УДК 62-531.787

Нечипоренко О. М., к.т.н., доцент
НТУУ «КПІ»;
Лєбєдєв К А.,
магістр НТУУ «КПІ»

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ

Проведена оптимізація динамічних процесів релейної цифрової системи автоматизованого контролю, яка може бути використана для синтезу автоматизованої системи контролю, градуювання і повірки, оптимальної за точністю, надійністю і швидкодією, з можливістю зняття варіації показань контролюємих засобів повітряного тиску.

Проведена оптимизация динамических процессов релейной цифровой системы автоматизированного контроля, которая может быть использована для синтеза автоматизированной системы контроля, градуировки и поверки, оптимальной по точности, надежности и быстродействию, с возможностью снятия вариации показаний контролируемых средств измерения давления воздуха.

The paper explores an optimization of dynamic processes of the relay digital automated checking system which can be utilized for the synthesis of the automated control, calibrating and check with an optimum level of preciseness, reliability and fast-acting with possibility of variation of readings of air pressure measuring sensors.

Вступ. У кожному розділі науки і техніки існують керовані автоматизовані системи, тобто такі системи, які можна змусити поводитися по різному залежно від волі оператора. Кожного разу, коли оператор системи приймає рішення, тобто вибирає розподіл параметрів, які управляють системою, він проводить зміну в розподілі станів, в яких перебуває система і, отже, змінює кінцевий стан. Тому, виникає природне питання: серед всіх допустимих управлінь конкретно яке управління приведе систему в певний стан? Наприклад, яке управління мінімізує різницю між кінцевим і початковим значенням довільної функції, залежної

від стану системи. Область науки, що досліджує такого типу завдання, називається *теорією оптимального управління.*

Перші практичні завдання оптимального управління були пов'язані з оптимізацією нелінійних динамічних систем для авіабудування, створення космічних апаратів і роботів.

Математична теорія оптимального управління має справу із знаходженням функцій, які мінімізують цільовий функціонал, підлеглий системі диференціальних рівнянь. *Оптимальна функція повернення* визначалася як величина цільового функціонала, що починається в поточному стані і моменті часу і наближається оптимально до заданих кінцевих умов. Оскільки функція управління тут представляється у вигляді зворотного зв'язку на поточний стан і момент часу, динамічне програмування часто визначається як *нелінійне оптимальне управління по зворотному зв'язку.* Дуже рідко є можливість вирішити рівняння в приватних похідних Гамільтона-Якобі-Беллмана для нелінійної системи, що має яке-небудь практичне значення, тому розвиток явних керованих схем зворотного зв'язку для нелінійних систем зазвичай недосяжний. Проте, якщо простір станів обмежений областю, близькою до оптимальної траєкторії, завдання динамічного програмування може добре апроксимуватися лінійним квадратичним завданням, тобто завданням з лінійною динамікою і квадратичним цільовим функціоналом.

Принципом .максимума Понтрягина є узагальнення необхідних умов Ейлера-Лагранжа і Вейерштраса на випадки, коли функції управління обмежені. У термінології оптимального управління цей принцип стверджує, що мінімізуюча траєкторія повинна задовольняти рівнянням Ейлера-Лагранжа, де функція управління максимізувала гамільтоніан в межах своєї обмеженої області в кожній точці уздовж траєкторії. Таким чином, завдання варіаційного числення трансформується в завдання

нелінійного програмування в кожній точці уздовж траєкторії. Принцип максимуму оперує однією екстремаллю в конкретний момент часу, тоді як динамічне програмування оперує сімействами екстремалей. Принцип максимуму є невід'ємною частиною динамічного програмування, оскільки вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана включає також знаходження управлінь (по можливості обмежених), які максимізували гамільтоніан в кожній точці простору станів.

Проте, принцип максимуму Поптрягіна не дає ніякій 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 завдань були знайдені, точне рішення все ще викликає складнощі.

