

УДК 681.535

**О. І. Бріцький, В. О. Атаєв, В. М. Христін**  
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## **Шляхи вдосконалення сервопривода системи автоматичного фокусування станції лазерного запису оптичної інформації**

*Подано основні результати досліджень по створенню високоточного сервопривода системи автофокусування станції лазерного запису оптичної інформації.*

***Ключові слова:** станція лазерного запису оптичної інформації, сервопривод системи автофокусування, характеристики рельєфу підкладок, п'єзоелектричні виконавчі пристрої, підвищення порядку астатизму.*

### **Визначення вимог до сервопривода системи автофокусування. Постановка задачі дослідження**

З погляду керування головною особливістю сервопривода системи автоматичного фокусування станції лазерного запису (СЛЗ) оптичної інформації є те, що маса його рухомої частини на один-два порядки перевищує аналогічну в приводах компакт-дисків ПЕОМ. При цьому середньоквадратична помилка (СКП) фокусування не повинна перевищувати 0,025 мкм. Набагато жорсткіші вимоги до такої системи висуваються при переході до запису дисків-оригіналів стандарту DVD, що пояснюється, у першу чергу, необхідністю переходу на більш високі швидкості запису. При цьому системна та технологічна інформація про сервомеханізми автофокусування СЛЗ у відкритій науково-технічній літературі практично відсутня. Тому при розробці першої національної СЛЗ стандарту DVD задачу побудови сервопривода системи автофокусування необхідно вирішувати, фактично, спочатку.

Для визначення вимог до системи автофокусування були проведені дослідження рельєфу скляних підкладок різних виробників без попереднього відбору та полірування. Дослідження проводилися на базі виготовленої в інституті СЛЗ дисків-оригіналів CD-формату при нерухомій оптичній фокусуєчій системі з використанням ліцензійного обладнання компанії National Instruments. Узагальнені результати дослідження подані на рис. 1–3.

© О. І. Бріцький, В. О. Атаєв, В. М. Христін

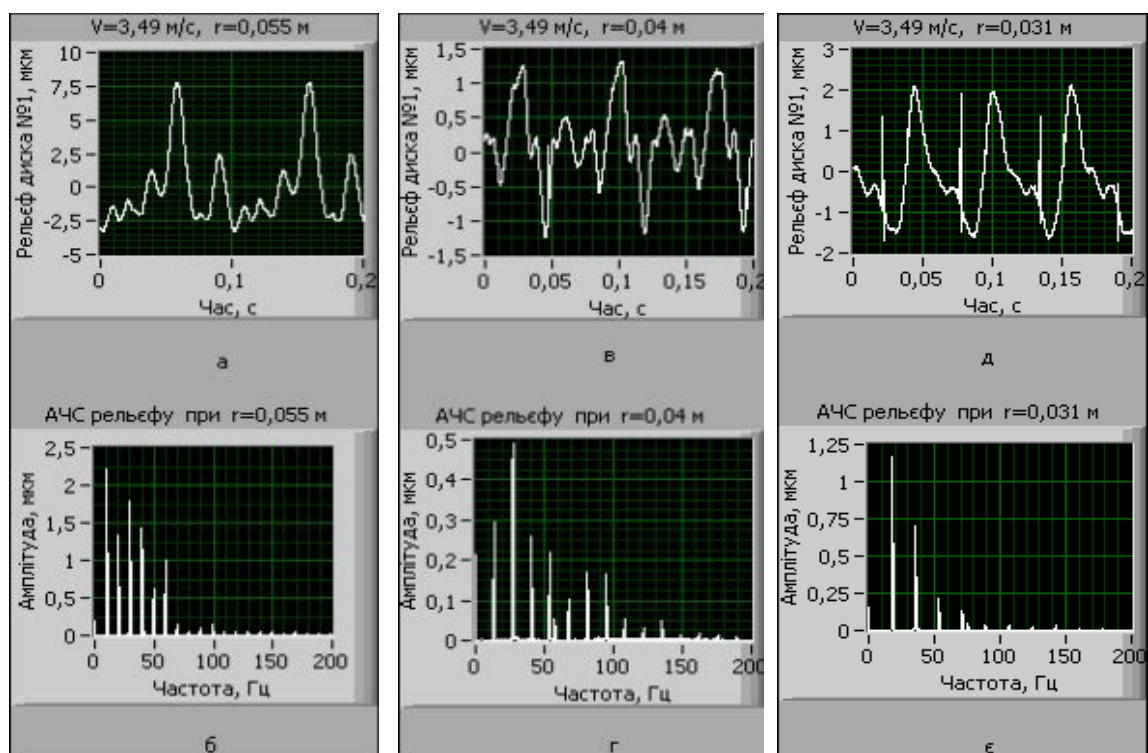


Рис. 1. Результати дослідження рельєфу диска № 1: а, в, д — розгортка рельєфу на різних радіусах:  $\sigma_a^2 = 7,46 \text{ мкм}^2$ ,  $\sigma_b^2 = 0,3 \text{ мкм}^2$ ,  $\sigma_d^2 = 1,05 \text{ мкм}^2$ ; б, г, е — відповідні амплітудно-частотні спектри

