

Л.Г. Кравець

**МОЖЛИВОСТІ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ
АВТОГЕНЕРАТОРІВ НА ЛПД В РЕЖИМІ СИНХРОНІЗАЦІЇ
ІМПУЛЬСНИМИ РАДІОСИГНАЛАМИ**

Показано, що в режимі синхронізації частоти систему ФАПЧ ГЛПД можна вважати ідеалізованою в межах смуги захвату частоти ГЛПД і розширити таким чином смугу захвату ФАПЧ до сотень МГц при швидкодії системи не менше 10^{-6} 1/с.

На практиці виникає багато випадків, коли необхідно здійснити підстройку частоти НВЧ генераторів, наприклад, на лавинно-пролітних діодах (ЛПД), діодах Ганна, транзисторних, за час дії коротких зовнішніх радіоімпульсів тривалістю $\leq 0,1$ мкс у смугі в десятки МГц.

Використання звичайної системи ФАПЧ [1] у таких випадках недоцільно, тому що із-за наявності в ній фільтра нижніх частот (ФНЧ) смуга захвату виявляється дуже вузькою. Крім того, в діапазоні НВЧ роль ФНЧ може грати інерційність навантаження підсилювача постійного струму (ППС), що стоїть на виході фазового детектора (ФД). Наслідком буде значне скорочення смуги захвату ФАПЧ у порівнянні з її смугою синхронізму (утримання).

Очевидно, що для поширення смуги захвату ФАПЧ необхідно, перш за все, виключити із схеми інерційні елементи, тобто систему ФАПЧ, що описується рівнянням

$$p\varphi + \Omega_y F(\varphi)K(p) = \Omega_n,$$

звести до ідеалізованої системи ФАПЧ, яка описується рівнянням

$$\frac{d\varphi}{dt} + \Omega_y F(\varphi) = \Omega_H,$$

для якої коефіцієнт передачі ФНЧ та ППС $K(p) = 1$.

Якщо генератори на ЛПД (ГЛПД) синхронізувати зовнішнім сигналом (радіоімпульсом), тобто здійснити нав'язування частоти зовнішнім сигналом (рис. 1), то частота зовнішнього сигналу і частота сигналу на виході ГЛПД будуть співпадати, що дозволить звести систему ФАПЧ до ідеалізованої в межах смуги захвату частоти ГЛПД і розширити таким чином смугу захвату ФАПЧ до десятків, а іноді і до сотень МГц у трьохсантиметровому діапазоні.

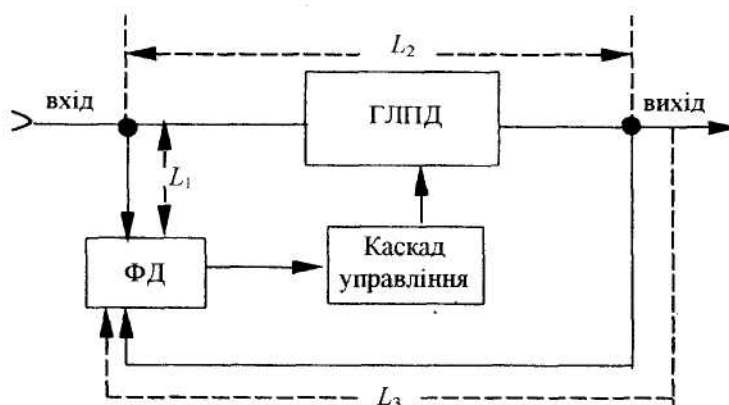


Рис. 1

В ідеалізованій системі ФАПЧ смуга захвату дорівнює смузі утримання. В даному випадку під смугою утримання будемо розуміти смугу синхронізації (захвату) частоти ГЛПД при безпосередньому впливові на нього зовнішнього сигналу. Але для функціонування такої ФАПЧ необхідно, щоб зрушення фази в ГЛПД у режимі синхронізації (захвату) частоти зовнішнім сигналом однозначно визначалося розстройкою поміж частотами зовнішнього сигналу та власних коливань.