Проблема створення високоточних і надійних систем автоматизованого контролю (САК), які реалізують оптимальну за швидкодією, надійністю і точністю функцію зміни повітряного тиску, є актуальною, тому що тісно пов’язана з задачею комплексної автоматизації технологічних процесів на виробництві, в тому числі контролю, градуювання та повірки продукції авіаційних приладобудівних підприємств, з підвищенням надійності таких систем [1].

Систему автоматизованого контролю засобів вимірювання барометричного тиску можна створити на базі автоматичного задачика тиску (АЗТ) газу [2], [3]. При розробці такої САК постають традиційні задачі: оптимізувати показники її точності, швидкодії і надійності. Важливою і актуальною, але нерозв’язаною задачею є забезпечення одностороннього перехідного процесу САК без погіршення точності і надійності, з максимальною швидкодією. Важливість забезпечення одностороннього перехідного процесу для контрольних і повірочних

операцій полягає в необхідності визначення *варіацій* показань контролюємих засобів вимірювання. Існуючі САК та автоматичні задатчики (вантажопоршневі) [1] мають коливальний процес, що не дозволяє зняти варіацію показань ЗВТ, яка важлива для нормування їх метрологічних характеристик, тобто не мають одностороннього перехідного процесу, а також мають недостатню швидкодію і надійність. Частотний АЗТ [2, 3] 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. Тому для розробки САК повітряного тиску такий АЗТ підходить найбільше.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що розроблена САК, що працює в області середнього та низького вакууму, реалізує *оптимальний за швидкодією* алгоритм функціонування, в якому формується *односторонній* підхід до заданого рівня тиску без погіршення точності і надійності [4]. Також в теперішній час ще недостатньо повно досліджене оптимальне керування [5 – 7] в релейних цифрових системах, вимірювальним сигналом яких є частота. Крім того, для розробників аналогічних систем [8, 9] важливо досліджувати як надійність, так і їх метрологічні характеристики.

Постановка задачі. Метою даної роботи є оптимізація математичної моделі динамічних процесів в системі автоматизованого контролю барометричних засобів вимірювання для її використання при проектуванні і розробці САК ЗВТ, оптимальних за точністю, надійністю і швидкодією, з бажаним перехідним процесом.

Нижче наведено результати аналізу обмежень, умов і припущень при розробці САК, оптимальної за точністю, надійністю і швидкодією. Такий аналіз необхідний для створення автоматичних засобів контролю, повірки і зняття статичних (градуювальних) характеристик ЗВТ з герметичною

вимірювальною порожниною (без проточних елементів), тобто для синтезу системи автоматичного регулювання (стабілізації) тиску з програмним керуванням з глухою робочою камерою.

Теоретичні дослідження функціонування САК

Для пошуку оптимуму потрібний єдиний критерій оптимального управління.

САК з частотним АЗТ являє собою динамічну систему [9], 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 неодиничного ступінчастого впливу $(N_i - N_{i-1})1(t)$, де $1(t)$ – 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 ЗВТ, тобто – $t_в = (2 \cdots 3)\tau_{ЗВТ}$, де $\tau_{ЗВТ}$ – стала часу контролюємих ЗВТ;
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 ЗВТ на прямому і зворотному ході:

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

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 ЗВТ $\Delta_p \le k\Delta$, де Δ_p, Δ – допустимі абсолютні похибки задатчика і контролюємих ЗВТ відповідно; k – коефіцієнт запасу за точністю, визначається метрологічними вимогами.

Нехай вектор керувальної дії $\bar{u}(t)$ з командами тиску $u_1(t),\ \ldots,\ u_m(t)$ обмежений таким чином: $d_j \le u_j \le c_j;\ d_j = \text{const},\ c_j = \text{const},\ j = 1,\ 2,\ ...,\ m,$ тобто областю керування є m-мірний багатокутник. На підставі теорії оптимальною керування – принципу максимуму Понтрягіна і методу динамічного програмування Беллмана [10, 11] – при виборі інтегрального критерію у вигляді функціонала

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

для систем максимальної швидкодії необхідне релейне керування. При виборі керувальної дії $u = p_{nc}$ (p_{nc} – тиск пневмомережі) маємо наступне обмеження: $p_H \le u \le p_B$, 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

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

Умова форсованого режиму $\frac{dp}{dt} \to \infty$ 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 $a \geq J_{\partial on}$ ($J_{\partial on}$ – допустиме перевантаження на резонатор), спостерігається зрив вихідного частотного сигналу.