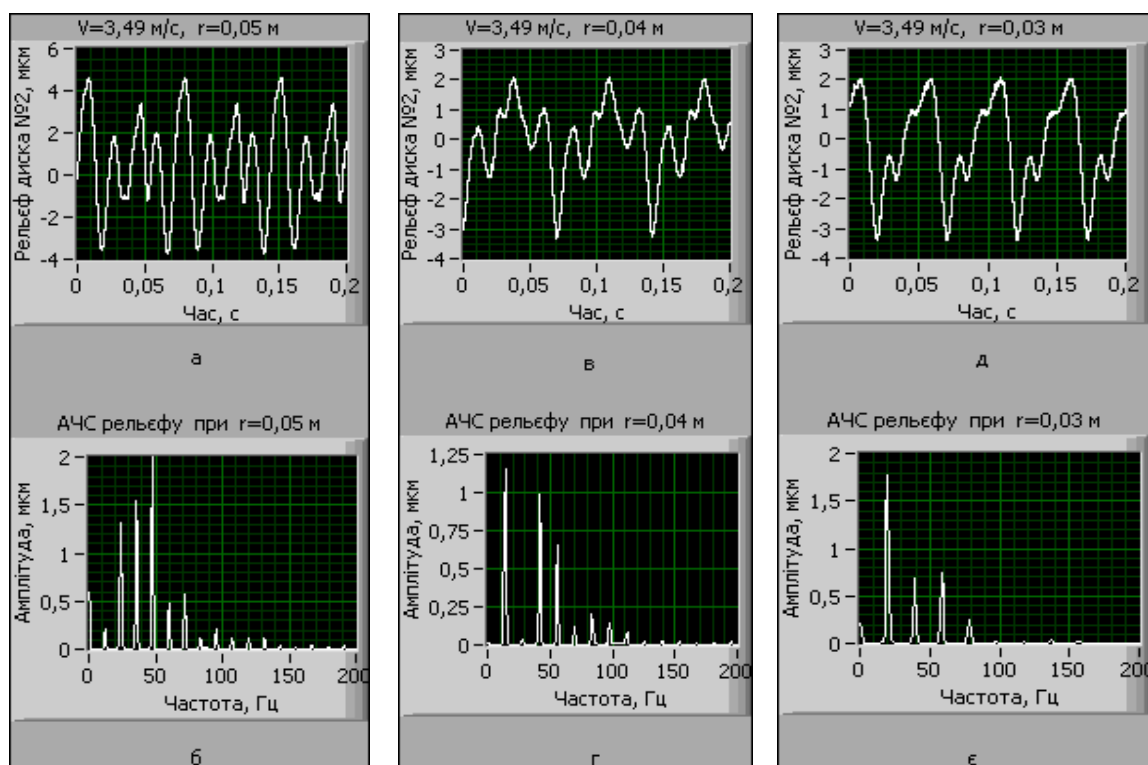


Рис. 2. Результати дослідження рельєфу диска № 2: а, в, д — розгортка рельєфу на різних радіусах:  $\sigma_a^2 = 4,87 \text{ мкм}^2$ ,  $\sigma_b^2 = 1,49 \text{ мкм}^2$ ,  $\sigma_d^2 = 2,35 \text{ мкм}^2$ ; б, г, е — відповідні амплітудно-частотні спектри

