

УДК 621.867.52

**Ігор Козбур, Олександр Шовкун, Володимир Савків, к.т.н., доц.,
Роман Михайлишин, к.т.н.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

**ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ І ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ПРИВОДА ЖИВИЛЬНИКА З
ФАЗОВИМ АВТОМАТИЧНИМ ПІДЛАШТУВАННЯМ ЧАСТОТИ
ЗБУДЖЕННЯ**

Розглянуто електромагнітний привод вібраційного живильника з фазовим автоматичним підлаштуванням частоти збудження, визначено його динамічні та частотні характеристики, що забезпечить його ефективну роботу в резонансній області частот.

Ключові слова: електромагнітний привод вібраційного живильника, фазове автоматичне підлаштування частоти (ФАПЧ), передавальна функція, частотні характеристики.

**Ihor Kozbur, Olexandr Shovkun, Volodymyr Savkiv, Roman Mykhailyshyn
DETERMINATION OF THE DYNAMIC AND FREQUENCY CHARACTERISTICS
OF ELECTROMAGNETIC VIBRATION DRIVE FEEDER WITH AUTOMATIC
PHASE ADJUSTMENT OF THE EXCITATION FREQUENCY**

The electromagnetic drive of the vibrating feeder with phase automatic adjustment of the excitation frequency is considered, its dynamic and frequency characteristics are defined, which will ensure its effective work in the resonant frequency region.

Keywords: electromagnetic vibrating feeder drive, autonomous phase loop (PLL), electromagnetic oscillations exciter, transfer function, frequency characteristics.

Для ефективної роботи електромагнітних приводів вібраційних живильників, призначених для транспортування та поштучної видачі заготовок і деталей, необхідно забезпечити резонансний режим їх роботи. Для забезпечення резонансного режиму електромагнітного віброприводу доцільно використати фазове підлаштування частоти збудження (ФАПЧ). Можливим рішенням є використання фазового підлаштування частоти збудження (ФАПЧ) генератора керованого напругою (ГКН), який використовується для живлення електромагнітного приводу віброживильника [1, 2, 3].

При зміні частоти власних коливань робочого органа вібраційної машини в процесі роботи частота задаючого генератора також зміниться в необхідному напрямку таким чином, що вібромашина працюватиме в резонансному режимі незалежно від навантаження та зовнішніх збуджуючих факторів. Частота ГКН змінюється до тих пір, поки не зрівняється з частотою резонансу вібраційного живильника і він працює в резонансному режимі незалежно від зміни коливальної маси, жорсткості пружної системи та інших параметрів пристрою.

Модель контуру ФАПЧ представлена на рис.1. Де, відповідно, $\phi(t) = \Delta\omega \cdot t + \phi_0$

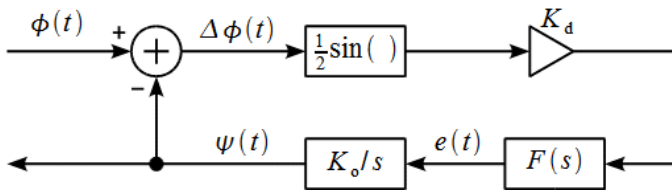


Рис. 1. Модель контуру ФАПЧ

– зміна частоти в часі, $\Delta\omega(t)$ – розузгодження частоти, $\Delta\phi(t)$ – еквівалентний сигнал розузгодження фази, $e(t)$ – сигнал помилки, $F(s)$ – характеристика петльового фільтра ФАПЧ, K_d – коефіцієнт передачі ГНН.

Використовуючи структурну схему моделі контуру ФАПЧ, можна в подальшому провести детальний аналіз динамічних та частотних характеристик електромагнітного вібраційного приводу живильника з фазовим підлаштуванням частоти збудження.

Згідно побудованої моделі контуру ФАПЧ (рис. 1) знайдемо його передавальну функцію характеристики $H(s)$. Враховуючи те, що ГУН інтегрує сигнал помилки $e(t)$

,– $\psi(t) = K_0 \cdot \int_0^t e(t) dt$, тоді його передавальна функція рівна K_0/s , що відповідає

ідеальній інтегруючій ланці, разом з тим, сам сигнал помилки виражений як синус різниці фаз $e(t) = \frac{K_d}{2} \cdot \sin(\phi(t) - \psi(t)) = \frac{K_d}{2} \cdot \sin(\Delta\phi(t))$. Цьому випадку відповідає узагальнена модель контуру ФАПЧ, як це показано на рис. 1.

