

О. М. Нечипоренко, К. А. Лебедєв

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ БАРОМЕТРИЧНИХ ВИСОТОМІРІВ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Вступ

Перші практичні завдання оптимального управління [1], [2] були пов'язані з оптимізацією нелінійних динамічних систем для авіабудування, створення космічних апаратів і роботів. Але і в теперішній час вирішення *задачі оптимізації* для різних практичних застосувань є актуальним.

Принцип максимуму Понтрягіна [2] не дає ніякої інформації про особливі *оптимальні* управління, тобто він не може визначити особливе екстремальне управління в термінах фазової, зв'язаної і незалежної змінних. Хоча деякі узагальнення необхідних умов оптимальності, як і деякі методи чисельного вирішення особливих задач були знайдені, точне рішення все ще викликає складнощі.

Нерозв'язаною задачею є оптимізація системи автоматизованого контролю (САК) барометричних висотомірів (БВ) за швидкодією, надійністю і точністю.

Ця задача тісно пов'язана з задачею комплексної автоматизації технологічних процесів на виробництві, в тому числі контролю, градування та перевірки продукції авіаційних приладобудівних підприємств, з підвищенням надійності таких систем [3].

Систему автоматизованого контролю засобів вимірювання барометричного тиску можна створити на базі автоматичного задатчика тиску (АЗТ) газу [4], [5].

До нерозв'язаних задач відноситься забезпечення одностороннього перехідного процесу для контрольних і повірочних операцій, що викликає необхідністю визначення *варіації* показань засобів вимірювання, що контролюються. Існуючі САК та автоматичні задатчики (вантажопоршневі) [6] мають коливальний процес, що не дозволяє зняти варіацію показань БВ, тобто не мають одностороннього перехідного процесу, а також мають недостатню швидкодію.

Постановка задачі

Метою даної роботи є оптимізація цифрової системи автоматизованого контролю засобів вимірювання барометричного тиску, зокрема, барометричних висотомірів літального апарату, за критеріями точності і швид-

кодії, з забезпеченням одностороннього перехідного процесу без погіршення точності і надійності.

Теоретичні дослідження для оптимізації САК

Для розв'язання поставленої задачі проведена розробка САК повітряного тиску на базі частотного АЗТ, який від вантажопоршневих відрізняється тим, що він представляє собою нелінійну систему автоматичної стабілізації з релейним виконавчим пристроєм і адаптивним керуванням з високими показниками точності, швидкодії, безвідмовності і довговічності. САК контролює такі метрологічні характеристики: градувальну характеристику (залежність періоду від тиску, записується у таблицю, яка отримується після перевірки приладу), абсолютну та відносну похибку, варіацію показань (різниця між прямим та зворотнім ходом, тобто різниця показань приладу в одній і тій же точці діапазону вимірів при плавному підході до цієї точки з боку менших і більших значень вимірюваної величини), діапазон вимірювання (мінімальний та максимальний тиск).

Нижче наведено результати аналізу обмежень, умов і припущень при розробці САК, оптимальної за точністю, надійністю і швидкістю. Такий аналіз необхідний для створення автоматичних засобів контролю, перевірки і зняття статичних (градувальних) характеристик БВ з герметичною вимірювальною порожниною (без проточних елементів), тобто для синтезу системи автоматичного регулювання (стабілізації) тиску з програмним керуванням з глухою робочою камерою. Для пошуку оптимуму потрібний єдиний критерій оптимального управління. САК з частотним АЗТ являє собою динамічну систему, тому швидкодія і похибка задання тиску залежить від його динамічних характеристик. Перехід від попереднього до наступного значення тиску рівнозначний реакції САК на стрибкоподібну зміну задавального впливу N_i , тобто дослідження швидкодії САК зводиться до аналізу бажаних і дійсних перехідних характеристик для неодиначного ступінчастого впливу $(N_i - N_{i-1})l(t)$, де $l(t)$ – одинична стрибкоподібна функція.