Автогенератори на ЛПД легко синхронізуються зовнішнім сигналом. Смуга синхронізації частоти визначається виразом [2]

$$\frac{\Delta\omega_C}{\omega_C} \geq \frac{X_C}{X_a} \rho(\vartheta) = \frac{\rho(\vartheta)}{Q_{BH}} \sqrt{\frac{P_C}{P_a}}, \quad (1)$$

що в $\rho(\vartheta)$ разів перевищує смугу синхронізації ізохронного генератора

$$\frac{\Delta\omega_C}{\omega_a} \approx \frac{1}{Q_{BH}} \sqrt{\frac{P_C}{P_a}}, \quad (2)$$

де P_C, P_a – потужність синхронізуючого сигналу та корисна потужність вільних автоколиваний відповідно.

Смуга синхронізації залежить від величини навантаженої добротності генератора і може досягати 1 ... 2 % (≥ 100 ... 200 МГц) [3].

Для ГЛПД, який знаходиться під впливом зовнішнього гармонічного коливання

$$\frac{I_{\text{вн}}(t)}{I_X} = X_C \cos(\omega_C t + \varphi_C), \quad (3)$$

вкорочені рівняння для амплітуди $X(t)$ та фази $\varphi(t)$ коливань струму в контурі, що повільно змінюються, записується у вигляді [4]

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = -\frac{\omega_0}{2D(\omega_0)} \left[\omega CR(\omega, X) + \omega CR_K(\omega) + \frac{X_C}{X} \cos\left(\varphi - \varphi_C + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\omega_0}{2D(\omega_0)} \left[\omega CX(\omega, X) + 1 + \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2} + \frac{X_C}{X} \sin\left(\varphi - \varphi_C + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (5)$$

або

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = -\frac{\omega_0}{2D(\omega_0)} \left[\omega CR(\omega, X) + \omega CR_K(\omega) - \frac{X_C}{X} \sin(\varphi - \varphi_C) \right], \quad (4a)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\omega_0}{2D(\omega_0)} \left[\omega CX(\omega, X) + 1 + \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2} + \frac{X_C}{X} \cos(\varphi - \varphi_C) \right]. \quad (5a)$$

Зрушення фаз на $\pi/2$ введено тому, що в ГЛПД лавинний струм $I_a(t)$ відстає по фазі на $\pi/2$ від поля $E_a(t)$ в шарі множення. Поле в шарі множення $E_a(t)$ вважається синфазним із зовнішньою гармонічною напругою $U(t)$, що діє на ЛПД [4].

Позначки у виразах (4) і (5) ті самі, що і в [4].

Позначимо

$$-\frac{\omega_0 C}{2D(\omega_0)} [R(\omega, X) + R_K(\omega)] = \delta(X). \quad (6)$$

Тоді рівняння (4a) запишеться у вигляді

$$\frac{dX}{dt} = \delta(X)X + \frac{X_C \omega_0}{2D(\omega_0)} \sin(\varphi - \varphi_C). \quad (7)$$

Вважаючи для спрощення, що синхронізуючий сигнал діє на ГЛПД, що працює в стаціонарному режимі, рівняння (5a) можна записати у вигляді

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\omega_C - \omega_0}{D} - \frac{X_C \omega_0}{2DX} \cos(\varphi - \varphi_C) \quad (8)$$

і початкові умови в момент подачі синхронізуючого сигналу ($t = 0$) будуть такими:

$$X|_{t=0} = X_0 \quad \varphi|_{t=0} = \varphi_H, \quad (9)$$

де X_0 – стаціонарна амплітуда автоколивань, яка є коренем рівняння

$$\delta(X_0) = 0; \quad (10)$$

φ_H – початкова фаза.

При слабких синхронізуючих сигналах можна прийняти:

$$X(t) = X_0 + \varepsilon(t), \quad (11)$$

де $\frac{\varepsilon}{X_0} \ll 1$.

Враховуючи рівняння (9) та (10), з рівняння (7) одержимо

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dX}{dt} = \delta(X)X + \frac{X_C \omega_0}{2D} \sin(\varphi - \varphi_C). \quad (12)$$

Розкладемо в ряд вираження $\delta(X)$ і обмежимося лінійним членом:

$$\delta(X) = \delta(X_0 + \varepsilon) \approx \delta(X_0) + \left. \frac{\partial \delta}{\partial X} \right|_{X=X_0} \cdot \varepsilon = \left. \frac{\partial \delta}{\partial X} \right|_{X=X_0} \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

оскільки $\delta(X_0) = 0$.