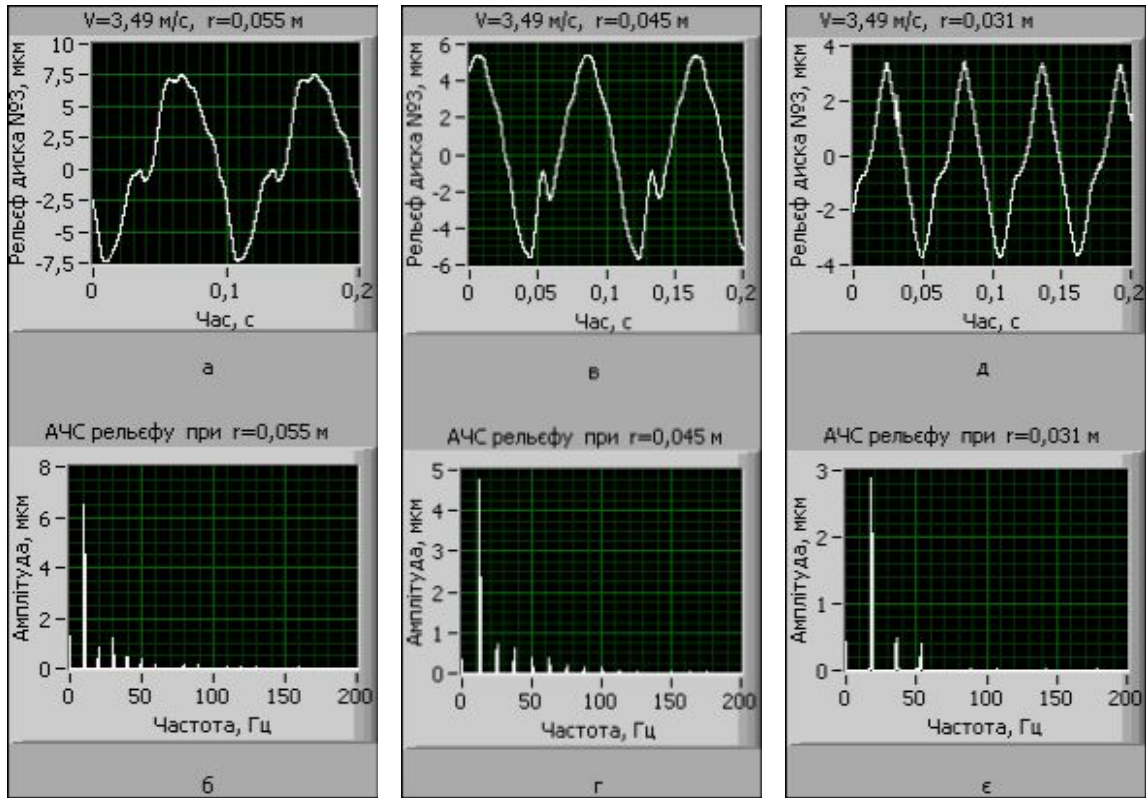


Рис. 3. Результати дослідження рельєфу диска № 3: а, в, д — розгортка рельєфу на різних радіусах:  $\sigma_a^2 = 22,9 \text{ мкм}^2$ ,  $\sigma_b^2 = 12,13 \text{ мкм}^2$ ,  $\sigma_d^2 = 4,45 \text{ мкм}^2$ ; б, г, е — відповідні амплітудно-частотні спектри

Порівнюючи рельєфи трьох дисків на різних радіусах і відповідні амплітудно-частотні спектри можна припустити, що після додаткової обробки з'являється можливість отримати підкладку з ефективною смугою частот рельєфу до 100 Гц та дисперсією  $\sigma_m^2 \leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ . Подальші дослідження показали, що для використання статистичних методів дослідження математичною моделлю узагальненого рельєфу підкладки може бути його спектральна густина у вигляді

$$S(\omega) = \frac{\alpha}{\beta^2 + \omega^4}, \quad (1)$$

де параметри  $\alpha$  і  $\beta$  необхідно вибирати з наступних міркувань:

$$\begin{cases} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi \cdot 100} S(\omega) d\omega = 0,99 \sigma_m^2, \\ \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi \cdot 20} S(\omega) d\omega = 0,5 \sigma_m^2. \end{cases} \quad (2)$$

При  $\sigma_m^2 = 10 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$  розв'язком системи (2) є пара  $\alpha = 3,18 \cdot 10^{-4}$ ,  $\beta = 5 \cdot 10^4$ , а графік спектральної густини рельєфу зображено на рис. 4.

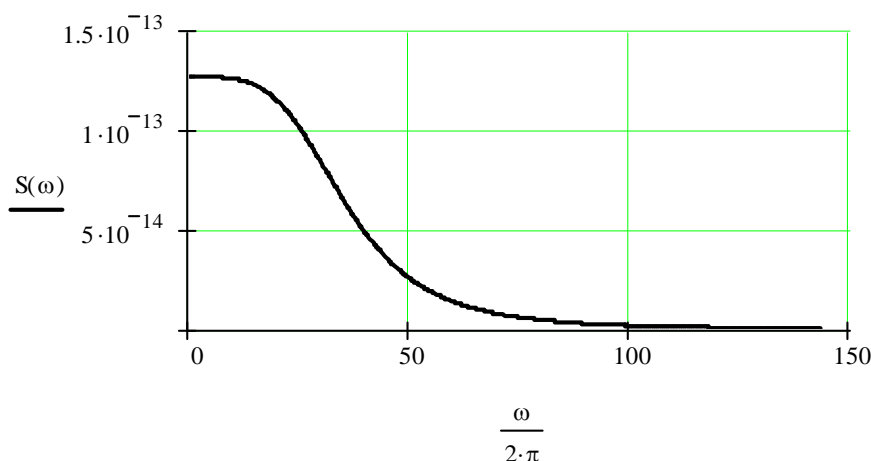


Рис. 4. Спектральна густина рельєфу узагальненої скляної підкладки для лінійної швидкості запису  $V_n = 3,49 \text{ м/с}$

Таким чином, задача дослідження полягає в наступному: оцінити можливість створення сервопривода системи автофокусування СЛЗ, яка забезпечує СКП відслідковування рельєфу узагальненої скляної підкладки не гірше 25 нм при масі рухомої частини до 0,2 кг.

### Розв'язання задачі

Головними перешкодами на шляху досягнення високої точності фокусування є відсутність достатньої інформації про вхідні та вихідні сигнали й, як наслідок, складність застосування сучасних методів оптимізації, а також наявність протиріччя між масою рухомої частини механізму та його потужністю. Тому перед тим, як синтезувати регулятор, було проаналізовано доцільність застосування можливих виконавчих пристроїв, таких як традиційний електромагнітний та п'єзоелектричний механізми фокусування.

Попередній аналіз науково-технічної літератури [1–6] свідчить про те, що значного покращення динамічних властивостей системи фокусування можна досягти шляхом застосування саме п'єзоелектричного привода рухомої частини. Тому, як наслідок теоретичних та експериментальних досліджень, були отримані граничні залежності постійних часу від маси рухомої частини для електромагнітного та п'єзоелектричного механізмів фокусування (рис. 5).

Розрахунок залежності  $Tr(m)$  виконано для двигуна довжиною 10 см із п'єзо-матеріалу ЦТС-35 з використанням методики [3].

