

УДК 621.3.08:581.12

Ю.М. Куценко, доц., канд. техн. наук

Таврійський державний агротехнологічний університет

## Аналіз якості роботи електронної системи контролю дихання рослин

В роботі проведено аналіз якості роботи системи контролю параметрів дихання рослин, визначені коефіцієнти передачі лінійної системи ЧАП. Проведений аналіз якості роботи електронної системи вказує, що оптимальний коефіцієнт передачі лінійної системи ЧАП складає,  $5 \cdot 10^5$ , а помилка від дії внутрішніх шумів знаходиться в межах  $0,018 \text{ рад}^2$ .

**діелектрична проникність газового середовища, дихання рослин, система частотного автопідстроювання**

*Постановка проблеми.* В електронних системах вимірювання змін діелектричної проникності (ДП) газового середовища рослин системи перетворення частоти будуються на основі систем частотного автопідстроювання частоти (ЧАП). При аналізі динаміки таких систем слід враховувати наступні обставини: чутливість вимірювань до  $10^{-6}$  для величини  $\Delta \varepsilon'$  ставить підвищені вимоги як до короткочасної нестабільності частоти генератора до  $10^7 - 10^8$ , так і до величини коефіцієнта підстроювання  $k_{\text{ЧАП}}$  системи ЧАП, який має бути достатньо великим ( $10^5 - 10^6$ ).

У ряді випадків за допомогою простої лінійної статичної системи ЧАП необхідне значення коефіцієнта  $k_{\text{ЧАП}}$  реалізувати не вдається, оскільки не виконується умова стійкості.

Тому виникає необхідність застосування астатичних систем ЧАП. Для збільшення стійкого коефіцієнта ЧАП при запізнюванні необхідно, щоб постійна часу фільтра амплітудно-фазового детектора була значно більше часу запізнювання, проте її збільшення обмежується заданою швидкістю системи [1].

*Аналіз останніх досліджень.* Для електронної статичної системи ЧАП (рис. 1) необхідна величина  $k_{\text{ЧАП}}$  визначається із співвідношення

$$k_{\text{ЧАП}} \geq \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{МАКС}}} , \quad (1)$$

де  $\Delta f$  – початковий розлад вимірювального перетворювача (його максимальна величина дорівнює напівширині смуги пропускання системи резонатора);

$\Delta f_{\text{МАКС}}$  – максимально допустиме абсолютне відхилення частоти генератора.

Для повної і всебічної оцінки системи ЧАП необхідно досліджувати такі показники, як ступінь стійкості системи, характер перехідного процесу, тривалість перехідного процесу, перерегулювання, статистичну і динамічну помилки [2]. Оцінити вказані показники системи можна в результаті вирішення диференціального рівняння, що описує перехідні процеси. Безпосереднє вирішення рівнянь пов'язане з великими труднощами [3]:

- рівняння, що точно описують поведінку реальних систем, є нелінійними високого порядку і точного рішення не мають;

- для забезпечення потрібної якості регулювання доводиться вибирати параметри проектованої системи, а не досліджувати вже готову систему.

Вказані обставини примушують користуватися спрощеною моделлю і удаватися до наближених методів, які спричиняють зниження точності, а іноді і глибоке спотворення отримуваних оцінок.

*Формулювання цілей статті.* Метою є аналіз структурно-динамічних систем частотного автопідстроювання частоти та вибір параметрів системи АПЧ, при якому мінімізується помилка стеження частоти генератора за зміною частоти ІР.

*Основна частина.* Для аналізу структурно-динамічних систем ЧАП використовуємо імітаційну модель на основі математичного опису досліджуваної системи, яка дозволяє прогнозувати хід досліджуваних процесів в проєктованому об'єкті за заданих умов функціонування, підвищити точність і надійність рішення задачі, документованість отриманих результатів [4]. Для аналізу застосовується пакет моделювання безперервних процесів (ПМБП), який містить набір обчислювальних програм, орієнтованих на аналіз руху систем, що описуються диференціальними рівняннями. За допомогою пакету ПМБП можна моделювати процеси, що описуються структурно-динамічними схемами або системою диференціальних рівнянь. Для вирішення вказаних завдань в пакеті є базовий набір обчислювальних засобів, що дозволяють моделювати процеси в елементарних динамічних ланках, типових нелінійностях, логічних пристроях [5]. Цей метод дозволяє досліджувати лінійні, нелінійні, дискретні і нестационарні системи з детермінованими сигналами. Побудову моделі починають з розбиття досліджуваної системи на елементи і виділення зв'язків між ними. При цьому істотне значення мають лише ті властивості елемента, які впливають на його взаємодію з іншими елементами системи.

