

УДК 621.317

Нечипоренко О. М., к.т.н., доцент  
НТУУ «КПІ», м. Київ

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЛЕЙНОЇ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

*Розроблена комплексна математична модель релейної цифрової системи автоматичного регулювання повітряного тиску, яка може бути використана для синтезу автоматичної системи градуювання і повірки, оптимальної за точністю, надійністю і швидкодією, з бажаним одностороннім перехідним процесом під час зняття варіації показань градуйованих і повіряємих засобів повітряного тиску.*

*The complex mathematical model of the relay digital system of automatic control of air pressure was developed, which can be utilized for the synthesis of the system of the automatic calibrating and check, optimum on exactness, reliability and fast-acting, with the desired one-sided transient during the readings of variation and recalibrate air pressure measuring sensors.*

*Разработана комплексная математическая модель релейной цифровой системы автоматического регулирования воздушного давления, которая может быть использована для синтеза системы автоматической градуировки и поверки, оптимальной по точности, надежности и быстрдействию, с желаемым односторонним переходным процессом во время снятия вариации показаний градуируемых и поверяемых средств измерения воздушного давления.*

*Вступ.* Проблема створення високоточних і надійних систем автоматичного регулювання (САР) повітряного тиску, що реалізують будь-яку бажану функцію зміни тиску, є *актуальною*, тому що тісно пов'язана з задачею комплексної автоматизації технологічних процесів на виробництві [1], в тому числі контролю та повірки продукції приладобудівних підприємств і з підвищенням надійності таких систем [2].

Систему автоматичного регулювання можна створити на базі автоматичного задачника тиску (АЗТ). При розробці САР повітряного тиску постають традиційні задачі: підвищити їх точність, швидкодію, надійність. Важливою і актуальною, але нерозв'язаною задачею є забезпечення одностороннього перехідного процесу САР без погіршення точності і надійності, з максимальною швидкодією. Важливість забезпечення одностороннього перехідного процесу для повіряємих операцій полягає в

необхідності визначення *варіації* показань повіряємих засобів вимірювання. Існуючі САР [3] та автоматичні задатчики (вантажнопоршневі) [4] мають коливальний процес, що не дозволяє зняти варіацію показань повіряємих приладів, яка необхідна для нормування їх метрологічних і надійнісних характеристик, тобто не мають одностороннього перехідного процесу, а також мають недостатню швидкодію. Частотний АЗТ [5] від вантажнопоршневих відрізняється тим, що він представляє собою нелінійну систему автоматичної стабілізації з релейним виконавчим пристроєм і адаптивним керуванням з високими показниками безвідмовності і довговічності [2]. Тому для розробки САР повітряного тиску такий АЗТ підходить найбільше.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що розроблена САР повітряного тиску представляє *релейну* цифрову систему, в якій формується *односторонній* підхід до задаваного рівня тиску і реалізований без погіршення надійності *оптимальний за швидкодією* алгоритм функціонування, що працює в області середнього та низького вакууму. В даний час недостатньо повно досліджені релейні цифрові системи, вимірювальним сигналом яких є частота. Крім того, для розробників аналогічних систем [6, 7] важливо досліджувати як надійність, так і їх метрологічні характеристики.

*Постановка задачі.* Метою даної роботи є розробка математичної моделі системи автоматичного регулювання повітряного тиску з урахуванням динамічних процесів у ній для її використання при проектуванні і розробці САР повітряного тиску, оптимальних за точністю, надійністю і швидкодією, з бажаним перехідним процесом.

Нижче наведено результати аналізу обмежень, умов і припущень при розробці САР, оптимальної за точністю, надійністю і швидкодією. Такий аналіз необхідний для створення автоматичних засобів зняття статичних (градувальних) 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 САР**

САР з частотним АЗТ являє собою динамічну систему [8], тому швидкодія і похибка задання тиску залежить від його динамічних характеристик. Перехід від попереднього до наступного значення тиску рівнозначний реакції САР на стрибкоподібну зміну задавального впливу  $N_i$ , тобто дослідження швидкодії САР зводиться до аналізу бажаних і дійсних перехідних характеристик для неодноразового ступінчастого впливу  $(N_i - N_{i-1})l(t)$ , де  $l(t)$  – одинична стрибкоподібна функція [9].

