – для системи зі стабілізацією нормованої помилки контуру самоналагодження

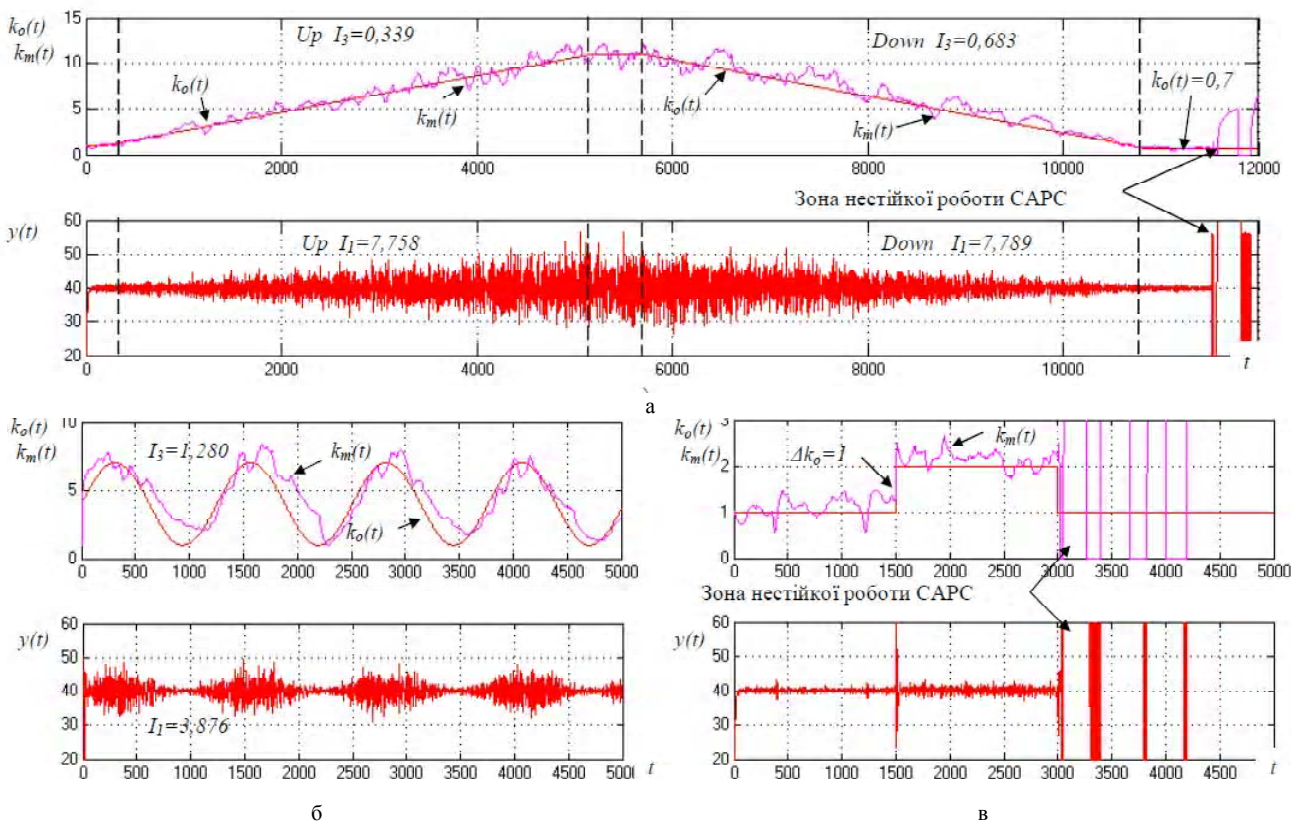


Рисунок 7 – Зміни змінних САРС в умовах, наближених до реальних, на тестові зміни коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОУ:
 а – по моделі (18а), б – по моделі (18в), в – по моделі (18г)

реальних. При моделюванні таких умов використовувалася модель координатних збурень $f_k(t)$ (19в), шумів (20) і запізнення в моделі τ_m спеціально було встановлено з перевищенням запізнення «еквівалентного» ОУ $\tau_m = 1,5 \cdot \tau_o^{ekv}$.