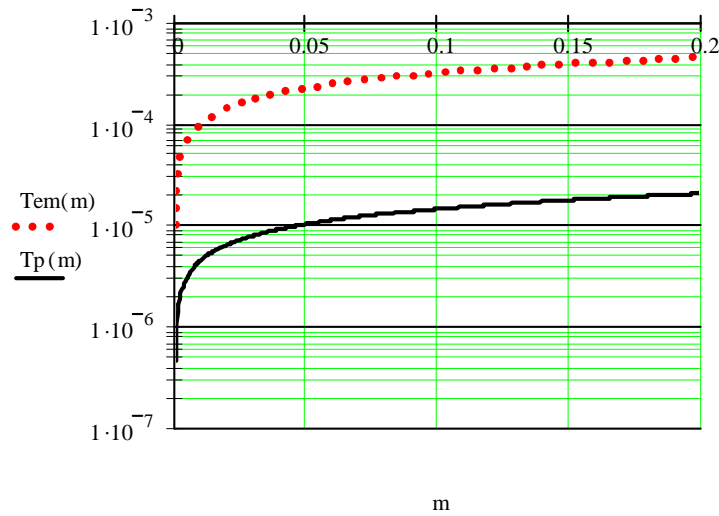


Рис. 5. Співвідношення постійних часу електромагнітного  $T_{em}$  та п'єзоелектричного  $T_p$  механізмів фокусування.

Результати розрахунку свідчать про те, що за інших рівних умов потенційні можливості п'єзомеханізму фокусування з точки зору швидкодії можуть бути більш ніж на порядок кращими. Проте необхідно відмітити існуючі негативні властивості п'єзоприводів нанопереміщень [2, 5, 6], такі як наявність гістерезису статичної характеристики та нелінійність параметричної моделі. Відмічені вади негативно впливають на стійкість та точність системи управління з п'єзодвигуном і тому мають бути предметом окремого дослідження.

### Оцінка можливого негативного впливу вад п'єзоелектричних двигунів на технічну реалізацію високоякісної системи автоматичного фокусування станції лазерного запису оптичної інформації

Поставленим питанням у науково-технічній літературі приділено досить багато уваги [1–6]. Найбільш прийнятними можна вважати результати, наведені в [3, 5], які спрямовані на отримання адекватних математичних моделей зворотного п'єзоефекту в простих і складених двигунах нанопереміщень. До переваг можна також віднести розроблену методику аналізу стійкості систем автоматичного управління з такими двигунами [2]. У загальному вигляді передавальні функції складеного п'єзодвигуна, жорстко закріпленого однією гранню, подано у вигляді [3]:

$$W_{21}(p) = \frac{\xi_2(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}l}{\frac{M_2 l^2}{m_c (c^E)^2} p^2 + cth \left[ l \left( \frac{p}{c^E} + \alpha \right) \right] \left( \frac{p}{c^E} + \alpha \right) l}, \quad (3)$$

$$W_{23}(p) = \frac{\xi_2(p)}{F_2(p)} = - \frac{l^2 / m(c^E)^2}{\frac{M_2 l^2}{m_c (c^E)^2} p^2 + \text{cth} \left[ l \left( \frac{p}{c^E} + \alpha \right) \right] \left( \frac{p}{c^E} + \alpha \right) l}, \quad (4)$$

де  $\xi_2$  — зміщення робочого кінця двигуна;  $E_3$  — напруженість електричного поля в п'єзопластині;  $F_2$  — сила зовнішньої дії;  $m_c, M_2$  — маса п'єзопластин і робочого механізму;  $l = n\delta$  — загальна довжина п'єзопластин;  $S_0$  — площа п'єзопластини;  $d_{33}, s_{33}^E$  — п'єзомодуль і пружна податливість;  $c^E, \alpha$  — швидкість і коефіцієнт затухання при розповсюдженні звуку в п'єзопластині.

При виконанні умов  $0 < \omega < 0,01c^E/l$ ,  $M_2/m \gg 1$  та з урахуванням електричної інерційності п'єзопластин вирази (3), (4) подаються у вигляді структурної схеми, зображеної на рис. 6, де  $R$  і  $C_0$  — опір ланцюга заряду та ємність п'єзопластини відповідно.

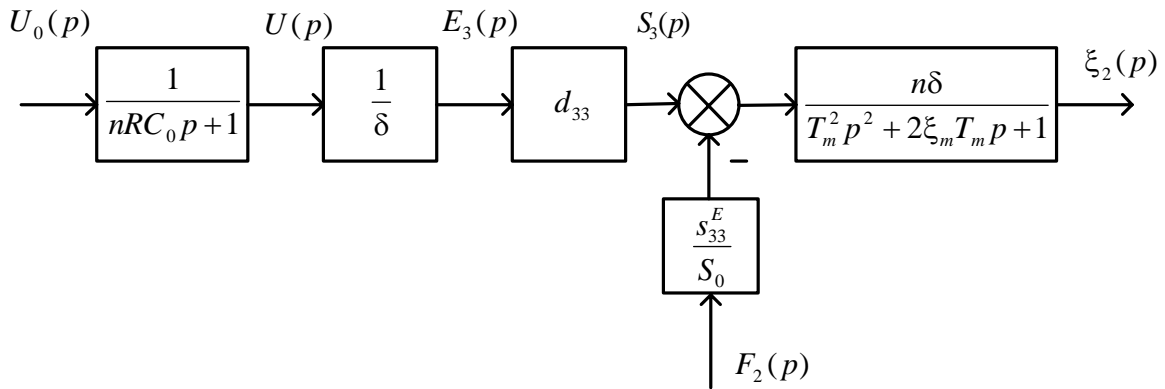


Рис. 6. Структурна схема складеного з  $n$  пластин п'єзодвигуна відносно переміщення, вхідної напруги та зовнішньої сили

При цьому  $T_m = (l/c^E) \sqrt{M_2/m_c}$ ,  $\xi_m = (\alpha l/3) \sqrt{m_c/M_2}$ .

Виконаємо оцінку прийнятності поданої моделі для синтезу системи управління п'єзоелектричним механізмом автофокусування станції лазерного запису оптичної інформації.