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

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

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

- 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 повіряємого ЗВТ  $\Delta_p \leq k\Delta$ , де  $\Delta_p, \Delta$  – допустимі абсолютні похибки задатчика і повіряємих ЗВТ відповідно;  $k$  – коефіцієнт запасу за точністю, визначається метрологічними вимогами.

В такому випадку оптимальним за швидкодією буде перехідний процес, що має два інтервали: на першому повинна здійснюється максимальна подача (або відкачування) газу (максимальний розгін системи), на другому – максимальне демпфування (гальмування) при досягненні заданого рівня. Отже, ідеальна перехідна функція тиску  $p_{i0}(t)$  являє собою функцію, що має розрив першого роду (тобто є *релейною*), коли  $\frac{dp}{dt} \rightarrow \infty$  (на першому, так званому форсованому режимі,  $t_{i-1} = t_0$ ), і коли  $\frac{dp}{dt} = 0$ ;  $\Delta p = 0$  на час витримки тиску  $t_b$  (на другому, так званому статичному режимі).

Структурна схема цифрової релейної САР повітряного тиску на основі частотного АЗТ [5] наведена на рис. 1.

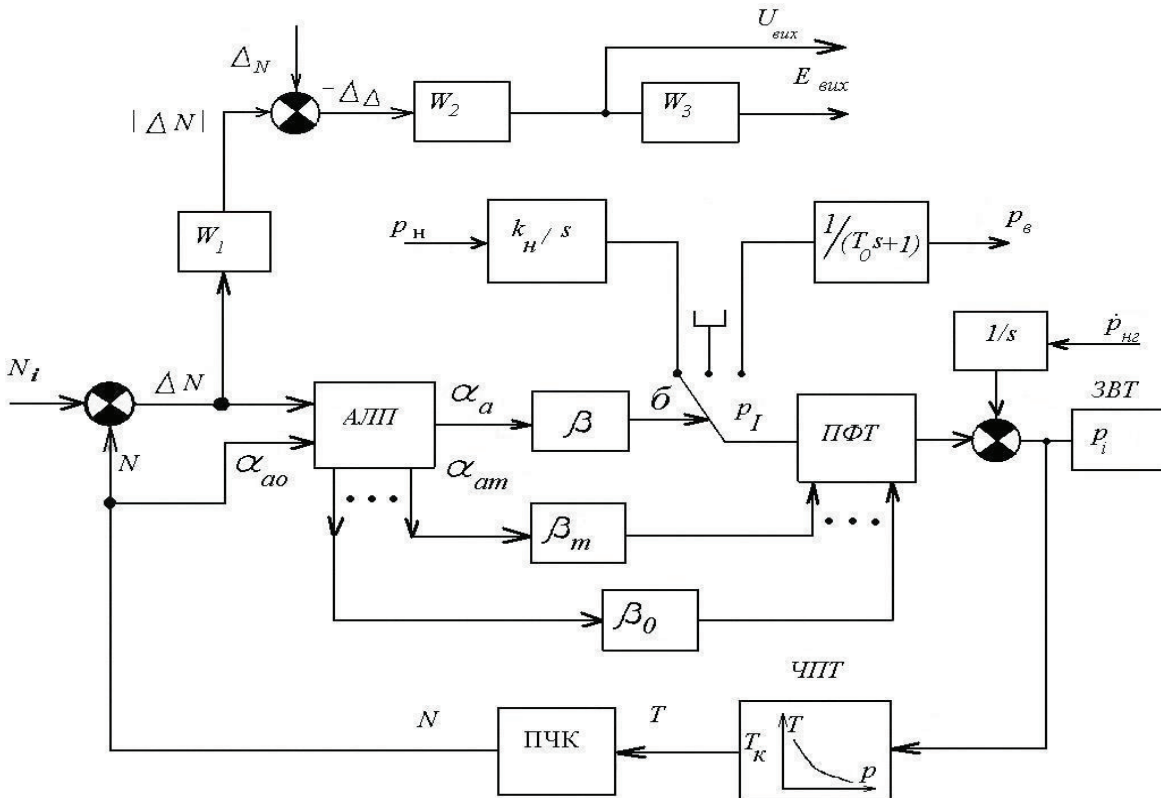


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного регулювання повітряного тиску

Елементи схеми (рис. 1) наступні: АЛП – цифровий арифметико-логічний пристрій; ПЧК – перетворювач частотного сигналу в цифровий код; ЧПТ – частотний вимірювальний перетворювач тиску; ПФТ – пристрій формування тиску; ЗВТ – засоби вимірювання тиску, що повіряються. Цифровий код  $N_i$  відповідає заданому значенню тиску  $p_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ , де  $n$  – кількість заданих рівнів тиску в САР), він є задавальним діянням 