Підставляючи вираз (13) в (12) і нехтуючи членами порядку малості ε^2 та вище, одержимо

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \left. \frac{\partial \delta}{\partial X} \right|_{X=X_0} \cdot \varepsilon(X_0 + \varepsilon) + \frac{X_C \omega_0}{2D} \sin(\varphi - \varphi_C) = \left. \frac{\partial \delta}{\partial X} \right|_{X=X_0} \cdot X_0 \varepsilon + \left. \frac{\partial \delta}{\partial X} \right|_{X=X_0} \cdot \varepsilon^2 + \\ &+ \frac{X_C \omega_0}{2D} \sin(\varphi - \varphi_C) \approx \left. \frac{\partial \delta}{\partial X} \right|_{X=X_0} \cdot X_0 \varepsilon + \frac{X_C \omega_0}{2D} \sin(\varphi - \varphi_C) = \\ &= -\delta_0 \varepsilon + \frac{X_C \omega_0}{2D} \sin(\varphi - \varphi_C), \end{aligned} \quad (14)$$

де

$$\delta_0 = - \left. \frac{\partial \delta}{\partial X} \right|_{X=X_0} \cdot X_0 > 0. \quad (15)$$

Очевидно, величина $1 / \delta_0$ є часом релаксації амплітуди.

Знаходимо сталі значення ε_0 та φ_0 , прирівнюючи нулю вирази (14) та (8) – $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ та $\frac{d\varphi}{dt} = 0$:

$$\varepsilon_0 = \frac{X_C \omega_0}{2\delta_0 D} \sin(\varphi_0 - \varphi_C) = \varepsilon_{0 \max} \sin(\varphi_0 - \varphi_C), \quad (16)$$

$$\varphi_0 = \arccos \left[- \frac{(\omega_C - \omega_0) 2X_0}{X_C \omega_0} \right] + \varphi_C = \arccos \left(- \frac{2\Omega X_0}{\omega_0 X_C} \right) + \varphi_C, \quad (17)$$

де $\Omega = \omega_C - \omega_0$. (18)

З останнього виразу видно, що значення сталої фази φ_0 залежить від значення фази синхронізуючих коливань, тобто здійснюється жорстка синхронізація фази коливань ГЛПД зовнішнім сигналом. Залежність сталої фази φ_0 від розстройки $\nu = \frac{\Omega}{\Delta\omega_C}$ наведена на рис. 2.

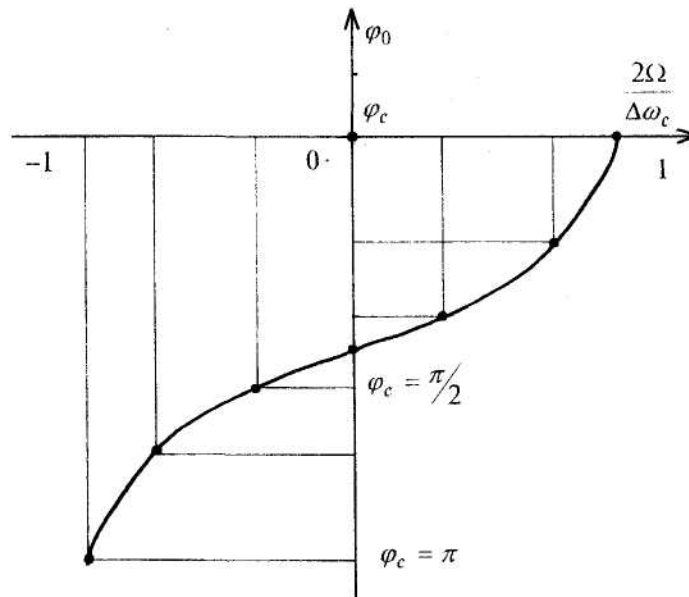


Рис. 2. Залежність сталої фази коливань синхронізованого ГЛПД від розстройки за частотою синхронізуючих коливань

Відставання сталої фази від фази синхронізуючого сигналу при нульовій розстройці на $\pi/2$ пояснюється відставанням по фазі на $\pi/2$ лавинного струму від поля в шарі множення.