В усіх розглянутих випадках система виявилася стійкою, забезпечуючи прийнятні для практичного застосування показники I_1, I_3 .

6 ОБГОВОРЕННЯ

Особливо слід виділити здатність системи удосконаленої структури до роботи в умовах змін коефіцієнта передачі ОК в широкому діапазоні без необхідності переналаштувань параметрів регулятора контуру самоналагодження. Так, наприклад, САРС на рис. 7 цілком роботоспроможна при $ko(t) \in 0,45 \dots 11$. В таких самих умовах САРС вихідної структури потребує переналаштувань.

Об'єднання трьох розглянутих принципів удосконалення структури САРС підвищує не лише точність її самоналагодження, а й збільшує робастність до змін параметрів ОК та його моделі. Як показали додаткові експерименти, об'єм яких виходить за межі даної статті, розширюється діапазон змін часу запізнення ОК та його моделі, в рамках яких система залишається стійкою.

Хоча дана система розроблялась за умов, коли спектральний склад параметричних збурень (змін коефіцієнта передачі ОК) більш низькочастотний у порівнянні із спектральним складом керованої змінної, тим не менш, як показали результати експериментів, вона виявилася роботоспроможною і за умов стрибкоподібних змін коефіцієнта передачі ОК (див. рис. 7).

Моделювання достатньо повно відбиває реальні умови експлуатації САРС об'єктами керування технологічного типу. Представлені результати моделювання дозволяють на якісному й, частково, на кількісному рівні провести порівняльний аналіз варіантів розглянутих САРС і зробити висновок про їхню коректність і можливості поширення на широкий клас реальних об'єктів керування.

ВИСНОВКИ

Проведені комп'ютерні експерименти підтвердили підвищення ефективності САРС, зокрема, точності визначення коефіцієнта передачі моделі до змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування в умовах впливу координатних збурень і шумів, а також підвищення робастності системи до варіацій параметрів збурень, об'єкта керування і його моделі за рахунок:

- а) зменшення інерційності контуру самоналагодження;
 - б) зменшення впливу фазових зрушень фільтрованих керованих змінних об'єкта і його моделі на формування оцінок їх імовірнісних характеристик;
 - в) стабілізації оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої керованої змінної об'єкта на заданому значенні з пропорційним масштабуванням оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої змінної його моделі.
- Реалізація зазначених принципів забезпечувалася, відповідно, за рахунок:

а) виключення з контуру самоналагодження інерційностей смугових і осереднюючих фільтрів;

б) формування оцінок імовірнісних характеристик з поточними значеннями керованих змінних при збігу їх знаків, запам'ятовування цих значень в момент розбіжності знаків, збереження їх на всьому поточному інтервалі порушень синфазності і формування по них оцінок імовірнісних характеристик;

в) одночасного пропорційного масштабування оцінок імовірнісних характеристик фільтрованої керованої змінної об'єкта і його моделі.

Ці варіанти реалізації підтвердили свою працездатність.