Як початкову інформацію, необхідну для складання відповідного фрагмента програми, розглянемо структурно-динамічну схему на рис. 1.

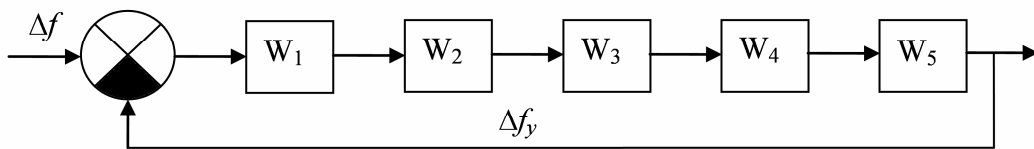


Рисунок 1- Структурно-динамічна схема лінійної системи ЧАП

Аналіз проведимо в припущенні, що відхилення частоти, викликані досліджуваним газом, лежать в межах лінійної області характеристик елемента, що управляє, і дискримінатора. На рисунку 1 резонатор представлений суматором, на входи якого надходять сигнали  $\Delta f_y$  і  $\Delta f$ . Сигнал  $\Delta f$  визначає зміни резонансної частоти резонатора при змінах дійсної складової ДП газу, а  $\Delta f_y$  – зміну частоти генератора. Решту ланцюга регулювання системи ЧАП можна представити із з'єднань ряду аперіодичних і безінерційних ланок. Передавальна функція вимірювального резонатора (ІР), що виконує роль дискримінатора як елемента ланцюга регулювання, в операційній формі запишеться у вигляді аперіодичної ланки

$$W_1(P) = \frac{k_{IP}}{1 + T_{IP}P}, \quad (2)$$

де  $k_{IP}$  – крутизна характеристики ІР, величина якої визначається добротністю вживаного резонатора;

$T_{IP}$  – постійна часу, що визначається співвідношенням;

$Q_o$  – добротність навантаженого резонатора;

$\omega_p$  – власна частота резонатора.

Вибірний підсилювач можна розглядати у вигляді аперіодичної ланки для ІІ на основі відкритих резонаторів, передавальна функція якого має вигляд

$$W_2(P) = \frac{k_y}{1 + T_y P}, \quad (3)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт посилення підсилювача;

$T_y$  – постійна часу підсилювача.

Інерційність підсилювача обумовлена вибраною частотою модуляції і вимогам до вибірковості за другою гармонікою. Частота модуляції  $\Omega_M$  не повинна перевищувати половини ширини смуги пропускання резонатора, а вибірковість має бути не менше 40 дБ [1].

Враховуючи вищевикладене, постійну часу вибірного підсилювача можна визначити з виразу [2]

$$T_y = n \frac{\alpha_\Delta}{\pi} \frac{1}{\Pi}, \quad (4)$$

де  $n$  – число каскадів;

$\alpha_\Delta$  – функція, залежна від типу каскадів підсилювача;

$\Pi$  – смуга пропускання підсилювача.

Передавальна функція амплітудно-фазового детектора залежить від параметрів фільтру на виході детектора і має вигляд

$$W_3(P) = \frac{k_{\phi Д}}{1 + T_{\phi Д} P}, \quad (5)$$

де  $T_{\phi Д}$  – постійна часу фільтра;

$k_{\phi Д}$  – коефіцієнт передачі, в кращому випадку рівний 1.

Підсилювач постійного струму є безінерційним елементом з передавальною функцією вигляду

$$W_4(P) = k_{\text{УПТ}}. \quad (6)$$

Пристрій електронного підстроювання частоти генератора в лінійній системі ЧАП слід розглядати безінерційною ланкою з передавальною функцією

$$W_5(P) = k_{\text{ЧЭ}}. \quad (7)$$

Програмний опис системи за допомогою засобів мови ПМНП є адекватним відображенням структурно-динамічної схеми (рисунок 1).

На рис. 2 показана приведена структурно-динамічна схема.