Для опису процесу встановлення фази та амплітуди коливань ГЛПД при синхронізації зовнішнім сигналом розв'яжемо рівняння (8):

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\Omega}{D} - a \cos(\varphi - \varphi_c), \tag{8a}$$

де $2a = \frac{X_C \omega_0}{DX} = \Delta\omega_c = \omega_0 \frac{X_C}{X_0} \rho(\vartheta) = \omega_0 \frac{\rho(\vartheta)}{Q_{\text{вн}}} \sqrt{\frac{P_c}{P_0}}$ – не що інше, як смуга синхронізації ГЛПД.

Розділяючи змінні, це рівняння можна записати у вигляді

$$-\frac{d\varphi}{\frac{\Omega}{D} + a \cos(\varphi - \varphi_c)} = dt. \tag{19}$$

Інтегруючи це рівняння усередині області захвату $\left(\left|\frac{\Omega}{D}\right| \leq |a|\right)$, одержуємо

$$-\frac{1}{\sqrt{a^2 - \Omega_H^2}} \ln \frac{\sqrt{a^2 - \Omega_H^2} \operatorname{tg} \frac{\varphi - \varphi_c}{2} + \Omega_H - a}{\sqrt{a^2 - \Omega_H^2} \operatorname{tg} \frac{\varphi - \varphi_c}{2} - \Omega_H + a} = t + t_0, \tag{20}$$

де $t_0 = \text{const}$;

$$\Omega_H = \frac{\Omega}{D}. \tag{21}$$

Після деяких перетворень одержуємо

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi - \varphi_c}{2} = -\frac{a - \Omega_H}{\sqrt{a^2 - \Omega_H^2}} \frac{e^{-\sqrt{a^2 - \Omega_H^2}(t+t_0)} + 1}{e^{-\sqrt{a^2 - \Omega_H^2}(t+t_0)} - 1}. \tag{22}$$

Враховуючи початкові умови (9), визначимо постійну інтегрування:

$$t_0 = \frac{1}{\sqrt{a^2 - \Omega_H^2}} \ln \frac{\sqrt{a^2 - \Omega_H^2} \operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} + \Omega_H - a}{\sqrt{a^2 - \Omega_H^2} \operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \Omega_H + a} =$$

$$= -\frac{1}{a\sqrt{1 - \nu_P^2}} \ln \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}}}{\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} + \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}}}, \quad (23)$$

де $\nu_P = \frac{\Omega_H}{a}$ – відносна розстройка.

Тоді

$$e^{-\sqrt{a^2 - \Omega_H^2} t_0} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}}}{\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} + \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}}}, \quad (24)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi - \varphi_C}{2} = -\sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}} \frac{\left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}} \right) e^{-a\sqrt{1 - \nu_P^2} t} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} + \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}}}{\left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}} \right) e^{-a\sqrt{1 - \nu_P^2} t} - \operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \sqrt{\frac{1 - \nu_P}{1 + \nu_P}}}. \quad (25)$$

Вираз для розстройки Ω_H може бути записаний як

$$\Omega_H = a \cos \varphi_0 = \frac{\Delta \omega_C}{2} \cos \varphi_0; \quad (26)$$

$$\nu_P = \frac{\Omega_H}{a} = \cos \varphi_0. \quad (27)$$

Тоді

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi - \varphi_C}{2} = -\frac{\left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2} \right) e^{-at \sin \varphi_0} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2}}{\left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2} \right) e^{-at \sin \varphi_0} - \operatorname{tg} \frac{\varphi_H - \varphi_C}{2} - \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2}} \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2} =$$

$$= -\frac{e^{-at \sin \varphi_0} + \frac{\sin \frac{\varphi_H + \varphi_0 - \varphi_C}{2}}{\sin \frac{\varphi_H - \varphi_0 - \varphi_C}{2}}}{e^{-at \sin \varphi_0} - \frac{\sin \frac{\varphi_H + \varphi_0 - \varphi_C}{2}}{\sin \frac{\varphi_H - \varphi_0 - \varphi_C}{2}}} \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2}. \quad (28)$$