Для вирішення поставленої задачі використовуємо наступні обмеження (критерії оптимізації):

- 1) час витримки на заданому рівні тиску повинен перевищувати час встановлення перехідних процесів у БВ, тобто – $t_b = (2 \cdots 3)\tau_{ЗВТ}$, де $\tau_{ЗВТ}$ – стала часу контролюємих БВ;
- 2) підхід до заданого рівня тиску p_i (i – номер рівня, тобто контролюємої точки) повинен бути одностороннім (неколивальним) в межах допуску для забезпечення можливості зняття варіації характеристик БВ на прямому і зворотному ході:

$$\begin{cases} p(t)_{t < t_i} > p_i \text{ для } \frac{dp}{dt} < 0; \\ p(t)_{t > t_i} < p_i \text{ для } \frac{dp}{dt} > 0; \end{cases}$$

- 3) час переходу від попереднього до наступного рівня має бути мінімальним (умова максимальної швидкодії):

$$t_i - t_{i-1} = \min;$$

- 4) похибка задання та підтримання тиску на заданому рівні регламентується допустимою похибкою БВ $\Delta_p \leq k\Delta$, де Δ_p , Δ – допустимі абсолютні похибки задатчика і контролюємих БВ відповідно; k – коефіцієнт запасу за точністю, визначається метрологічними вимогами.

Нехай вектор керувальної дії $\bar{u}(t)$ з командами тиску $u_1(t), \dots, u_m(t)$ обмежений таким чином: $\Delta N(s) = N_i - N(s)$; $c_j = \text{const}, j = 1, 2, \dots, m$, тобто областю керування є m -мірний багатокутник. На підставі теорії оптимального керування – принципу максимуму Понтрягіна і методу динамічного програмування Беллмана – при виборі інтегрального критерію у вигляді функціонала

$$I = \int_{t_{i-1}}^{t_i} dt = t_i - t_{i-1} \rightarrow \min$$

для систем максимальної швидкодії необхідне релейне керування. При виборі керувальної дії $u = p_{nc}$ (p_{nc} – тиск пневмомережі) маємо наступне обмеження: $p_H \leq u \leq p_B$, де $p_H = u_{\max}$ – тиск в надмірній пневмомережі; $p_B = u_{\min}$ – тиск у вакуумній пневмомережі. Тоді виконавчий пристрій в схемі АЗД представлятиме ідеальне двопозиційне реле із статичною характеристикою

$$p_{nc} = \begin{cases} p_H & \text{для } \Delta N > 0; \\ p_B & \text{для } \Delta N \leq 0. \end{cases}$$

Умова форсованого режиму $\frac{dp}{dt} \rightarrow \infty$ практично не здійснима із-за обмеженої потужності джерела пневможивлення. Крім того, швидкість зміни тиску обмежена вимогами по запасу міцності і надійності вимірювального перетворювача тиску (ВПТ) задатчика, необхідними для його нормального функціонування. Наприклад, для частотних ВПТ з циліндричним резонатором існує максимально допустима швидкість зміни тиску, вище за яку спостерігається зрив коливань резонатора із-за великих перевантажень, оскільки зміну тиску викликає зміна сили $dQ = \frac{dp}{s}$ (s – ефективна площа резонатора), що приводить до зміни швидкості руху інерційної маси

$\frac{dv}{dt} = g$. Якщо прискорення $a \geq J_{\text{дон}}$ ($J_{\text{дон}}$ – допустиме перевантаження на резонатор), спостерігається зрив вихідного частотного сигналу.

Таким чином, умова $\frac{dp}{dt} \leq \dot{p}_\delta$ є умовою обмеження першої похідної регульованої величини. Максимальна швидкість АЗД спостерігатиметься у випадку $\frac{dp}{dt} = \dot{p}_\delta$. Для ідеальних (безінерційних) електромеханічних елементів АЗД при досягненні рівня p_i достатньо було б максимально здемпфувати процес в точці B (наприклад, при герметичній порожнині, в якій задається тиск, перекрити пневмомагістраль живлення p_{nc}). В цьому випадку бажана функція зміни тиску має вид ламаної ABC (рис. 1); $\text{tg} \alpha_1 = \dot{p}_\delta$.