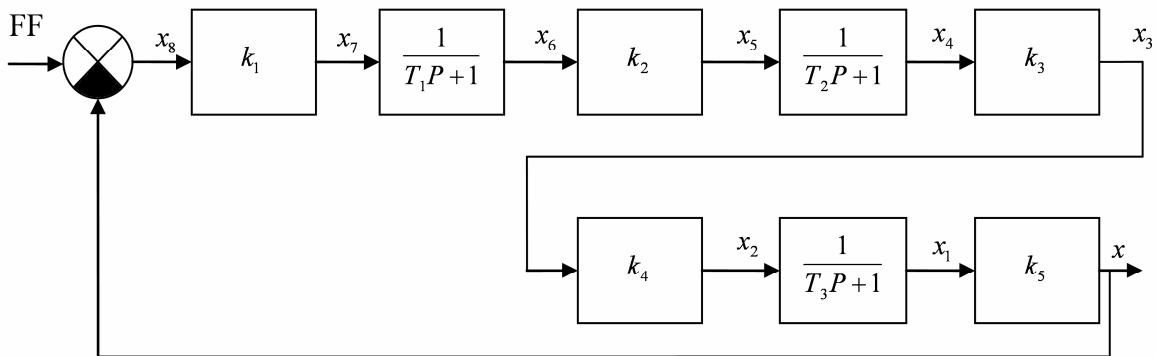


Рисунок 2 - Приведена структурно-динамічна схема лінійної системи

Маючи приведену структурно-динамічну схему, був досліджений перехідний процес системи ЧАП. Параметри системи ЧАП визначали за показниками якості перехідного процесу: коливання  $n = 1 \dots 2$ ; величина перерегулювання 10...20%, час встановлення перехідного процесу.

Аналіз перехідних процесів показав, що поставленим вимогам відповідає система з параметрами, перехідний процес, який наведений на рис. 3.

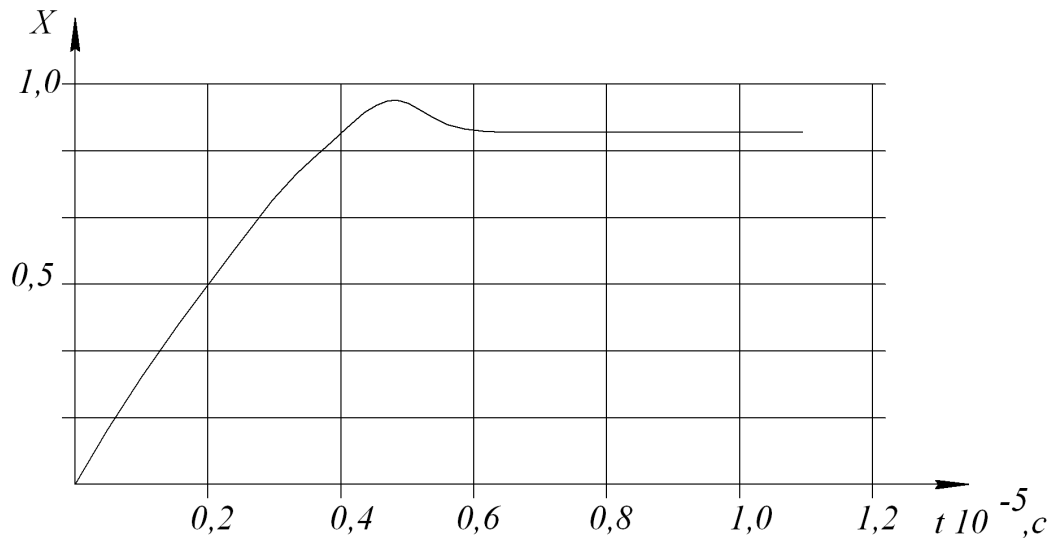


Рисунок 3 - Крива перехідного процесу для параметрів

Система з параметрами:  $k_1 = 10^{-7}$  В/Гц;  $k_2 = 10^2$ ;  $k_3 = 1$ ;  $k_4 = 10^2$ ;  $k_5 = 10^8$  В/Гц;  $T_1 = 10^{-7}$  с;  $T_2 = 10^{-6}$  с;  $T_3 = 0,1$  с, забезпечує час встановлення перехідного процесу  $t_y = 0,8 \cdot 10^{-5}$  с, величину перерегулювання менше 10%, а коефіцієнт передачі системи задовольняє умова (1).