Звідки

$$\varphi = -2 \operatorname{arctg} \left[\frac{e^{-\frac{\Delta \omega_C}{2} t \sin \varphi_0} + \frac{\sin \frac{\varphi_H + \varphi_0 - \varphi_C}{2}}{\sin \frac{\varphi_H - \varphi_0 - \varphi_C}{2}}}{e^{-\frac{\Delta \omega_C}{2} t \sin \varphi_0} - \frac{\sin \frac{\varphi_H + \varphi_0 - \varphi_C}{2}}{\sin \frac{\varphi_H - \varphi_0 - \varphi_C}{2}}} \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2} \right] + \varphi_C. \quad (29)$$

Зміну фази φ у часі показано на рис. 3.

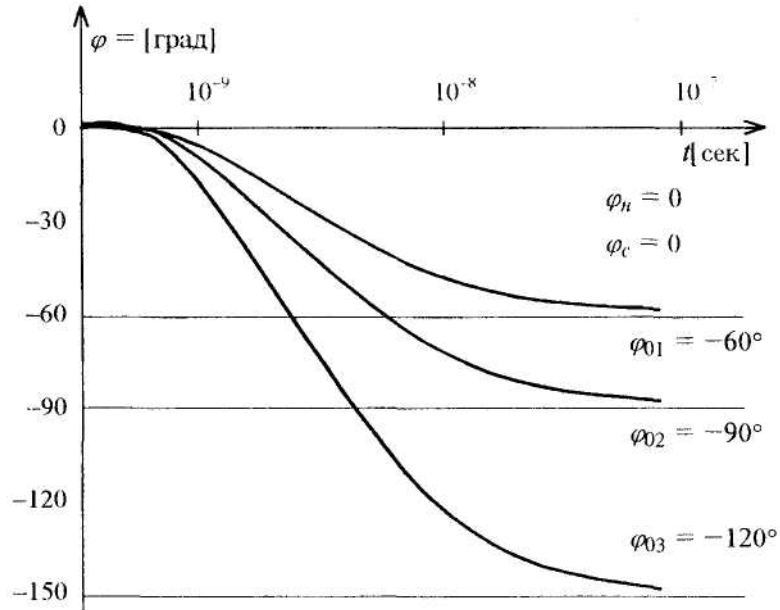


Рис. 3. Зміна фази коливань ГДПД у режимі синхронізації зовнішнім сигналом

Час встановлення фази визначимо з (8):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Delta\omega_C}{2} [\cos \varphi_0 - \cos(\varphi - \varphi_C)],$$

$$t_y = -\frac{2}{\Delta\omega_C \sin \varphi_0} \ln \left| \frac{\sin \frac{\varphi - \varphi_C + \varphi_0}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi_0 + \pi/2}{2}}{\sin \frac{\varphi - \varphi_C - \varphi_0}{2}} \right| \quad (30)$$

Тут границі вказані для φ . Вони вказують, що фазове зрушення $\varphi - \varphi_C$ змінюється від значення $\varphi - \varphi_C$ до φ_0 .

При $\varphi_H - \varphi_C = \varphi_0$ фаза встановлюється миттєво ($t_y = 0$). Якщо ж $\varphi_H - \varphi_C \neq \varphi_0$, то час встановлення фази φ_0 теоретично дорівнює нескінченності. Тому за час встановлення прийемо час, за який фаза автоколивань досягне значення $\varphi_0 \pm 0,1\varphi_0$.

Тоді

$$t_y = -\frac{2}{\Delta\omega_C \sin \varphi_0} \ln \left| \frac{\sin \left(\varphi_0 \pm \frac{\varphi_0}{20} \right) \sin \frac{\varphi_H - \varphi_C - \varphi_0}{2}}{\sin \frac{\varphi_0}{20} \sin \frac{\varphi_H - \varphi_C + \varphi_0}{2}} \right| \approx$$

$$\approx -\frac{2}{\Delta\omega_C \sin \varphi_0} \ln \left| \frac{\sin \varphi_0 \sin \frac{\varphi_H - \varphi_C - \varphi_0}{2}}{\sin \frac{\varphi_0}{20} \sin \frac{\varphi_H - \varphi_C + \varphi_0}{2}} \right| \quad (31)$$

На рис. 4 та рис. 5 наведені залежності часу встановлення фази t_y від розстройки, від значення початкової фази φ_H автоколивань та φ_C .