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 САР. В АЛП реалізується багатоступінчастий режим формування тиску під час використання способу порозрядного адаптивного керування [4, 9], 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  $k=0, 1, \dots, m$ ,  $m$  – число ступенів при формуванні тиску,  $Q$  – основа системи числення,  $v_k$  – цілочисельна величина, названа авторами коефіцієнтом адаптації,  $q_k$  – ступінь квантування.

У даній САР 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 ( $q_k = 10$ ).

### Математична модель процесів в САР 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 [10].

Принципова пневматична схема виконавчого релейного пристрою формування тиску (ПФТ) цифрової САР представлена на рис. 2, де  $K$  – компресор,  $B$  – вакуумний насос, БФС – блок фільтра зі стабілізатором;  $K_0, K_H, K_B, K_1, \dots, K_m$  – пневмоелектроклапани;  $D_1, D_H, D_B, D_1, \dots, D_m$  – регульовані пневмоопори;  $p_H$  і  $p_B$  – значення тисків в джерелі пневможивлення відповідно в пневмережі надлишкового тиску і вакуумної пневмережі. Вентилі  $D_H$  і  $D_B$  призначені для наближеного зрівнювання швидкостей відкачки і нагнітання згідно виразу  $f_{ox} \leq f_{nx}(p_0 - p_B) / p_H$ , де  $f_{ox}, f_{nx}$  – ефективна площа прохідного перерізу еквівалентних пневмоопорів автоматичного задатчика тиску на зворотному і прямому ході;  $p_0$  – початковий тиск в робочій камері.

Структуру ПФТ можна розглядати як сукупність двох послідовно з'єднаних пристроїв: класичного трьохпозиційного пневмореле (I) з непарно-симетричною статичною характеристикою і демпфуючої ланки (II) у вигляді пневмоопорів змінної структури, реалізованого на декількох паралельно з'єднаних пневмогілках з різними пневмопровідністю.