Приймемо наступні вихідні умови:  $\xi_{2\max} = 20$  мкм;  $\delta = 0,15$  мкм;  $d_{33} = 400 \cdot 10^{-12}$  м/В;  $U_{0\max} = 200$  В. Після елементарних розрахунків отримаємо, що п'єзоелектричний механізм повинен складатися з 250-ти пластин загальною довжиною  $l = 37,5$  мм. Тоді при  $c^E = 3500$  м/с маємо  $0 < \omega < 933,3$  с<sup>-1</sup>, або  $0 < f < 148,6$  Гц. Тобто можна стверджувати, що ефективна смуга частот спектральної густини узагальненої скляної підкладки перекривається смугою частот адекватності математичної моделі п'єзодвигуна.

Наявність гістерезису статичної характеристики негативно впливає на стійкість системи автоматичного управління з п'єзодвигуном. Не зважаючи на те, що дослідження стійкості систем автоматичного управління з нелінійностями такого

типу є досить складним, задача визначення умов абсолютної стійкості системи управління п'єзодвигуном нанопереміщень успішно вирішена в [2]. За результатами цієї роботи умова абсолютної стійкості має вигляд  $\text{Re}W_{21}(j\omega)/d_{33}l + v_{33}^{-1} \geq 0$ , де  $v_{33} = l \sup[dS_3/dE_3]$ , тобто найбільший тангенс кута дотичної до гістерезисної кривої.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що аналіз стійкості зводиться до аналізу годографу  $W_{21}(j\omega)$  довкола частоти  $\omega_0$ , де  $\text{Im}W_{21}(j\omega_0) = 0$  аналогічно частотному критерію стійкості Найквіста–Михайлова для лінійних систем. Для покращення динамічних властивостей доцільно використовувати лінійні коригувальні пристрої [8].

### Прикінцева вихідна модель п'єзоелектричного двигуна для синтезу високоякісної системи автоматичного фокусування станції лазерного запису оптичної інформації

Відомо [2], що при технічній реалізації системи управління на основі п'єзоелектричного двигуна, останній піддається попередньому пружному стисканню, що впливає на параметри його математичної моделі. Якщо припустити, що таке стискання буде єдиним зовнішнім діянням, то структурна схема двигуна прийме вигляд, зображений на рис. 7.

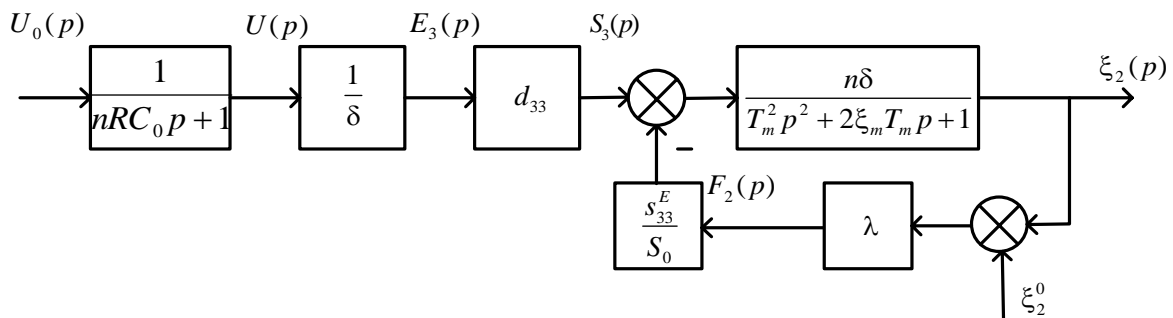


Рис. 7. Структурна схема складеного з  $n$  пластин п'єзодвигуна після попереднього пружного стискання на величину  $\xi_2^0$

Після перетворення структурної схеми стисненого п'єзодвигуна отримаємо:

$$\xi_2(p) = \frac{k_c}{(T_e p + 1)(T_c^2 p^2 + 2\xi_c T_c p + 1)} U_0(p) - \frac{k_l}{T_c^2 p^2 + 2\xi_c T_c p + 1} \xi_2^0, \quad (5)$$

де  $k_c = \frac{d_{33}n}{1 + \lambda \frac{S_{33}^E}{S_0} n\delta}$ ;  $T_c = \frac{T_m}{\sqrt{1 + \lambda \frac{S_{33}^E}{S_0} n\delta}}$ ;  $\xi_c = \frac{\xi_m}{\sqrt{1 + \lambda \frac{S_{33}^E}{S_0} n\delta}}$  — коефіцієнт підсилення,

постійна часу та коефіцієнт згасання відповідно після стискання двигуна;

$$k_l = \lambda \frac{s_{33}^E}{S_0} \frac{n\delta}{1 + \lambda \frac{s_{33}^E}{S_0} n\delta} \text{ — коефіцієнт протидії стисканню; } T_e = nRC_0 \text{ — електрична}$$

постійна часу двигуна.

Аналізуючи вираз (5) та його компоненти можна зробити наступні висновки.

1. Стискання п'єзодвигуна призводить до зменшення його коефіцієнта підсилення, постійної часу та коефіцієнта згасання. Зменшення коефіцієнта підсилення можна в допустимих межах компенсувати за рахунок електронної частини системи. Якщо зменшення постійної часу є корисним із точки зору покращення динамічних властивостей, то зменшення коефіцієнта згасання згубно впливає на стійкість системи в цілому.