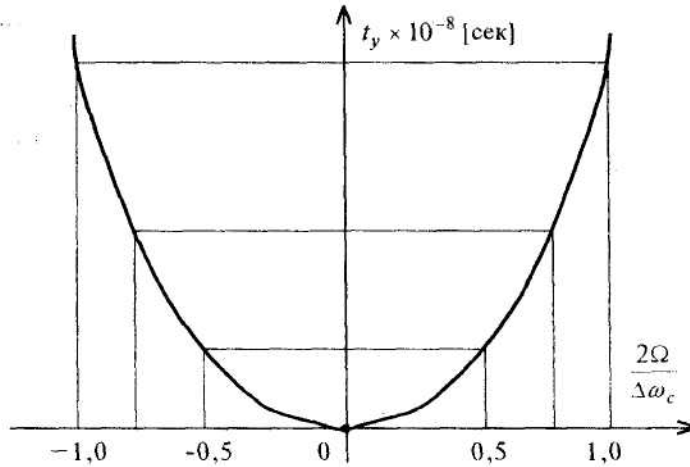


Рис. 4. Залежність часу встановлення фази коливань синхронізованого ГЛПД від розстрої частоти синхронізуючих коливань

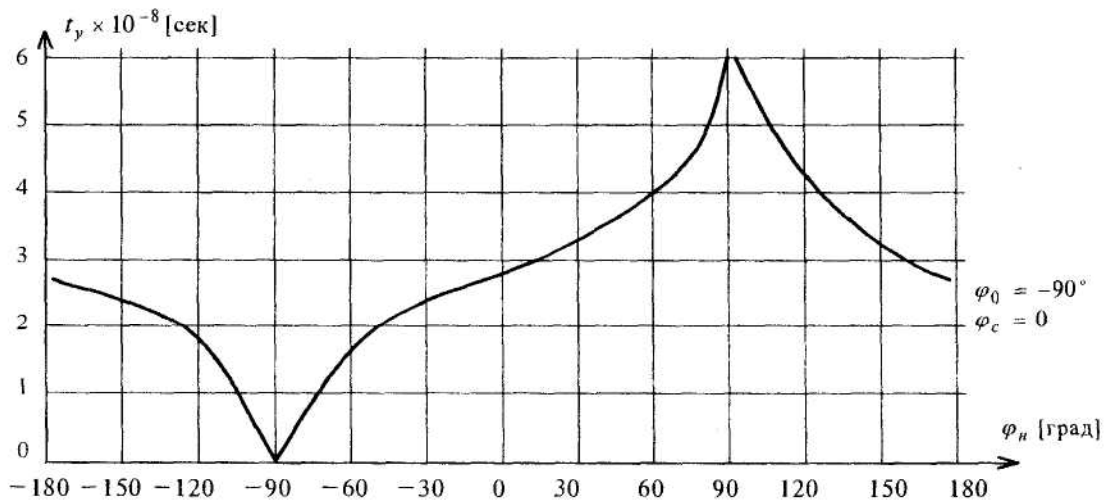


Рис. 5. Залежність часу встановлення фази коливань синхронізованого ГЛПД від початкової фази автоколивань

Щоб одержати залежність фази коливань ГЛПД в часі після закінчення синхронізуючого імпульсу, приймемо у рівнянні (8а) $X_c = 0$.

Тоді

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\Omega_H,$$

$$\varphi = \varphi_K - \Omega_H t,$$

де φ_K – фаза в кінці синхронізуючого імпульсу.

Оскільки за час дії імпульсу процес встановлення фази закінчиться, то $\varphi_K = \varphi_0$. Таким чином, після закінчення синхронізуючого імпульсу фаза змінюється лінійно, починаючи зі свого кінцевого значення.