Реальний АЗД має інерційне запізнення (пряма ABF на рис. 1), що викличе небажане пере регулювання σ , $\sigma = |\dot{p}_\delta| \tau - \Delta_p > 0$, крім того, не забезпечується односторонній підхід до точки p_i .

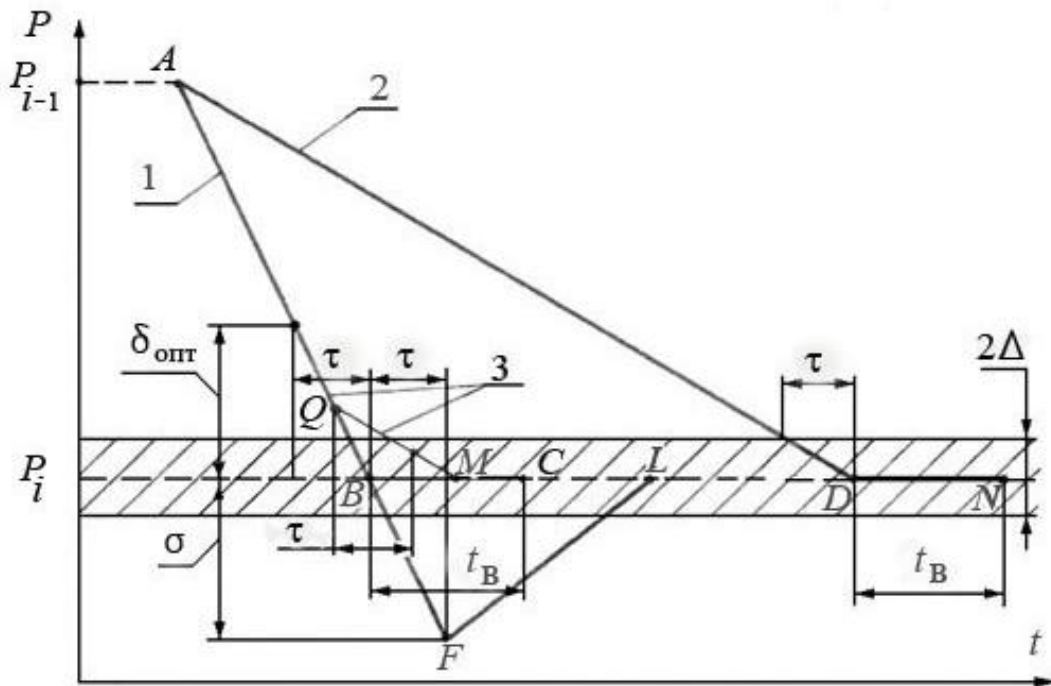


Рис. 1. Графіки перехідних процесів в САК

Коректування виду бажаної функції $p^*(t)$ з урахуванням τ можна здійснити декількома способами:

а) зменшити dp/dt до такого значення, коли

$$\left| \frac{dp}{dt} \right|_{p \rightarrow p_i} \leq \frac{\Delta_p}{\tau}, \quad (1)$$

де $(dp/dt)_{p \rightarrow p_i}$ – швидкість зміни тиску при підході до точки p_i ;
 Δ_p – допустима абсолютна похибка по тиску.

Бажана функція $p^*(t) = \pm \frac{t\Delta_p}{\tau} - p_c$ ($p_c = \text{const}$, знак «–» відповідає відкачуванню; див. рис. 1, ламана ADN) задовольняє вимогам точності, але не оптимальна по швидкодії, оскільки в реальному задатчику $\dot{p}_\partial \gg \frac{\Delta_p}{\tau}$;