У дану модель входить нелінійний елемент, котрий обчислює синус різниці фаз прийнятого й опорного колювання, що суттєво утрудняє знаходження аналітичного виразу передавальної функції контуру ФАПЧ. Але в усталеному режимі слідкування за фазою $\psi(t)$, яка прагне зрівнятися з $\phi(t)$, їхня різниця прямує до нуля, тобто

$\Delta\phi(t) = \phi(t) - \psi(t) \rightarrow 0$, тоді $\frac{1}{2} \sin(\Delta\phi(t)) \approx \frac{1}{2} \sin(\phi(t))$, причому коефіцієнт 1/2 може

бути врахований у коефіцієнті передачі K_d передавальної функції ГУН. У такий спосіб, у встановленому режимі, нелінійний елемент може бути виключений і модель контуру ФАПЧ відповідатиме лінеаризованій структурній схемі показаній на рис. 2.

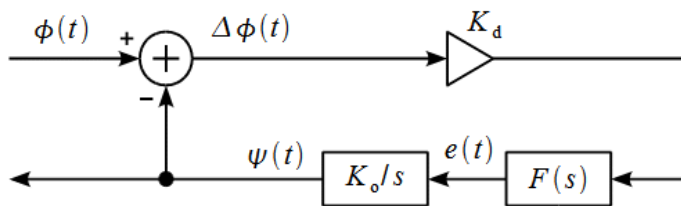


Рис. 2. Лінеаризована модель контуру ФАПЧ

Позначимо як $\Phi(s)$ і $\Psi(s)$ відповідні зображення по Лапласу фаз $\phi(t)$ і $\psi(t)$, тоді можна записати наступне операторне рівняння динаміки лінеаризованого контуру ФАПЧ:

$$\Psi(s) = (\Phi(s) - \Psi(s)) \cdot \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}{s} \quad (1)$$

Або в іншому записі рівняння динаміки буде представлено у вигляді:

$$\Psi(s) = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}{s} - \Phi(s) \cdot \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}{s}, \quad (2)$$

звідки можна знайти передавальну функцію контуру ФАПЧ:

$$H(s) = \frac{\Psi(s)}{\Phi(s)} = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)/s}{1 + K_d \cdot K_0 \cdot F(s)/s} = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}{s + K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}. \quad (3)$$

Зважаючи на необхідні властивості передавальної функції петльового фільтру $F(s)$ та при врахуванні потреби астатизму другого порядку контуру ФАПЧ, передавальна функція $H(s)$ повинна містити поліноми другого ступеня. Відповідно передавальна функція петльового фільтра $F(s)$ повинна мати перший порядок. Задамо $F(s)$ у вигляді пропорційно інтегруючого елемента $F(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$, де K_p і K_i – пропорційний і інтегральний коефіцієнти. Сигнал помилки $e(t)$ в цьому випадку можна знайти, при умові, що вираз $1/s$ в операторному виді відповідає інтегратору, у вигляді:

$$e(t) = K_p \cdot K_d \cdot \Delta\phi(t) + K_d \cdot K_i \cdot \int_0^t \Delta\phi(t) dt \quad (4)$$

Підставивши значення $F(s)$ в (3) отримаємо передавальну функцію лінеаризованого контуру ФАПЧ:

$$H(s) = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot K_p + (K_d \cdot K_0 \cdot K_i)/s}{s + K_d \cdot K_0 \cdot K_p + (K_d \cdot K_0 \cdot K_i)/s} = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot K_p \cdot s + K_d \cdot K_0 \cdot K_i}{s^2 + K_d \cdot K_0 \cdot K_p \cdot s + K_d \cdot K_0 \cdot K_i}. \quad (5)$$