Спільне застосування зазначених принципів не викликає протиріч. Вони взаємно доповнюють один одного в підвищенні стійкості і динамічної точності контуру самоналагодження, в результаті чого підвищується й точність підтримки регульованої змінної на заданому значенні.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках наукової школи «Моделювання й оптимальне керування технологічними процесами зберігання й переробки сільськогосподарської продукції» кафедри «Автоматизація технологічних процесів і робототехнічних систем» Одеської національної академії харчових технологій за підтримки компанії «С-Інжиніринг» м. Одеса.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Li Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art / Y. Li, K. H. Ang, G. C. Y. Chong // IEEE Control Systems Magazine. – 2006. – Vol. 26, Issue 1. – P. 42–54.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
3. А. с. 1241192 СССР, А1 G 05B 13/02. Самонастраивающаяся система / В.А. Хобин, А.Г. Плеве (СССР). – № 3821296/24-24; заявл. 06.12.84; опубл. 30.06.86, Бюл. 24. – 7 с.
4. Пат. 36671 Україна, МПК²⁰⁰⁶ G05B13/02. Самоналагоджувальна система / В. А. Хобін, О. А. Марчук (Україна); заявник Одеська національна академія харчових технологій. – № u200801328; заявл. 04.02.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. 21. – 5 с.
5. Khobin V. A. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems / V. A. Khobin, M. V. Levinskyi // ATBP journal. – 2016. – Vol. 27, Issue 3. – P. 5–16.
6. Хобин В. А. Оптимизация фильтров собственного движения самонастраивающейся САУ объектом технологического типа / В. А. Хобин, М. В. Левинский // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – № 4. – С. 120–129.
7. Левінський М. В. Тестові САР для дослідження алгоритмів їх самоналаштування / М. В. Левінський // Наукові праці ОНАХТ. – 2015. – № 48. – С. 142–146.
8. Khobin V. A. Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient / V. A. Khobin, M. V. Levinskyi // ATBP journal. – 2016. – Vol. 26, Issue 2. – P. 31–38.
9. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. Т. II. / У. Титце, К. Шенк. – М.: Издательство ДМК, 2007. – 942 с.
10. Куликов Е. И. Методы измерения случайных процессов / Е. И. Куликов. – М.: Радио и связь, 1986. – 282 с.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2017.

Після доробки 18.04.2017.

Хобин В. А.¹, Левинский М. В.²

¹Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина

²Аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина

ПРИНЦИПЫ, АЛГОРИТМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

Актуальность. Самонастройка параметров регуляторов является актуальной при управлении объектами технологического типа, потому что изменения свойств сырья и энергоносителей, деградация оборудования в ходе технологического процесса меняют не только значение управляемых переменных, но и характер собственного движения систем автоматического регулирования в замкнутом контуре. В математических моделях такие влияния относят к параметрическим возмущениям и отображают их в том числе с помощью изменяющегося коэффициента передачи объекта управления. Для ряда технологических объектов управления диапазон его изменения может превышать значение десять. При этом типичные системы регулирования с неизменными параметрами регулятора теряют устойчивость и переходят в позиционный режим работы. Чтобы сохранить компромисс между показателями качества и устойчивостью процессов в системе с такими объектами, необходимо использовать самонастройку параметров регулятора.

Цель. Повышение эффективности самонастраиваемой системы управления, которая для идентификации изменяющегося коэффициента передачи объекта управления использует составляющую собственного движения.

Метод. Предлагаются усовершенствования принципов и алгоритмов работы самонастраиваемой системы, которые повышают ее устойчивость и динамическую точность. Для этого в состав исходной системы включают новые звенья и связи. Учитывая наличие в системе нелинейных и нестационарных звеньев, для ее исследования выбрано имитационное моделирование в среде Simulink пакета программ Matlab.

Результаты. Спланированы и проведены компьютерные эксперименты с моделями альтернативных структур системы для условий, которые приближены к реальным условиям ее функционирования. Проведено тестирование типовыми моделями изменений коэффициента передачи объекта. Получены графики и числовые показатели, которые характеризуют эффективность работы самонастраиваемой системы исходной и усовершенствованной структур.

Выводы. Для повышения устойчивости и динамической точности системы необходимо уменьшить инерционность ее контура самонастройки, влияние фазовых сдвигов фильтрованных переменных в этом контуре на формирование оценок вероятностных характеристик, а также влияние коэффициента передачи объекта на ошибку регулирования контура самонастройки.

Ключевые слова: самонастраиваемая САУ, коэффициент передачи, собственное движение, полосовой фильтр, оптимальный параметрический синтез.