б) припинити форсований режим $\frac{dp}{dt} = \dot{p}_\partial$ в момент $p(t) = p_i \pm k\Delta_p$ (знак «–» відповідає нагнітанням; k – коефіцієнт адаптації, $k = \text{const}$, $2 \leq k \leq 1$) і в околицях точки p_i здійснити квазістатичний режим, при якому $dp/dt = \Delta_p/\tau$ (рис. 1, ламана AQM), тобто бажана функція повинна задовольняти рівнянню

$$\dot{p}^*(t) = \begin{cases} \pm \dot{p}_\partial & \text{при } p > p_i + k\Delta_p; p < p_i - k\Delta_p; \\ \pm \Delta_p/\tau & \text{при } p_i + k\Delta_p \leq p \leq p_i - k\Delta_p; \end{cases}$$

в) ввести поправку δp_i , тобто перекрити пневмомагістраль в момент t_ε при тиску $\dot{p}_i = p_i \pm \delta p_i$ (знак «–» відповідає нагнітанням), $t_i = t_\varepsilon + \tau$, $\delta p_i = |\dot{p}_\partial|\tau$ (ламана AEN на рис. 1).

Введення поправки доцільне лише у тому випадку, коли виконується умова

$$|p_{i-1} - p_i| > |\dot{p}_\partial|\tau, \quad (2)$$

При великих швидкостях форсованого режиму і малих проміжках між точками для реальних АЗД умова (2) не виконується. Якщо ж крок між точками, що повіряються, малий і умова (2) виконується, то на вході АЗД доцільно використовувати високостабільний і точний задатчик швидкості зміни тиску $\dot{p}_j = \text{const}$, $j = 1, 2, \dots$

На підставі викладеного вище можна вважати, що для оптимального перехідного процесу повинна реалізовуватися функція вигляду

$$\dot{p}^*(t) = \begin{cases} \pm \dot{p}_\partial, & \text{якщо } |p(t) - p_i| > |\dot{p}_\partial|\tau; \\ \pm \frac{|p(t) - p_i|}{\tau}, & \text{якщо } |p(t) - p_i| \leq |\dot{p}_\partial|\tau; \\ \pm \frac{\Delta_p}{\tau}, & \text{якщо } |p(t) - p_i| \leq k\Delta_p, p(t) \neq p_i; \\ 0, & \text{якщо } p(t) = p_i, \end{cases}$$

де знак «+» відповідає нагнітанням, для практичної реалізації якої вибрано релейний виконавчий пристрій керування.

За наявності збурюючої дії в системі, наприклад, у вигляді витоку або натікання тиску із-за негерметичності системи в релейній схемі авторегулювання АЗД виникнуть автоколивання, амплітуда яких A не повинна перевищувати Δ_{don} . Якщо врахувати, що $A \approx (\partial p / \partial t) \tau$ в околицях точки p_i , то умова $A \leq \Delta_{don}$ трансформується в умову (1).

Під час надкритичного витоку повітря передатні функції САК різні:

- для надлишкової пневмомережі $W_n(s) = \frac{k_n}{s}$, $p(t) < p_i$ (інтегруюча ланка),
- для вакуумної пневмомережі $W_b(s) = \frac{1}{(T_0 s + 1)}$, $p(t) > p_i$ (аперіодична

ланка), де k_n – коефіцієнт передачі пневмосхеми під час нагнітання; T_0 – стала часу пневмомережі під час відкачки; s – комплексна змінна.

Негерметичність пневмомережі САК характеризується швидкістю витоку (натікання) $p_{нг}$, яка є збурюючим впливом для даної системи з передатною функцією $W_{нг}(s) = \frac{1}{s}$.

Математична модель процесів в САК повітряного тиску

Розглянемо перехід системи повітряного тиску від значення p_{i-1} до p_i . Для простоти функцію перетворення тиску в цифровий код N на коротких відрізках $p_{i-1} - p_i$ можна замінити кусочно-лінійною.

Демпфуюча ланка виконує наступні функції: формування одностороннього підходу до задаваного рівня тиску (при заданні потрібних рівнів повітряного тиску), забезпечення заданої точності шляхом зменшення розмірів автоколивань поблизу задаваного рівня до допустимих меж і формування функції (для тривалої витримки тиску в негерметичній порожнині).