2. Механічне пружне стискання доцільно компенсувати шляхом подачі окремим каналом підпірної напруги  $U_0^0$ , яка розраховується з умови  $k_c U_0^0 = k_l \xi_2^0$ . Це дасть змогу підвести робочу точку до середини однополярної гістерезисної характеристики й отримати прикінцеву математичну модель п'єзодвигуна із джерелом живлення у вигляді:

$$K_m(p) = \frac{\xi_2(p)}{U_0(p)} = \frac{k_c}{(T_e p + 1)(T_c^2 p^2 + 2\xi_c T_c p + 1)} \quad (6)$$

3. З точки зору усталених похибок система управління з п'єзодвигуном буде статичною. Виходячи з того, що закон зміни рельєфу при обертанні диска-оригіналу є досить складним, із наявністю значної кількості похідних, необхідно максимально підвищувати порядок астатизму такої системи.

### Синтез п'єзоелектричного сервопривода системи автоматичного фокусування станції лазерного запису оптичної інформації

Розглянемо структурну схему системи автофокусування, яка складається з функціонально необхідних елементів (на рис. 8 зображена суцільними лініями) та негативного зворотного зв'язку по швидкості (зображено пунктиром).

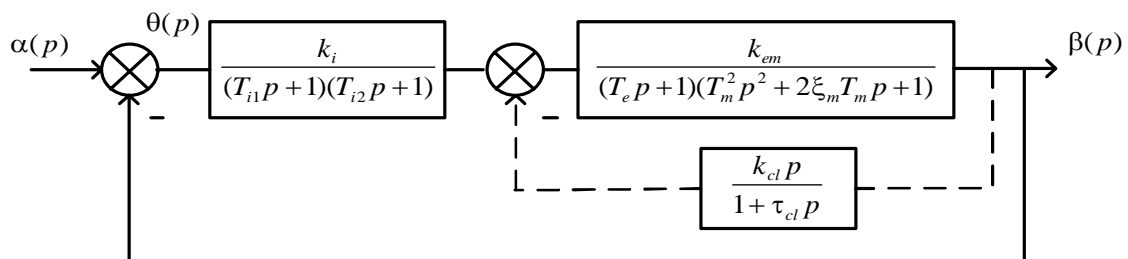


Рис. 8. Узагальнена структурна схема системи автофокусування



Особливістю схеми є те, що вона відноситься до систем із неявно вираженим задавальним діянням (вхідним сигналом). У дійсності існує лише вихідний сигнал розфокусування  $\theta$ , а сигнали вхідний  $\alpha$  та вихідний  $\beta$  окремо не вимірюються.

Параметри п'єзодвигуна є фіксованими для конкретної системи автофокусування станції лазерного запису оптичної інформації. Постійні часу електронних підсилювачів і перетворювачів вибрані з умов завадостійкості, а коефіцієнти підсилення збільшені в 1,5 рази в порівнянні з попередньою дослідною експлуатацією станції для зменшення динамічних похибок. Узагальнені параметри структурної схеми подані в таблиці.

Параметр	$k_i$	$k_{em}$	$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_e$	$T_m$	$\xi_m$	$k_{cl}$	$\tau_{cl}$
Значення параметра	10	15	2E-2	5E-5	1E-2	2E-5	0,01	5E-4	1E-5

$$\text{Позначимо: } K_i(p) = \frac{k_i}{(T_{i1}p + 1)(T_{i2}p + 1)}, \quad K_{cl}(p) = \frac{k_{cl}p}{1 + \tau_{cl}p},$$

$$K_{em}(p) = \frac{k_{em}}{(T_e p + 1)(T_m^2 p^2 + 2\xi_m T_m p + 1)}.$$

$$\text{Тоді } K_{ol}(p) = K_i(p)K_{em}(p), \quad K_{oll}(p) = K_i(p) \frac{K_{em}(p)}{1 + K_{em}(p)K_{cl}(p)} \text{ — передавальні}$$

функції вихідної та скоригованої системи у розімкненому стані. Причому електронна корекція виконана з умови компенсації гострого резонансу. На рис. 9 зображені результати дослідження стійкості вихідної та скоригованої системи за критерієм Найквіста–Михайлова. Якщо вихідна системи є нестійкою, то скоригована має запас стійкості  $\sigma = 9,6$  дБ і, незважаючи на значне збільшення маси об'єктива, буде мати кращі динамічні характеристики, ніж попередня з електромагнітним механізмом фокусування.

Але класична оцінка точності системи [8] свідчить про її невідповідність пред'явленим вимогам. Так, СКП, яка розраховується за виразом

$$\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{1000} |K_\theta(j\omega)|^2 S(\omega) d\omega, \quad (7)$$

де  $K_\theta(j\omega)$  — передавальна функція за похибкою скоригованої системи, становить 305 нм, що більше ніж на порядок гірше встановлених вимог.

Отриманий негативний результат пояснюється тим, що система є статичною, а рельєф диска — достатньо складний.