Таким чином, умова $\frac{dp}{dt} \leq \dot{p}_{\partial}$ є умовою обмеження першої похідної регульованої величини. Максимальна швидкодія АЗД спостерігатиметься у випадку $\frac{dp}{dt} = \dot{p}_{\partial}$. 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); $\mathrm{tg}\alpha_1 = \dot{p}_{\partial}$.

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

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

а) зменшити dp / dt до такого значення, коли

$$\left|\frac{dp}{dt}\right|_{p\to p_i} \le \frac{\Delta_p}{\tau}, \qquad (1)$$

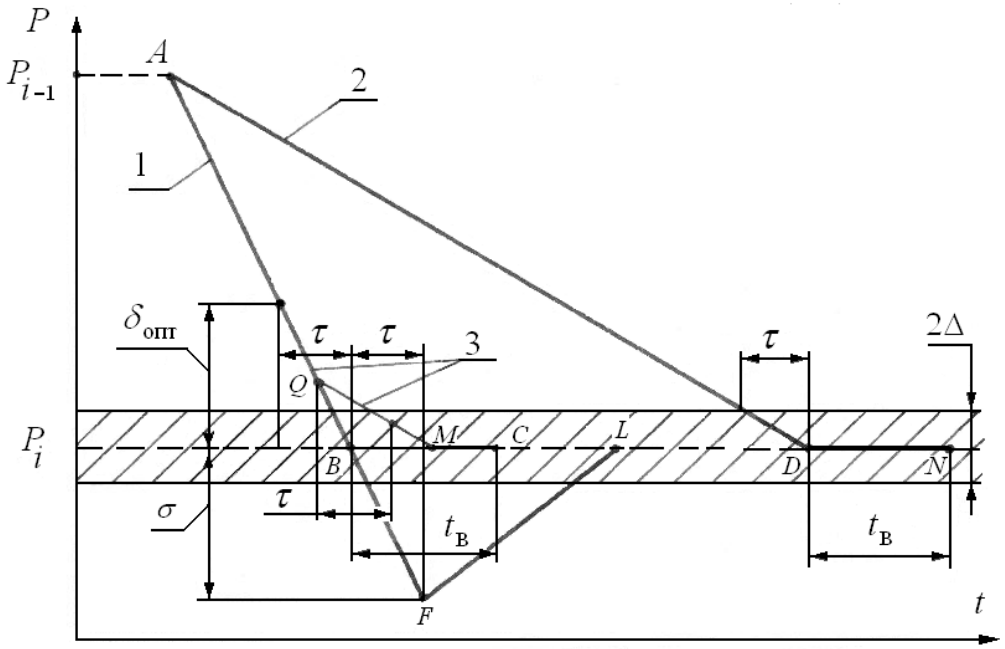

Рис. 1. Графіки перехідних процесів в САК

де $(dp/dt)_{p\to p_i}$ – 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 $\dot{p}_\partial >> \frac{\Delta_p}{\tau}$;

б) припинити форсований режим $\frac{dp}{dt} = \dot{p}_\partial$ в момент $p(t) = p_i \pm k\Delta_p$ (знак «–» відповідає нагнітанню; k – коефіцієнт адаптації, $k = \text{const}$, $2 \le k \le 1$) 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

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

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

Введення поправки доцільне лише у тому випадку, коли виконується умова

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

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 $\dot{p}_j = \text{const}$ $j = 1,\ 2,\ \ldots.$

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

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

де знак «+» відповідає нагнітанню.