Структурна схема цифрової релейної САК повітряного тиску на основі частотного АЗТ наведена на рис. 2, де позначено: АЛП – цифровий арифметико-логічний пристрій; ПЧК – перетворювач частотного сигналу в цифровий код; ЧПТ – частотний вимірювальний перетворювач тиску; ПФТ – пристрій формування тиску. Цифровий код N_i відповідає заданому значенню тиску p_i ($i=1, 2, \dots, n$, де n – кількість заданих рівнів тиску в САК), він є задавальною дією системи.

Порівняння N_i з поточним цифровим кодом N відбувається в цифровому компараторі. Відхилення $\Delta N = N_i - N$ в сукупності з поточним кодом N одночасно подається на АЛП, в якому вони обробляються згідно алгоритму формування тиску в САК.

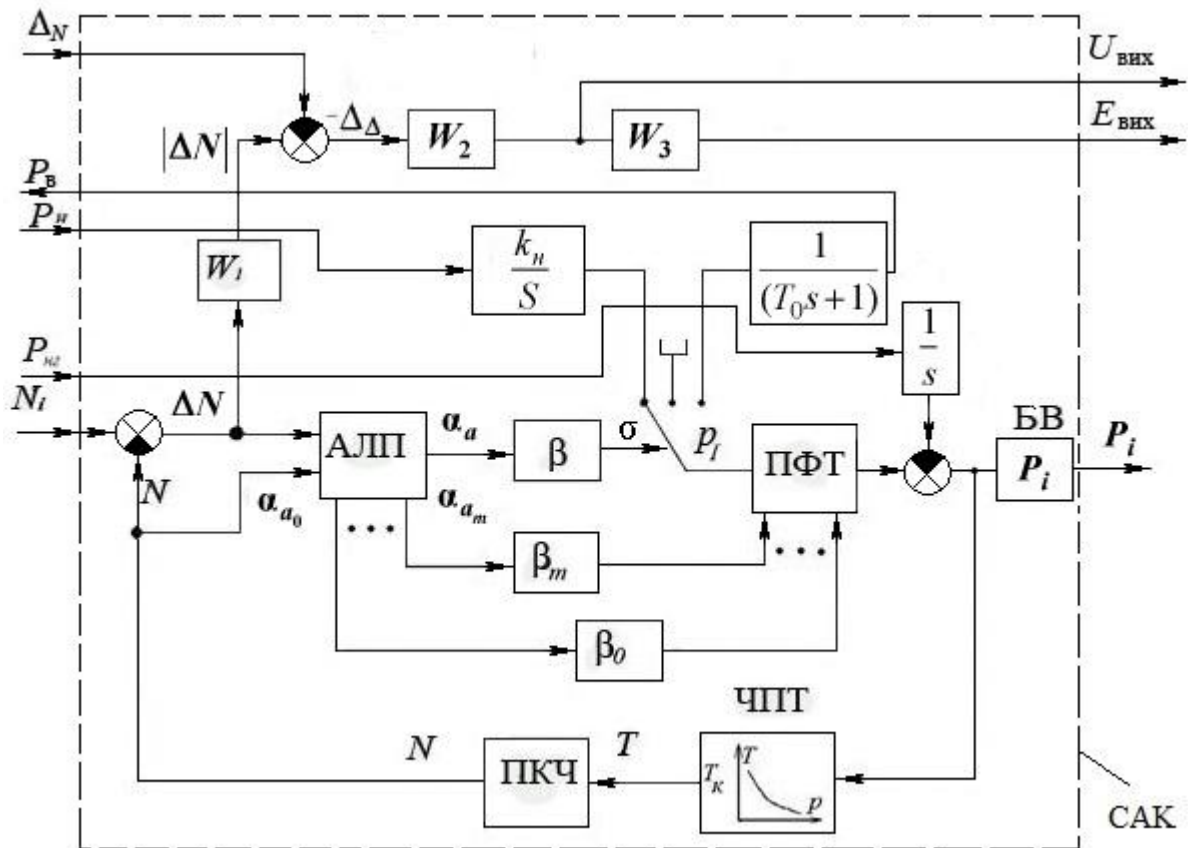


Рис. 2. Структурна схема цифрової релейної САК

В АЛП реалізується багатоступінчастий режим формування тиску під час використання способу порозрядного адаптивного керування, який полягає в нерівномірному квантуванні вимірювального сигналу N за рівнем (з урахуванням зміни характеристик протікаючих в системі процесів) з кратними інтервалами дискретизації $\Delta N_k = Q^{v_k} q_k$, де $k = 0, 1, \dots, m$, m - кількість рівнів формування тиску, Q - основа системи числення, v_k - цілочисельна величина, названа авторами коефіцієнтом адаптації, q_k - ступінь квантування.

У даній САК дискретизація здійснюється в такому режимі: $m=3$; $Q=10$. Арифметико-логічний пристрій оперує цілочисельними кодами N , N_i без урахування коми і розмірності числа; q_k дорівнює найменшому (молодшому) розряду числа.

Вимірювання тиску в робочій порожнині САК здійснюється ЧПТ з нелінійною характеристикою, яку можна ідентифікувати математичною моделлю

$$p(T) = \sum_{\lambda=0}^{\eta} a_{\lambda} \left(\frac{1}{T} \right)^{\lambda}, \quad (4)$$

де T - період частотного сигналу; a_{λ} - сталі коефіцієнти.

Для квантованої за рівнем величини маємо

$$N_{\text{KB}}(t) = \text{Ent} \left[\frac{N(t)}{q_x} \right], \quad (5)$$