Khobin V. A.¹, Levinskyi M. V.²

¹Dr.Sc., Professor, Head of a Chair of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

²Post-graduate of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

PRINCIPLES, ALGORITHMS AND RESULTS OF EFFECTIVENESS INCREASE OF THE SELF-TUNING AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH THE CONTROL OBJECT OF TECHNOLOGICAL TYPE

Context. The issue of self-tuning was and still remains relevant when controlling objects of technological type, because changing properties of raw materials and energy carriers, equipment degradation during technological process do change not only the values of the controlled variables, but also the nature of own motion of the automatic control systems (ACS) in the closed loop. In the mathematical models such impacts attribute to parametric disturbances and reflect them including with changing transition coefficient of the control object (CO). For a number of technological type CO the range of its change can exceed the value of ten. For all that typical ACS with constant controller parameters lose the stability in small and turn to position mode. To maintain a compromise between quality indicators and the processes stability in ACS of such CO, it is necessary to use self-tuning of controller parameters.

Objective. Increase of effectiveness in self-tuning automatic control system, which uses own part of motion to identify varying transition coefficient of the control object.

Method. The enhancements of principles and operating algorithms of self-tuning automatic control system (STACS) are proposed. They increase its stability and dynamic accuracy. To achieve this, new links and connections are inserted in the system. Taking into account the presence of non-linear and non-stationary links in the system, for its research the modeling in Simulink environment of the MatLab program package was chosen.

Results. Computer experiments with the models of alternative system structures were planned and carried out for the conditions, which are close to the real conditions of its operation. Testing with the typical models of CO transition coefficient change was carried out. The diagrams and numeric values, which characterize the effectiveness of STACS of initial and enhanced structures, were obtained.

Conclusions. To increase the stability and dynamic accuracy of the system, it is necessary to decrease the lag of its self-tuning loop, influence of filtered variables phase shifts in this circuit on forming the evaluations of the stochastic characteristics, as well as control object transition coefficient influence on the control error of the self-tuning loop.

Keywords: self-tuning ACS, transition coefficient, own motion, band pass filter, optimal parametric synthesis.

REFERENCES

- Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art, *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, Vol. 26, Issue 1, pp. 42–54.
- Izerman R. Tsifrovyye sistemyi upravleniya. Moscow, Mir, 1984, 541 p.
- Hobin V. A., Pleve A. G. (SSSR) A. s. 1241192 SSSR, A1 G 05B 13/02. Samonastravayuschayasya sistema. № 3821296/24-24; zayavl. 06.12.84; opubl. 30.06.86, Byul. 24, 7 p.
- Hobin V. A., Marchuk O. A. (Ukrayina) Pat. 36671 Ukrayina, MPK2006 G05B13/02. Samonalagodzhuvalna sistema; zayavnik Odeska natsionalna akademiya harchovih tehnologiy. № u200801328; zayavl. 04.02.2008; opubl. 10.11.2008. Byul. 21, 5 p.
- Khobin V. A., Levinskyi M. V. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems, *ATBP journal*, 2016, Vol. 27, Issue 3, pp. 5–16.
- Hobin V. A., Levinskyi M. V. Optimizatsiya filtrov sobstvennogo dvizheniya samonastravayuscheyasya SAU ob'ektom tehnologicheskogo tipa, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 4, pp. 120–129.
- Levinskyi M. V. Testovi SAR dlya doslidzhennya algoritmov yih samonalashuvannya, *Naukovi pratsi ONAHT*, 2015, No. 48, pp. 142–146.
- Khobin V. A., Levinskyi M. V. Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient, *ATBP journal*, 2016, Vol. 26, Issue 2, pp. 31–38.
- Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya shemotekhnika. T. II. Moscow, Izdatelstvo DMK, 2007, 942 p.
- Kulikov E. I. Metodyi izmereniya sluchaynyih protsessov. Moscow, Radio i svyaz, 1986, 282 p.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 2/2017

Науковий журнал

Головний редактор – д-р техн. наук С. О. Субботін

Заст. головного редактора – д-р техн. наук Д. М. Піза

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 13.06.2017. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 21,16.
Тираж 300 прим. Зам. № 552.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.