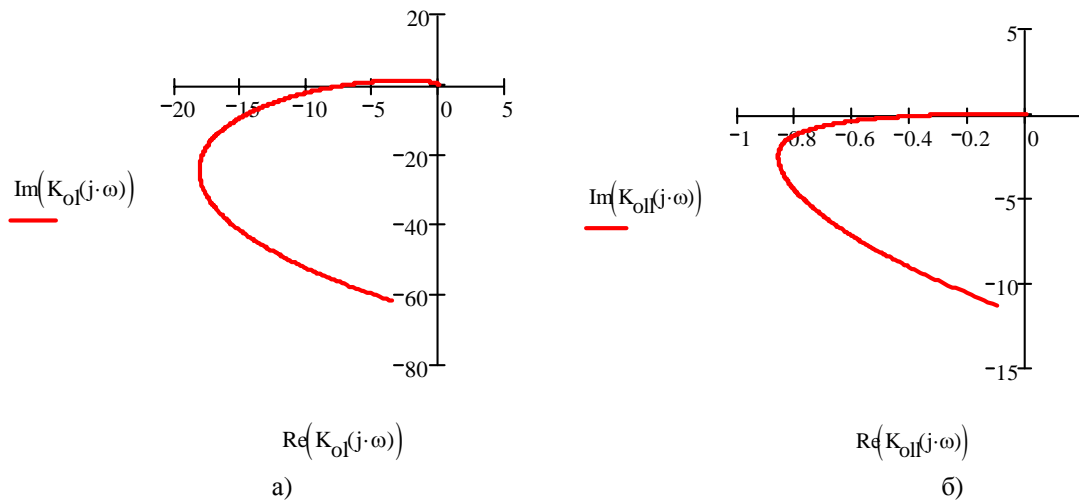


Рис. 9. Амплітудно-фазочастотні характеристики вихідної (а) та скоригованої (б) системи

Із теорії інваріантності та комбінованих систем автоматичного управління, елементи якої наведено в [8], відомо, що значного покращення динамічних властивостей подібних систем можна досягти шляхом підвищення порядку астатизму за рахунок введення прямих зв'язків по вхідному сигналу. При цьому не зменшується широкополосність, і відсутній негативний вплив на стійкість системи. Розрахунки показують, що при введенні прямого зв'язку по вхідному сигналу у вигляді  $K_\alpha(p) = \tau_0 + \frac{\tau_1 p}{T_\alpha p + 1}$  (рис. 10) і виконанні умов  $\tau_0 = 1/k_{em}$  і  $\tau_1 = \frac{k_{em} k_{cl} + T_e(1 + 2\xi_m)}{k_{em}}$ , система набуває астатизму 2-го порядку.

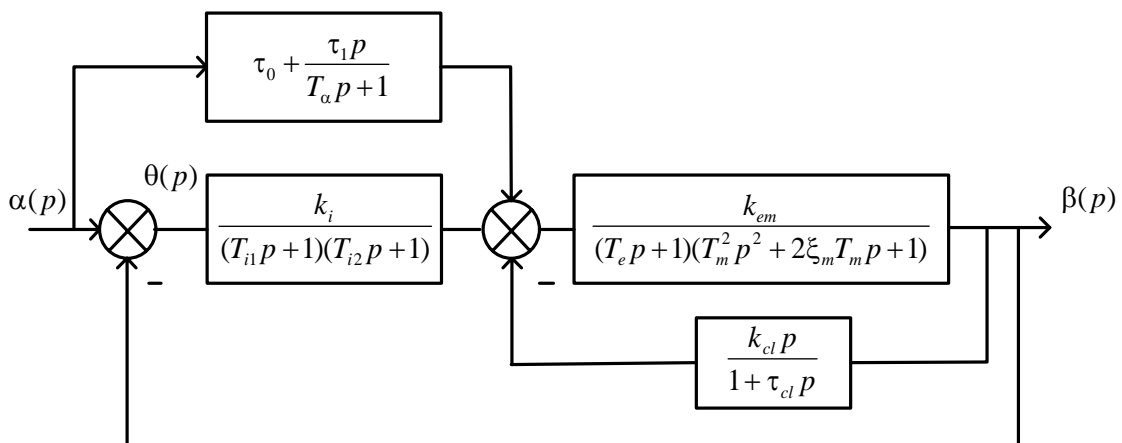


Рис. 10. Структурна схема системи автофокусування астатизму 2-го порядку

Розрахунки за виразом (7) для такої системи дають  $i_\alpha = 22,6$  нм, що відповідає встановленим вимогам.

Для підтвердження високих динамічних властивостей на рис. 11 показані похибки відпрацювання системою постійних, лінійних і квадратичних задавальних діянь.

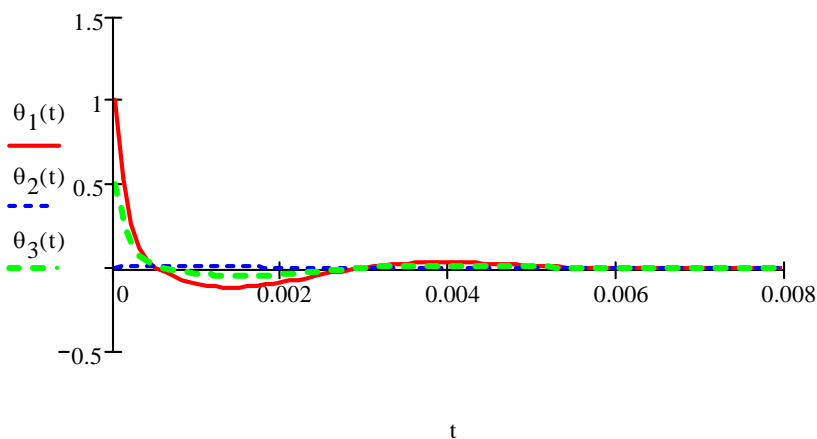


Рис. 11. Похибки відпрацювання системою задавальних діянь:  
 $\theta_1(t)$  — при  $\alpha_1(t) = 1$ ;  $\theta_2(t)$  — при  $\alpha_2(t) = 100t$ ;  $\theta_3(t)$  — при  $\alpha_3(t) = 0,5 + 100t + 500t^2$