де $\text{Ent}[\dots]$ – ціла частина числа. Момент досягнення p_i для оператора (повірника) фіксується індикаторним пристроєм, виконаним у вигляді світлодіода з рівнем інтенсивності світлового потоку $E_{\text{вух}}$. Якщо $E_{\text{вух}} = 0$ (світлодіод не горить) – тиск в робочій камері не відповідає p_i . Коли $E_{\text{вух}} = E_0$ (світлодіод горить) тиск в робочій камері знаходиться в околиці заданого рівня $p_i \pm \Delta$, де Δ – допустима абсолютна похибка САК за тиском. Описаний режим роботи світлодіода в САК реалізується послідовним перетворенням сигналу відхилення ΔN в цифровому блоці формування керуючих сигналів АЛП. На рис. 2 W_1 – передатна функція ланки, яка здійснює визначення абсолютної величини $|\Delta N|$ (модуля відхилення); Δ_N – ширина допуску абсолютної похибки за тиском Δ , $\Delta_\Delta = |\Delta N| - \Delta_N$; W_2 – передатна функція релейного порогового пристрою з характеристикою:

$$U_{\text{вих}} = \begin{cases} 1, & \Delta_\Delta \leq 0; \\ 0, & \Delta_\Delta > 0; \end{cases} \quad (6)$$

W_3 – передатна функція світлодіода (наприклад, для світлодіода типу АЛ102, маємо $W_3 = k_3 = \text{const}$, де k_3 – коефіцієнт передачі; $k_3 = \frac{E_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}}$).

Точність задання і підтримування тиску обумовлюється параметрами САК в квазістатичному режимі, так як САК може використовуватися за своїм прямим призначенням лише після установа перехідних процесів в системі. При квазістатичному режимі, коли САК працює в околицях заданого рівня тиску p_i , відхилення і швидкість зміни відхилення параметрів САК невеликі. Ця обставина дозволила провести ряд перетворень, що значно спрощують комплексну математичну модель динамічних процесів САК і її структурну схему. Загальний вигляд комплексної математичної моделі динамічних процесів в релейній цифровій САК, як результат проведеної оптимізації, разом з виразами (4 - 6), буде наступний:

$$\begin{aligned} p(s) &= p_1(s) + W_{\text{нт}}(s); \\ p_1(s) &= \begin{cases} \frac{k_n p_n}{s}, & \Delta N(s) > \Delta_N; \\ p_i \pm k_g \Delta, & -\Delta_N \leq \Delta N(s) \leq \Delta_N; \\ \frac{p_e}{(T_0 s + 1)}, & \Delta N(s) < -\Delta_N; \end{cases} \\ \Delta N(s) &= N_i - N(s); \end{aligned}$$

$$N(s) = Ent \left\{ \frac{L[N(t)]}{q_x} \right\};$$

$$\Delta_{\Delta}(s) = |\Delta N(s)| - \Delta_N;$$

$$U_{вих}(s) = \begin{cases} U', & \Delta_{\Delta}(s) \leq 0; \\ U^0, & \Delta_{\Delta}(s) > 0, \end{cases}$$

де U' , U^0 – рівні логічних одиниць і нуля; $L[N(t)]$ – зображення за Лапласом функції $N(t)$.

Висновки

В роботі проведена оптимізація релейної цифрової системи автоматизованого контролю засобів вимірювання повітряного тиску за точністю, швидкодією і одностороннім перехідним процесом (мультикритеріальна оптимізаційна задача), дозволила вибрати релейний виконавчий пристрій керування та отримати оптимальну САК з бажаним одностороннім перехідним процесом для зняття варіації показань БВ.

Розроблена комплексна математична модель динамічних процесів в САК для аналізу, що включає як аналогові (пневматичні, механічні, електричні), так і цифрові перетворення.

Це дозволило розробити *оптимальний за швидкодією* алгоритм функціонування САК, в якому формується *односторонній* підхід до заданого рівня тиску без погіршення точності.

Список використаної літератури

1. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн // – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.
2. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе // – М.: Наука, 1985. – 392 с.
3. Нечипоренко О. М. Основи надійності літальних апаратів / О. М. Нечипоренко // – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 240 с.
4. «Программный задатчик давления», Нечипоренко О. М., Полішко С. П. Авторське свідоцтво СРСР № 1546941 від 1 лютого 1988, зареєстровано в Держреєстрі винаходів СРСР 01.10.89 р.
5. Нечипоренко Е. Н. Создание высокоточных и быстродействующих датчиков давления газа / Е. Н. Нечипоренко, С. П. Полишко // Измерительная техника, № 8. – 1989. – С. 32-34.
6. Хансуваров К. И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара / Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. // М.: Издательство стандартов, 1990. – С. 69-74.

7. *Рапопорт Э. Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. // — М.: Высшая школа, 2009. — 677 с.
8. Теория оптимизации систем автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова //— М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 744 с.
9. *Ловчаков В. И.* Оптимальное управление электротехническими объектами. / В. И. Ловчаков, Б. В. Сухинин, В. В. Сурков // — Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. — С. 23-51.
10. *Нечипоренко О. М.* Математична модель релейної цифрової системи автоматичного регулювання / О. М. Нечипоренко // Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». Вип. 5. Голова редакційної колегії В. К. Присяжнюк. — К.: Видавничо-поліграфічний центр АМУ, 2012. — С. 133-135.

УДК 681.5

И. М. Голинко, И. Е. Галицкая, В. Ю. Степаненко

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Введение

Для эффективной реализации современного производства создаются интегрированные компьютерные системы. Интегрированная компьютерная система включает в себя технологическую систему и компьютерную систему управления (КСУ) технологическим процессом. Технологическая система состоит из объектов управления (ОУ), которые соединены трубопроводами материальных и/или энергетических потоков в технологический процесс. ОУ является основным элементом системы автоматического управления (САУ): источником информации для КСУ и точкой приложения управляющего воздействия КСУ. КСУ воспринимает информацию о состоянии параметров ОУ и обрабатывает ее с целью формирования управляющих воздействий.

Большое влияние на качество автоматического управления имеет взаимодействие КСУ и технологической системы, особенно точное исполнение команд и решений КСУ на ОУ. КСУ на современном этапе часто реализуется в виде системы непосредственного (прямого) цифрового управления, которая способна управлять объектами по принятому критерию; производить адаптацию, решать задачи статической и динамической опти-