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 ***А не*** повинна перевищувати $\Delta_{доп}$. Якщо врахувати, що $A \approx (\partial p / \partial t)\tau$ в околицях точки p_i, то умова $A \le \Delta_{доп}$ трансформується в умову (1).

Зі всіх існуючих типів регулювання гідро- і пневмосистем [5] (дросельного, об'ємного і об'ємно-дросельного) в АЗД різних типів використовуються тільки дросельні, які характеризуються рядом позитивних якостей: малими габаритними розмірами, малою інерційністю, високим коефіцієнтом перетворення тощо.

На основі узагальненої структурної схеми [2, 5] був розроблений релейний виконавчий пристрій формування тиску (ПФТ) САК, пневматична схема якого представлена на рис. 2, де C – стабілизатор тиску, $\boldsymbol{\Phi}$ – фільтр, $K_{\text{В}}$, $K_{\text{Н}}$, K_0, K – пневмоклапани, $\boldsymbol{V1}$, $\boldsymbol{V2}$ – регульовані вентилі, $\boldsymbol{Д}$ – дросель, $БВ_1$, $\boldsymbol{БВ_2}$, …, $\boldsymbol{БТ_n}$, – контрольовані ЗВТ (барометричні висотоміри).

Структуру ПФТ можна розглядати як сукупність двох послідовно з’єднаних пристроїв: класичного двохпозиційного пневмореле з непарно-симетричною статичною характеристикою і демпфуючої ланки у вигляді пневмоопору змінної структури, реалізованого на двох паралельно з’єднаних пневмогілках з різними пнемопровідностями. Блок з’єднання пневмоелектроклапанів $K_{\text{Н}}$ і $K_{\text{В}}$ представляє собою двоканальний релейний перемикач наггітяння/відкачки, виконаний у вигляді двох паралельних пневмомагістралей, що з’єднують пневмоблок САК з мережею джерела пневможівлення з рівнями тиску $p_{\text{н}}$ (надлишкова пневмомережа), $p_{в}$ (вакуумна пневмомережа).

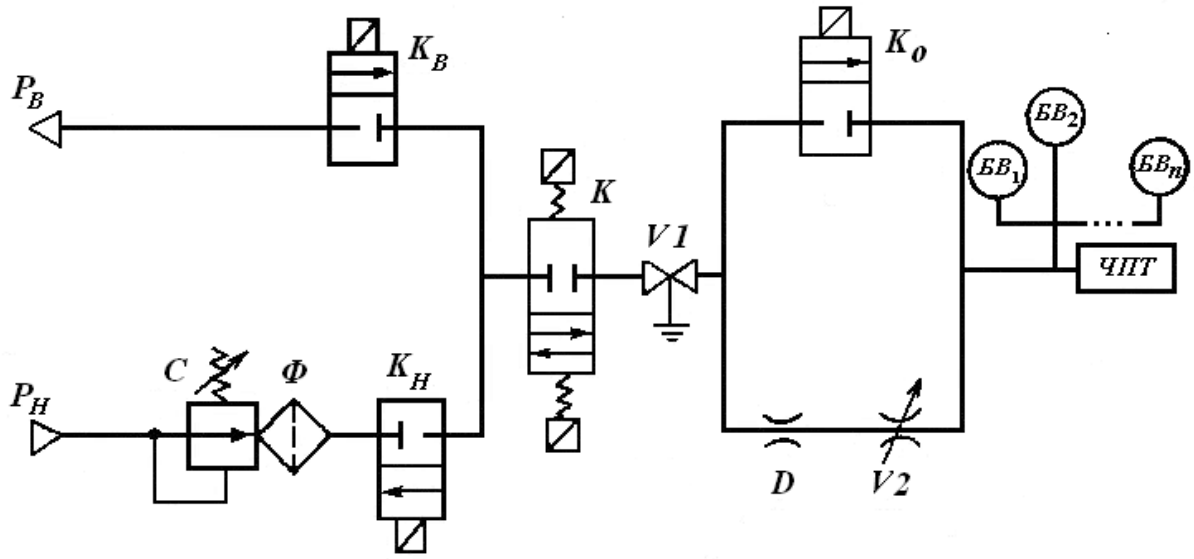

Рис. 2. Принципова пневматична схема релейного виконавчого пристрою формування тиску в САК