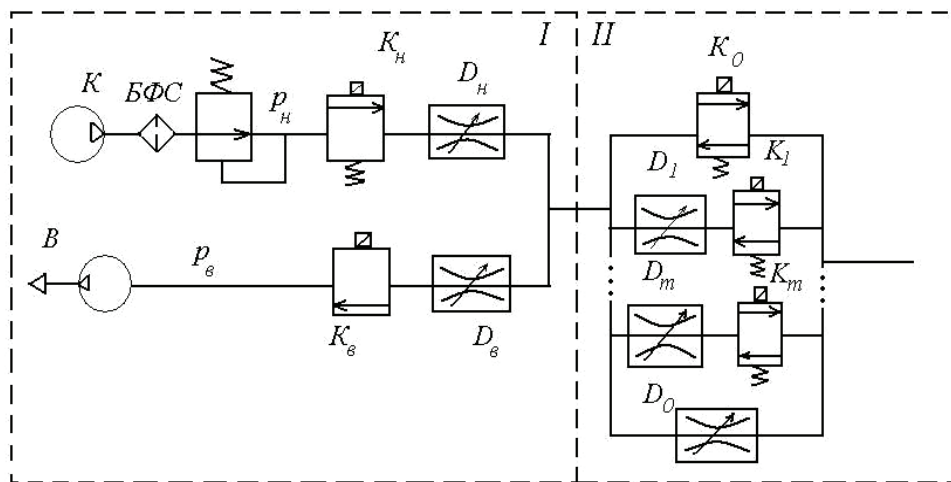


Рис. 2. Принципова пневматична схема виконавчого пристрою формування тиску

Блок (I) з'єднання пневмоелектроклапанів  $K_H$  і  $K_B$  представляють собою двоканальний релейний перемикач. 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).

Для простішої схемної та програмної реалізації САР повітряного тиску в статті пропонується алгоритм порозрядного адаптивного керування по цифровому коду  $N$ . Коли порівнюється заданий код  $N_i$  з текучим значенням  $N$ , клапан  $K_0$  закривається при співпадінні  $v$  старших розрядів,  $v=1, \dots, l-m$ , де  $l+1$  - кількість цифр числа  $N_i$ , клапан  $K_1$  - при співпадінні  $v+1$  старших розрядів і т. д. Ширина похибки  $\Delta N$  відпрацювання коду  $N_i$  визначається молодшим розрядом коду  $N_i$  і відпрацьовується клапанами  $K_n$  і  $K_e$  завдяки статичним характеристикам. Керування клапанами  $K_0, K_j$  здійснюється по лініях перемикачів.

Алгоритм порозрядного адаптивного керування для форсованого режиму можна представити у вигляді

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

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

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

Значення коефіцієнтів адаптації  $v_k$  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 градууювальної характеристики ЧПТ

$$v_k = \lg \left\{ \tau \frac{\left[ \frac{dN(p, t)}{dt} \right]_{\Phi}}{q_k} \right\}, \quad (1)$$

де  $\tau$  – час запізнювання електромеханічних ланок САР. Розраховані за виразом (2) цілочисельні значення коефіцієнтів адаптації  $v_k$  уточнюються експериментально під час налаштуванні САР регульованими пневмовентиллями. При цьому має виконуватися умова  $0 \leq v_k \leq \gamma$ , де  $\gamma$  – розрядність числа  $N_i$ .

Трьохпозиційне пневмореле ПФТ на рис. 2 показане умовно як трипозиційний перемикач, виконаний у вигляді двох паралельних пневмомагістралей, що з'єднують пневмоблок САР з мережею джерела пневможивлення з рівнями тиску  $p_H$  (надлишкова пневмомережа),  $\delta_a$  (вакуумна пневмомережа). Під час надкритичного витоку повітря передатні функції цих пневмомагістралей пневмореле різні:

– для надлишкової пневмомережі  $W_H(s) = \frac{k_H}{s}$ ,  $p(t) < p_i$   
(інтегруюча ланка),

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

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

Вимірювання тиску в робочій порожнині САР здійснюється ЧПТ [10] з нелінійною характеристикою, яку можна ідентифікувати математичною моделлю

$$p(T) = \sum_{\lambda=0}^{\eta} a_{\lambda} \left( \frac{1}{T} \right)^{\lambda}, \quad (2)$$

де  $T$  – період частотного сигналу;  $a_{\lambda}$  – сталі коефіцієнти. Для ЧПТ з механічним резонатором у вигляді вібруючого циліндра, що працює в автоколивальному режимі, математична модель була знайдена за експериментальними даними методом групового обліку аргументів. При обробці даних на ЕОМ середньоквадратичне відхилення при  $\eta \leq 5$  не перевищувало 10 Па. Період вимірювався перетворювачем ПЧК за методом дискретного підрахунку з часовим імпульсним кодуванням. Цифрове значення  $N(T)$  періоду  $T$  фактично відрізняється від періоду  $T$  на похибку квантування, що для цифрових вимірювальних пристроїв дорівнює одиниці молодшого розряду  $q_x$ .