### Аналіз отриманих результатів і пропозиції щодо їхньої технічної реалізації

Запропонована система є стійкою, має 2-й порядок астатизму й високі динамічні властивості, що пояснюється введенням похідної від вхідного сигналу в закон управління. Але безпосередньо, як зображено на рис. 10, вона не може бути технічно реалізованою через відсутність вхідного сигналу в явному вигляді. У таких випадках використовують диференціальні зв'язки для непрямого вимірювання вхідного сигналу [8], що безпосередньо витікає з визначення головного зворотного зв'язку  $i(t) = \alpha(t) - \beta(t)$ . Очевидно, що в цьому випадку  $\alpha(t) = \beta(t) + i(t)$ . Якщо сигнал похибки  $i(t)$  існує явно, то вихідний сигнал  $\beta(t)$  можна виміряти ємнісним сенсором [6] або використанням кількох пластин складеного п'єзодвигуна у режимі прямого п'єзоелектричного ефекту. З урахуванням викладеного прикінцева структурна схема запропонованої системи зображена на рис. 12. Вона є еквівалентною структурній схемі, зображеній на рис. 10.

Необхідно відмітити, що технічно впроваджена система автофокусування на основі п'єзодвигуна буде мати дещо гірші показники, ніж ті, які отримані шляхом математичного моделювання. Це пояснюється неврахуванням при розрахунках гістерезису статичної характеристики п'єзодвигуна, але можна стверджувати, що вплив гістерезису не буде визначальним. Якісно це пояснюється тим, що в динамічному режимі проявляться стабілізуючі властивості частотно-залежного негативного зворотного зв'язку, яким охоплений п'єзодвигун. При цьому вищі, паразитні гармонічні складові вихідного сигналу будуть пригнічуватись більше ніж перша, що сприятиме лінеаризації гістерезисної нелінійності.

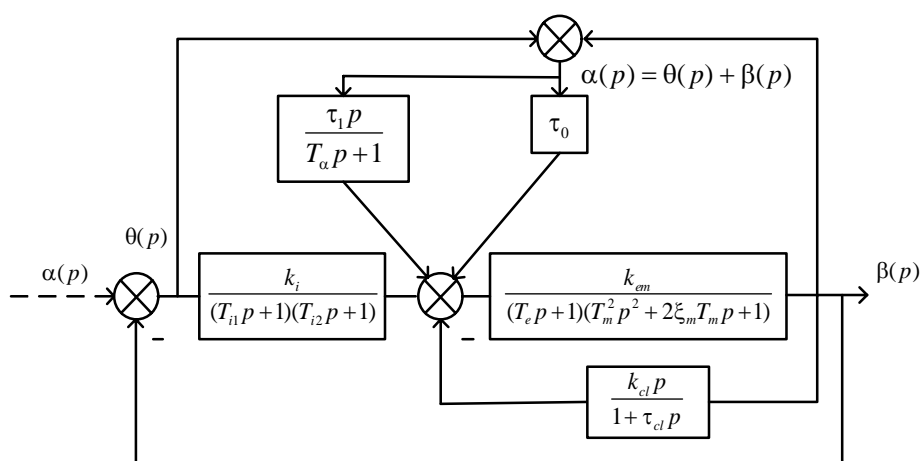


Рис. 12. Прийнятна для технічної реалізації структурна схема астатичної системи автофокусування на основі п'єзодвигуна

## Висновки

1. Проведені дослідження свідчать про те, що при побудові сервопривода системи автофокусування станції лазерного запису оптичної інформації в якості виконавчого пристрою доцільно використовувати п'єзодвигун.

2. Необхідні динамічні властивості сервопривода досягаються шляхом застосування паралельних коригувальних пристроїв і підвищенням порядку астатизму.

3. У зв'язку з обмеженістю динамічних характеристик сервопривода системи автофокусування підкладки для запису дисків-оригіналів повинні проходити попередній відбір стосовно спектральних характеристик рельєфу поверхні.

1. *Афонин С.М.* Структурно-параметрическая модель пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. — 2001. — № 5. — С. 29–33.

2. *Афонин С.М.* Об абсолютной устойчивости системы управления пьезодвигателем наноперемещений // Вестник машиностроения. — 2001. — № 8. — С. 19–22.

3. *Афонин С.М.* Параметрическая структурная схема составного пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. — 2002. — № 12. — С. 7–15.

4. *Афонин С.М.* Исследование и расчет многокоординатных пьезодвигателей наноперемещений // Вестник машиностроения. — 2004. — № 8. — С. 20–23.

5. *Афонин С.М.* Преобразование параметрических структурных схем пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. — 2006. — № 3. — С. 22–25.

6. *Hu H., S.Georgiou H.M., Ben-Mrad R.* Enhancement of Tracking Ability in Piezoceramic Actuators Subject to Dynamic Excitation Conditions // IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS. — 2005. — Vol. 10, N 2. — P. 230–239.

7. Пьезокерамические материалы для фильтров и резонаторов. Высокостабильные материалы. <http://www.elpapieroz.ru/filtersresonators.shtml>.

8. Теорія автоматичного управління / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеглов, О.І. Брицький; За заг. ред. проф. Г.Ф. Зайцева. — К.: Техніка, 2002. — 688 с.

Надійшла до редакції 10.07.2007