Під час надкритичного витоку повітря передатні функції цих пневмомагістралей пневмореле різні:

– для надлишкової пневмомережі $W_{\text{н}}(s)=\frac{k_{\text{н}}}{s}$, $p(t)<p_i$ (інтегруюча ланка),

– для вакуумної пневмомережі $W_{\text{в}}(s)=\frac{1}{(T_0 s+1)}$, $p(t)>p_i$ (аперіодична ланка), де $k_н$ – коефіцієнт передачі пневмосхеми під час нагнітання; T_0 – стала часу пневмомережі під час відкачки; s – комплексна змінна.

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

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 задаваємого рівня тиску (при заданні потрібних рівнів повітряного тиску), забезпечення заданої точності шляхом зменшення розмірів автоколивань поблизу задаваємого рівня до допустимих меж і формування функції (для тривалої витримки тиску в негерметичній порожнині).

Для простішої схемної та програмної реалізації САК повітряного тиску в статті пропонується алгоритм порозрядного адаптивного керування по цифровому коду N. Коли порівнюється заданий код N_i з поточним значенням N, клапан K_0 закривається при співпадінні ν старших розрядів, $\nu = 1, \ldots, l - m$, де $l+1$ - кількість цифр числа N_i, клапан K_1 – при співпадінні $\nu + 1$ старших розрядів і т. д. Ширина похибки Δ_N відпрацювання коду N_i визначається молодшим розрядом коду N_i і відпрацьовується клапанами $K_н$ і $K_в$ завдяки статичним характеристикам. Керування клапанами K_0, K_j здійснюється по лініях перемикань.

Алгоритм порозрядного адаптивного керування для форсованого режиму можна представити у вигляді

$$\alpha_a = \begin{cases} 0\ 0, \ \Delta N = 0; \\ 0\ 1, \ \Delta N < 0; \\ 1\ 0, \ \Delta N > 0. \end{cases}$$

$$\alpha_{ak} = \begin{cases} 1, \ \Delta N = Q^{\nu_k} q_k; \\ 0, \ \Delta N \neq Q^{\nu_k} q_k. \end{cases}$$

Логічний нуль відповідає команді на закриття, а логічна одиниця – на відкриття відповідного пневмоелектроклапана ПФТ. Для кода α_a виконавчі елементи – пневмоелектроклапани трипозиційного реле ПФТ. Релейний підсилювач-формувач з коефіцієнтом перетворення β виробляє керуючий вплив $\sigma = \beta\alpha_a$. Кодами α_a, $k = 0, 1, \ldots, m$ через релейні підсилювачі-формувачі з коефіцієнтами посилення $\beta_0, \ldots, \beta_m$ управляються пневмоелектроклапани демпфуючої ланки ПФТ.

Значення коефіцієнтів адаптації ν_k залежать від швидкості зміни тиску $\left[\frac{dp}{dt}\right]_{\Phi}$ для форсованого режиму і, отже, від швидкості зміни цифрового коду $\frac{dN}{dt}$, а також від калібрувальних коефіцієнтів градуювальної характеристики ЧПТ

$$\nu_k = \lg\left\{\tau\frac{\left[\frac{dN(p,\,t)}{dt}\right]_{\Phi}}{q_k}\right\}, \qquad (3)$$

де τ – час запізнювання електромеханічних ланок САК. Розраховані за виразом (2) цілочисельні значення коефіцієнтів адаптації ν_k уточнюються експериментально під час налаштуванні САК регульованими пневмовентилями. При цьому має виконуватися умова $0 \le \nu_k \le \gamma$, де γ – розрядність числа N_i.