У електронній системі ЧАП в сталому режимі слід враховувати помилку відтворення заданої дії і помилку, створювану внутрішніми обуреннями.

При коефіцієнті передачі системи ЧАП в межах  $10^5 \dots 10^6$  помилкою відтворення можна знехтувати, а ступінь точності вимірювання ДП газового середовища рослин визначатиметься дією внутрішніх шумів системи [1].

Проте, підвищення точності вимірювання ДП газу електронною системою ЧАП шляхом збільшення передавального коефіцієнта потребує додаткових заходів для забезпечення достатнього запасу стійкості. Це викликає необхідність компромісного рішення при визначенні параметрів ЧАП.

Методи аналізу детермінованих і випадкових процесів дозволяють вирішувати завдання по зниженню впливу внутрішніх шумів системи АПЧ на точність вимірювання ДП газу [1,6,7].

Мірою точності системи може бути середньоквадратичне відхилення частоти кварцевого генератора [8]. Середнє значення помилки може бути визначене за відомою функцією  $R(\tau)$  або спектральною щільністю, відповідною випадковій збурюючій дії з нормальним законом розподілу

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega) d\Omega, \quad (8)$$

де  $S(\Omega)$  – спектральна щільність, відповідна випадковому процесу.

У слідуючій лінійній системі спектральна щільність помилки залежить від спектральної перешкоди  $S_{\xi}(\Omega)$  і передавальної функції системи по відношенню до збурюючої дії [1,3]

$$S(\Omega) = |W(j\Omega)|^2 S_{\xi}(\Omega). \quad (9)$$

Точність даної системи ЧАП (рисунок 2) обмежена шумом детектора П і шумами першого каскаду вибірного посилення. Дисперсія помилки від перешкоди на вході вибірного підсилювача повинна задовольняти вимогу

$$\sigma^2 \ll \sigma_{\text{дон}}^2 = 0,02 \text{ рад}^2. \quad (10)$$

Як видно із структурно-динамічної схеми (рисунок 2), передавальна функція замкнутої системи для перешкоди, що діє на вході підсилювача, визначається виразом:

$$W_{\xi}(P) = \frac{W_2(P)W_3(P)W_4(P)W_5(P)}{1 + W_1(P)W_2(P)W_3(P)W_4(P)W_5(P)} = \frac{(T_{\text{ир}}P + 1)k_y k_{\text{фд}} k_{\text{упт}} k_{\text{уэ}}}{(T_{\text{ир}}P + 1)(T_y P + 1)(T_{\text{фд}}P + 1) + k_{\text{ир}}k_y k_{\text{фд}} k_{\text{упт}} k_{\text{уэ}}} \quad (11)$$

Враховуючи, що ширина спектру перешкоди значно більше еквівалентної смуги пропускання системи ЧАП, спектральну щільність перешкоди можна вважати за величину постійну

$$S_{\xi}(0) = 4kTR_{\Pi}, \quad (12)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;

$T$  – температура в градусах Кельвіна;

$R_{\Pi}$  – еквівалентний шумовий опір.

Тоді дисперсія помилки системи ЧАП визначатиметься виразом

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{(T_{\text{ип}} j\Omega + 1)k_y k_{\text{фд}} k_{\text{умн}} k_{\text{уэ}}}{(T_{\text{ип}} j\Omega + 1)(T_y j\Omega + 1)(T_{\text{фд}} j\Omega + 1) + k_0} \right|^2 S_{\xi}(0) d\Omega, \quad (13)$$

де  $k_0 = k_{\text{ир}}k_y k_{\text{фд}} k_{\text{уэ}}$

Використовуючи рівність Парсеваля [7-11]:

$$\bar{Y}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} Y^2(j\Omega) d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-j\infty}^{j\infty} Y(P)Y(-P) dP, \quad (14)$$

і враховуючи, що

$$Y(P) = \frac{C_m P^m + C_{m-1} P^{m-1} + \dots + C_0}{d_n P^n + d_{n-1} P^{n-1} + \dots + d_0}. \quad (15)$$