Враховуючи фізичний зміст коефіцієнтів та з метою спрощення виразу передавальної функції лінеаризованого контуру ФАПЧ $H(s)$, введемо наступні позначення, $- K_d \cdot K_0 \cdot K_i = \omega_p^2$, $K_d \cdot K_0 \cdot K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_p$, тоді

$$H(s) = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_p \cdot s + \omega_p^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_p \cdot s + \omega_p^2} = \frac{b_0 \cdot s + b_1}{a_0 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_2} \quad (6)$$

Відповідно коефіцієнти передавальної функції, $- a_0 = 1$, $a_1 = b_0 = 2 \cdot \xi \cdot \omega_p = K_d \cdot K_0 \cdot K_p$, $a_2 = b_1 = \omega_p^2 = K_d \cdot K_0 \cdot K_i$. Тобто, лінеаризований контур ФАПЧ являє собою фільтр другого порядку з резонансною частотою ω_p і коефіцієнтом загасання (damping factor) ξ .

При умові $s \rightarrow j \cdot \omega$, знайдемо комплексну передавальну функцію (комплексну частотну характеристику КЧХ) лінеаризованого контуру ФАПЧ, яка буде мати вигляд:

$$H(j\omega) = \frac{\omega_p^2 + j \cdot 2 \cdot \xi \cdot \omega_p \cdot \omega}{\omega_p^2 - \omega^2 + j \cdot 2 \cdot \xi \cdot \omega_p \cdot \omega} \quad (7)$$

Амплітудно частотна характеристика (АЧХ) лінеаризованого контуру ФАПЧ, яку визначаємо як модуль КЧХ, $- |H(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2[H(j\omega)] + \text{Im}^2[H(j\omega)]}$ рівна:

$$|H(j\omega)| = \sqrt{\frac{\omega_p^4 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2}{(\omega_p^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2}} \quad (8)$$

Розглянемо основні частотні залежності в лінеаризованому контурі ФАПЧ.

При $\omega = 0$ АЧХ лінеаризованого контуру ФАПЧ рівна $|H(j \cdot 0)| = 1$.

В точці резонансу при $\omega = \omega_p$ отримаємо:

$$|H(j\omega_p)| = \sqrt{\frac{\omega_p^4 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2}{4 \cdot \xi^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2}} = \frac{1}{2 \cdot \xi} \cdot \sqrt{1 + 4 \cdot \xi^2} \quad (9)$$

На резонансній частоті АЧХ лінеаризованого контуру ФАПЧ завжди більша від одиниці, причому, при $\xi \rightarrow 0$, $|H(j\omega_p)| \rightarrow \infty$. Для $\omega \rightarrow \infty$, отримаємо:

$$|H(j\infty)| = \lim_{\omega \rightarrow \infty} |H(j\omega)| = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\omega^2}{\omega^4 + \omega^2}} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\omega} = 0 \quad (10)$$

У такому випадку логарифмічна АЧХ контуру ФАПЧ, після резонансної частоти, має нахил $20 \cdot \lg(1/\omega)$, або, нахил характеристики складає $\Delta L(\omega) = -20$ дБ/декаду.

Визначимо смугу перепускання контуру лінеаризованого ФАПЧ. Для цього необхідно розв'язати рівняння (9) при $|H(j\omega)| = 1$ відносно частоти ω , відповідно отримаємо: $(\omega_p^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2 = \omega_p^4 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2$, звідки $(\omega_p^2 - \omega^2)^2 = \omega_p^4$, відповідно $\omega^4 - 2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2 = 0$ або $\omega = \omega_p \cdot \sqrt{2}$

Амплітудно-частотна характеристика та логарифмічні частотні характеристики, – ЛАЧХ $20 \cdot \lg(|H(j\omega/\omega_p)|)$, ЛФЧХ $\arctg\left(\frac{\text{Im}[H(j\omega)]}{\text{Re}[H(j\omega)]}\right)$, лінеаризованого контуру ФАПЧ показано на рисунку 3.