Для квантованної за рівнем величини маємо

$$N_{\text{кв}}(t) = \text{Ent} \left[ \frac{N(t)}{q_x} \right], \quad (3)$$

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  $E_{\text{вих}}$ . 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  $\Delta$  – допустима абсолютна похибка САР за тиском. Описаний режим роботи світлодіода в САР реалізується послідовним перетворенням сигналу відхилення  $\Delta N$  в цифровому блоці формування керуючих сигналів АЛП. На рис. 1  $W_1$  – передатна функція ланки, яка здійснює визначення абсолютної величини  $|\Delta N|$  (модуля відхилення);  $\Delta_N$  – ширина допуску абсолютної похибки за тиском  $\Delta$ ,  $\Delta_\Delta = |\Delta N| - \Delta_N$ ;  $W_2$  – передатна функція релейного порогового пристрою з характеристикою:

$$U_{\text{вих}} = \begin{cases} 1, & \Delta_\Delta \leq 0; \\ 0, & \Delta_\Delta > 0; \end{cases} \quad (4)$$

$W_3$  – передатна функція світлодіода (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 САР в квазістатичному режимі, так як САР може використовуватися за своїм прямим призначенням лише після устанавлення перехідних процесів в системі. При квазістатичному режимі, коли САР працює в околицях заданого рівня тиску  $p_i$ , відхилення і швидкість зміни відхилення параметрів САР невеликі. Ця обставина дозволила провести ряд перетворень, що значно спрощують комплексну математичну модель динамічних процесів САР і її структурну схему. Загальний вигляд комплексної математичної моделі динамічних процесів в релейній цифровій САР, разом з виразами (2-4), буде наступний [8]:

$$p(s) = p_1(s) + W_{\text{нт}}(s);$$



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

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

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

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

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

де  $U'$ ,  $U^0$  – рівні логічних одиниць і нуля;  $L[N(t)]$  – зображення за Лапласом функції  $N(t)$ . Виведення виразу  $L[N(t)]$  в залежності від  $T(s)$  описаний в [11].

Для багатозначної кодокерованої міри відносно похибку відтворення тиску можна представити у вигляді

$$\delta = \left[ \frac{(p_{ni} - p_i)}{p_i} \right] \cdot 100 = \left[ \frac{\psi_n(N_i) - p_i}{p_i} \right] \cdot 100,$$

де  $p_{ni}$  – приписуване мірою  $i$ -е значення інформативного сигналу (тиску);  $\psi_n(N_i)$  – номінальна градуовальна характеристика міри.

Після закінчення перехідних процесів схему САР можна вважати розімкненою з послідовним з'єднанням ланок: ЧПТ, ПЧК і АЛП. Оцінка похибки САР проводиться, коли пневмосхема практично герметична (можна вважати  $\dot{p}_{\text{нт}} = 0$ ). Таким чином,  $\delta \leq \delta_f + \delta_{\text{п}} + \delta_i$ , де  $\delta_f$ ,  $\delta_{\text{п}}$  і  $\delta_i$  - відповідно відносні похибки ЧПТ, ПЧК та АЛП.

Для ЧПТ з пружним елементом у вигляді металевого вібруючого циліндра  $\delta_f \leq 0,01\%$  [7]. Цю похибку можна зменшити селекційним відбором, індивідуальним градуюванням і термостатуванням ЧПТ.