Вирішення для дисперсії помилки при  $m \leq n - 1$  запишемо у вигляді

$$C_1 = k_y \cdot k_{\text{фд}} \cdot k_{\text{упт}} \cdot k_{\text{уэ}} \cdot T_{\text{ир}}; \quad (16)$$

$$C_0 = k_y \cdot k_{\text{фд}} \cdot k_{\text{упт}} \cdot k_{\text{уэ}}; \quad (17)$$

$$d_2 = T_{\text{ир}}T_{\text{фд}} + T_y T_{\text{ир}} + T_y T_{\text{фд}}; \quad (18)$$

$$d_3 = T_{\text{ир}} \cdot T_y \cdot T_{\text{фд}}; \quad (19)$$

$$d_1 = T_{\text{ир}} + T_y + T_{\text{фд}}; \quad (20)$$

$$d_0 = 1 + k_{\text{ир}} \cdot k_y \cdot k_{\text{фд}} \cdot k_{\text{упт}} \cdot k_{\text{уэ}} \approx k_0. \quad (21)$$

Враховуючи  $C_2=0$ , остаточно запишемо

$$\sigma^2 = \frac{C_1^2 d_0 + C_0^2 d_2}{2d_0(d_1 d_2 - d_0 d_3)} S_{\xi}(0). \quad (22)$$

Для знаходження оптимального значення для  $k_0$  продиференціюємо отриманий вираз (22) за  $k_0$  і прирівняємо похідну нулю

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial k_0} = T_{\text{ир}}^2 d_3 k_0^2 + 2d_2 d_3 k_0 - d_2^2 d_1 = 0. \quad (23)$$

**Висновок.** Проведений аналіз якості роботи електронної системи вказує, що оптимальний коефіцієнт передачі лінійної системи ЧАП складає,  $5 \cdot 10^5$ , а помилка від дії внутрішніх шумів знаходиться в межах  $0,018 \text{ рад}^2$ .

## Список літератури

1. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование устройств и систем / И.П.Норенков - М.: Высш. шк., 1980. - 310 с.
2. Руководство по проектированию систем автоматического управления / Под рук. В.А.Бескерского - М.: Высш. шк., 1980. - 310 с.
3. Статистический анализ и оптимизация следящих систем [ науч. ред. А.В. Поцелуева] - М.: Машиностроение, 1977. - 360 с.
4. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов / А.И.Пихтелев, А.А.Ульянов, Б.П.Фатеев. - М.: Сов. Радио, 1978. - 304 с.
5. Конструирование и расчет полосковых устройств / [Голубев В.И., Ковалев И.С., Кузнецов Е.Г. и др.]; под ред. И.С. Ковалева - М.: Сов. радио, 1974. - 295 с.
6. Иванов М.А. Оптимизация нелинейных инерционных систем при случайных воздействиях / М.А.Иванов, А.М.Султанов, А.Д.Черенков - Харьков: 1984. - 10 с. - Деп. в ВИНТИ 23.05.1984, №3525-84.
7. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот / В.Ф.Коваленко - М.: Сов. радио, 1974. - 295 с.
8. Пихтелев А.И. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов / А.И.Пихтелев, А.А.Ульянов, Б.П.Фатеев. - М.: Сов. Радио, 1978. - 304 с.
9. V. Prabhu. Noise performance of abrupt – junction varactor frequency multipliers// Proc. IEEE. - 1966. - V.54, № 2. - p. 285.
10. О минимальном уровне амплитудного шума генераторов на ЛПД / В.М.Вальд-Перлов, Л.С.Сибирцев, А.С.Тигер // Радиотехника и электротехника - 1977. - Т. 22. - № 10. - С. 2186-2189.

*Ю. Куценко*

### **Анализ качества работы электронной системы контроля дыхания растений**

В статье выполнен анализ качества работы системы контроля параметров дыхания растений, определены коэффициенты передачи линейной системы ЧАП. Данный анализ качества работы электронной системы показывает, что оптимальный коэффициент передачи линейной системы ЧАП составляет  $5 \cdot 10^5$ , а ошибка от влияния внутренних шумов находится в пределах  $0,018 \text{ рад}^2$ .

*U. Kucenko*

### **The analysis of quality of work of the electronic monitoring system of breath of plants**

In the paper the analysis of the quality of the control system parameters of respiration of plants, defined transfer coefficients of the linear system frequency automatic frequency. The given analysis of quality of work of electronic system shows that the optimum factor of transfer of linear system CHAP makes  $5 \cdot 10^5$ , and the error from influence of internal noise is in limits  $0,018 \text{ рад}^2$ .

Одержано 27.04.10