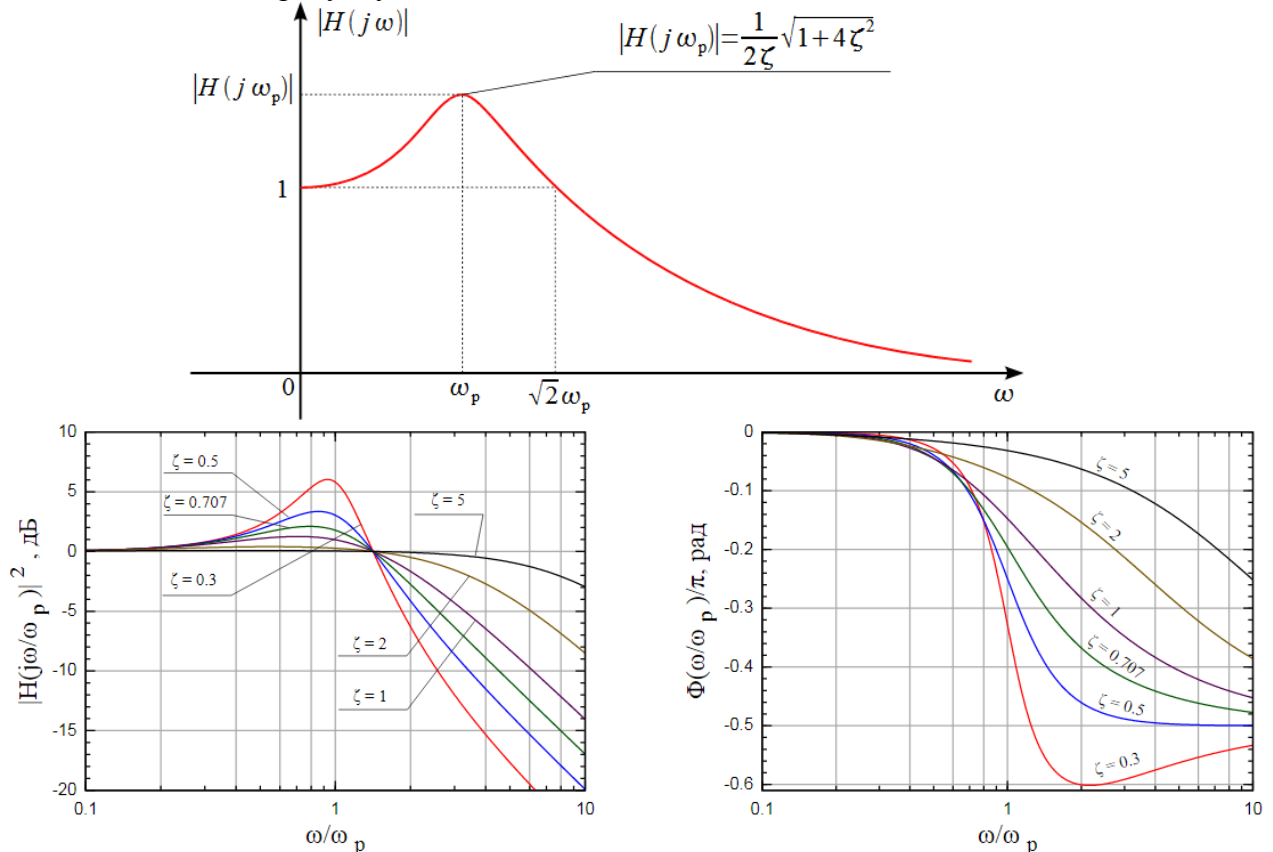


Рис. 3. АЧХ та ЛАЧХ і ЛФЧХ контуру ФАПЧ

Отримані динамічні та частотні характеристики дозволять забезпечити відповідні режими роботи контуру ФАПЧ електромагнітного приводу вібраційного живильника, що дозволить йому працювати в резонансній області.

Література:

1. Патент України № 28978 В65G27/24, Шовкун О.П. Електромагнітний привід резонансної вібраційної машини.
2. Електромагнітний вібропривод живильника / Шовкун Олександр, Козбур Ігор, Козбур Галина // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції, 8-9 червня 2017 року: збірник тез доповідей. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2017. – С. 194-195.
3. І.Р. Козбур, Електромагнітний вібраційний привід живильника з фазовим підлаштуванням частоти збудження / Козбур І.Р., Шовкун О.П. // XXI наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: збірник тез доповідей. – ТНТУ, 2019. – С. 96 – 97.