Функціональна схема цифрової релейної САК повітряного тиску на основі частотного АЗТ [5] наведена на рис. 3, 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 ($i = 1, 2, \ldots, n,$ де $n -$ кількість заданих рівнів тиску в САК), він є задавальною дією системи.

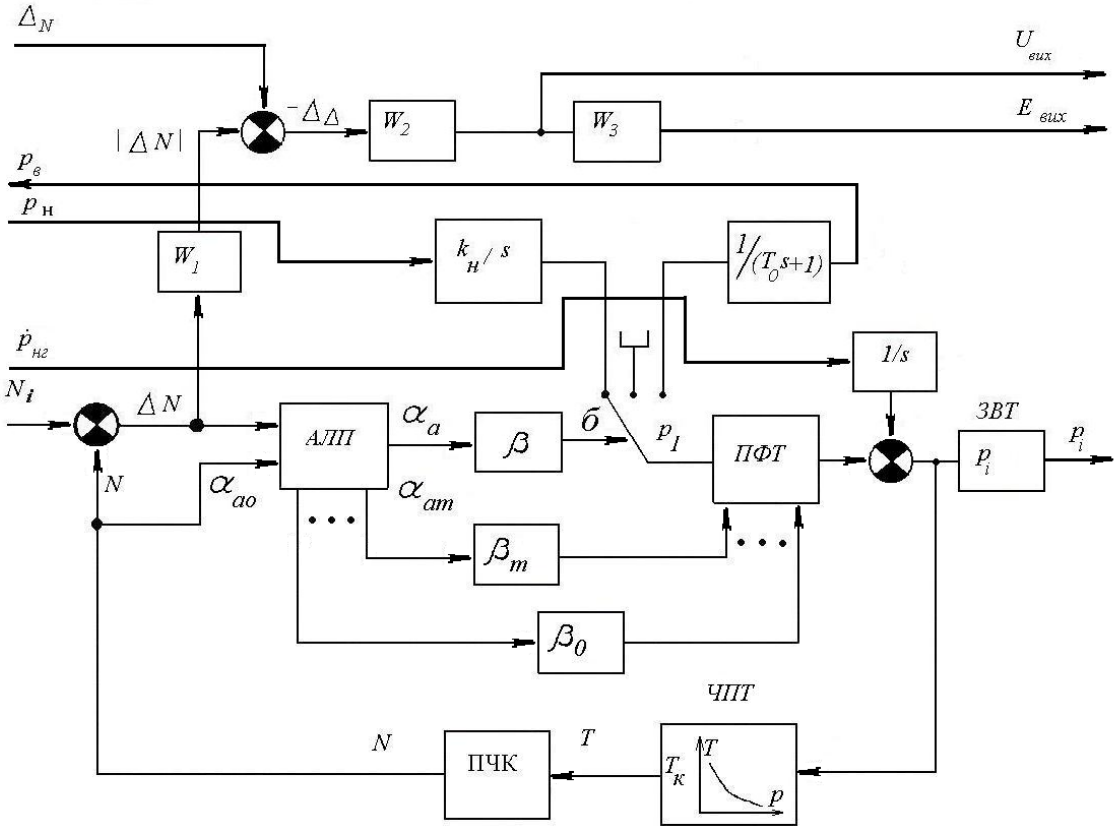

Рис. 3. Функціональна схема цифрової релейної САК

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. 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 $\Delta N_k = Q^{\nu k} q_k$, де $k = 0,\ 1,\ \ldots,\ m,\ m -$

кількість рівнів формування тиску, $Q-$ основа системи числення, ν_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

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

де $T-$ період частотного сигналу; $a_\lambda -$ сталі коефіцієнти.