Для приладів, заснованих на методі зіставлення циклічної дії, які широко використовуються в промислових електронно-лічильних частотомірах,

$$\delta_{\text{п}} \leq \pm \left[ \delta_0 + r^{-1} (\delta_3 + T_{\text{max}} T^{-1}) \right],$$

де  $\delta_0$  – відносна похибка частоти опорного генератора (для термостатування кварцових генераторів  $\delta_0 = \pm 5 \cdot 10^{-5} \%$ ;  $\delta_{B3}$  – відносна похибка рівня запуску (для прямокутних імпульсів  $\delta_{B3} = 0$ );  $r$  – число усереднених періодів;  $T_{max}$  – період проходження тактових імпульсів опорного генератора;  $T$  – вимірюваний період.

Відносна похибка АЛП складається з похибки  $\delta_N$  визначення заданих числових кодів  $N_i$ , яка представляє собою похибку градуювання ЧПТ і виражається формулою  $\delta_N = \delta_3 + \delta_{\Pi}$ , де  $\delta_3$  – відносна похибка зразкового манометра, використовуваного для градуювання ЧПТ,  $\delta_{\Pi}$  – відносна похибка ПЧК. Таким чином,  $\delta \leq \delta_f + 2\delta_{\Pi} + \delta_3$ , де  $\delta_f$  – відносна похибка ЧПТ.

Для робочого діапазону  $T_{min} \dots T_{max}$ , відповідного 150...230 мкс, для  $r = 100$ ,  $T_{max} = 0,1$  мкс оцінене за комплексною математичною моделлю значення відносної похибки САР у відсотках  $\delta \leq 0,0048 + \delta_{з.м.}$ .

Отже, відносна похибка розробленої релейної цифрової САР може не перевищувати 0,005 %.

*Висновки.* Розроблена комплексна математична модель релейної цифрової системи автоматичного регулювання повітряного тиску, яка може бути використана для синтезу автоматичної системи градуювання і повірки, оптимальної за точністю, надійністю і швидкодією, з бажаним одностороннім перехідним процесом для зняття варіації показань засобів вимірювання повітряного тиску.

Крім того, ця модель необхідна для повного аналізу динамічних процесів в частотних САР, які включають як аналогові (пневматичні, механічні, електричні), так і цифрові перетворення. Крім того, матеріали статті можуть бути використані при подальшій розробці високоточних і надійних САР для автоматизації повірки і градуювання засобів вимірювань тиску повітря в діапазоні 0,5...114 кПа в якості апаратного метрологічного засобу.

*Використані джерела інформації:*

1. Комиссарчик В. Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: Учебное пособие. Тверь: ТГТУ, 2001. – С. 120-130.
2. 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.
3. Проць Я. І., Данилюк О. А., Лобур Т. Б. Автоматизація неперервних технологічних процесів – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. – С. 7-67.
4. Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. - М.: Издательство стандартов, 1990. – С. 69-74.

5. «Программный задатчик давления», Нечипоренко О. М., Полишко С. П. Авторське свідоцтво СРСР № 1546941 від 1 лютого 1988, зареєстровано в Держреєстрі винаходів СРСР 01.10.89 р.
6. Ловчаков В. И., Сухинин Б. В., Сурков В. В. Оптимальное управление электротехническими объектами. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – С. 23-51.
7. Жодзішский М. И. Цифрові системи фазової синхронізації. – М.: Радіо, 2000. – С. 54-77.
8. Нечипоренко Е. Н., Полишко С. П. Создание высокоточных и быстродействующих задатчиков давления газа // Измерительная техника, № 8. – 1989. – С. 32-34.
9. Реклейтис Г., Рейвидран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. – М., 1986. – С. 196-225.
10. Пархоменко В. Л., Нечипоренко О. М. Динамічні процеси цифрового вимірювального перетворювача частотної САР // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія «Техніка». Вип. 1. За заг. ред. В. К. Присяжнюка. – К.. Видавничо-поліграфічний центр Академії муніципального управління, 2010. – С. 119-126.
11. Нечипоренко Е. Н., Полишко С.П. Математическая модель задатчика давления // Измерительная техника, № 10. – 1991. – С. 32-33.