Для квантованої за рівнем величини маємо

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

де $\text{Ent}[\ldots]-$ ціла частина числа. Момент досягнення p_i для оператора (повірника) фіксується індикаторним пристроєм, виконаним у вигляді світлодіода з рівнем інтенсивності світлового потоку $E_{\text{вих}}$. Якщо $E_{\text{вих}}=0$ (світлодіод не горить) – тиск в робочій камері не відповідає p_i. Коли $E_{\text{вих}}=E_0$ (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. 3 W_1- передатна функція

ланки, яка здійснює визначення абсолютної величини $|\Delta N|$ (модуля відхилення); $\Delta_N -$ ширина допуску абсолютної похибки за тиском Δ, $\Delta_\Delta = |\Delta N| - \Delta_N$; $W_2 -$ передатна функція релейного порогового пристрою з характеристикою:

$$U_{\text{вих}} = \begin{cases} 1, \ \Delta_\Delta \le 0; \\ 0, \ \Delta_\Delta > 0; \end{cases} \tag{6}$$

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

Точність задання і підтримування тиску обумовлюється параметрами САК в квазістатичному режимі, так як САК може використовуватися за своїм прямим призначенням лише після установлення 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, разом з виразами (4 – 6), буде наступний:

$$p(s) = p_1(s) + W_{\text{нг}}(s);$$

$$p_1(s) = \begin{cases} \dfrac{k_н p_н}{s}, \ \Delta N(s) > \Delta_N; \\ p_i \pm k_g \Delta, \ -\Delta_N \le \Delta N(s) \le \Delta_N; \\ \dfrac{p_в}{(T_0 s + 1)}, \ \Delta N(s) < -\Delta_N; \end{cases}$$

$$\Delta N(s) = N_i - N(s);$$

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

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

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

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

Висновки. Виконана оптимізація динамічних процесів в релейній цифровій системі автоматизованого контролю засобів вимірювання повітряного тиску, яка може бути використана для синтезу автоматичної системи контролю, градуювання і повірки, оптимальної за точністю, надійністю і швидкодією, з бажаним одностороннім перехідним процесом для зняття варіації показань ЗВТ.

Для повного аналізу динамічних процесів в частотних САК, які включають як аналогові (пневматичні, механічні, електричні), так і цифрові перетворення, розроблена комплексна математична модель динамічних процесів в САК.

Оптимізація динамічних процесів за точністю, швидкодією і надійністю (мультикритеріальна оптимізаційна задача) дозволила вибрати в результаті релейний виконавчий пристрій керування.

Крім того, матеріали статті можуть бути використані при подальшій розробці високоточних і надійних САК для автоматизації повірки і градуювання засобів вимірювань тиску повітря в діапазоні 0,5…114 кПа в якості апаратного метрологічного засобу.

Використання релейного принципу керування в порівнянні з аналоговим дозволить в 1,5–2 рази збільшити швидкодію контролю, а

облік запізнювання електромеханічних ланок САК дасть можливість підвищити швидкодію без пониження точності завдання тиску.

Використані джерела інформації:

1. *Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. - М.: Издательство стандартов, 1990. – С. 69-74.*
2. *«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.*
3. *Нечипоренко Е. Н., Полишко С. П. Создание высокоточных и быстродействующих задатчиков давления газа // Измерительная техника, № 8. – 1989. – С. 32-34.*
4. *Нечипоренко О. М. Основи надійності літальних апаратів. Навчальний посібник з грифом МОН України. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 240 с. – Бібліогр.: 235-238. – 300 пр. – ISBN 978-966-622-360-2.*
5. *Рапопорт Э. Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. — М.: Высшая школа, 2009. — 677 с.*
6. *Реклейтис Г., Рейвидран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. – М., 1986. – С. 196-225.*
7. *Ловчаков В. И., Сухинин Б. В., Сурков В. В. Оптимальное управление электротехническими объектами. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – С. 23-51.*
8. *Жодзішский М. І. Цифрові системи фазової синхронізації. – М.: Радіо, 2000. – С. 54-77.*
9. *Нечипоренко О. М. Математична модель релейної цифрової системи автоматичного регулювання // 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.*
10. *Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 400 с.*
11. *Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1985. – 392 с.*