Амплітуда коливань

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \max (1 - e^{-\delta_0 t}) \sin \varphi(t) \tag{32}$$

після встановлення фази коливань установиться за час $\sim 1/\delta_0$. Принципово він не може перевищити час встановлення коливань в одноконтурному ГЛПД t_a , який згідно з [4] дорівнює приблизно

$$t_a \approx \frac{2\pi \cdot 50}{\omega}$$

При $\omega = 2\pi \cdot 10^{10}$ Гц $t_a \approx 5 \cdot 10^{-9}$ с.

Таким чином, ГЛПД у смузі захвату частоти можуть синхронізуватися по фазі короткими НВЧ імпульсами. Однак, оскільки стаціонарна фаза

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \arccos\left(-\frac{X_0 2\Omega}{X_C \omega_0}\right) + \varphi_C = \arccos\left(-\frac{2\Omega}{\Delta\omega_C}\right) + \varphi_C = \\ &= \arccos\left(-\frac{2\Omega}{\omega_0} \sqrt{\frac{P_0}{P_C}} \cdot Q_{\text{ен}}\right) + \varphi_C \approx \arccos\left(-\frac{2\Omega}{\Delta\omega_{\text{нр}}} \sqrt{\frac{P_0}{P_C}} \cdot Q_{\text{ен}}\right) + \varphi_C, \end{aligned} \quad (17a)$$

де $\Delta\omega_{\text{нр}} \approx \frac{\omega_0}{Q_{\text{ен}}}$, залежить від відношення амплітуди синхронізуючого сигналу до амплітуди коливань ГЛПД, то для одержання сигналів, когерентних із синхронізуючими імпульсами, необхідно підтримувати стабільними амплітуду синхронізуючого сигналу (від імпульсу до імпульсу) та струм живлення ЛПД, який визначає амплітуду автоколивань генератора.

На рис. 6 наведено графік залежності стаціонарної фази φ_0 від нестабільності потужності синхронізуючого сигналу.

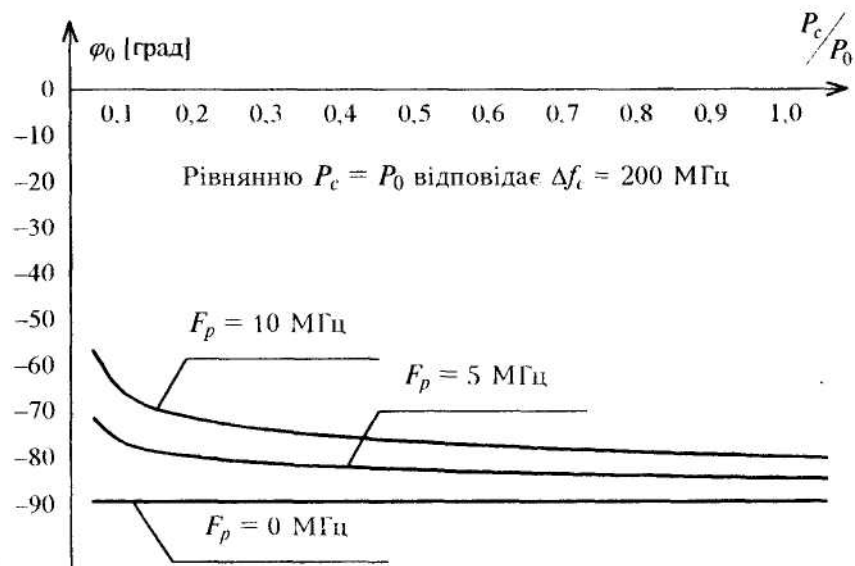


Рис. 6. Залежність сталої фази синхронізованого ГЛПД від потужності синхронізуючих коливань

Як видно з рисунка, відношення P_C / P_0 доцільно підтримувати в межах $\geq 0,2$. Таким чином, залежність сталої фази φ_0 від розстройки ν (17) можна використати для ФАПЧ ГЛПД до частоти синхронізуючих коливань.

Враховуючи те, що частоти коливань на вході та виході ГЛПД однакові (в режимі захвату частоти при безпосередньому впливі), при $t > t_y$ систему ФАПЧ можна вважати ідеалізованою. Час підстройки частоти через відсутність у схемі АПЧ інерційних ланок буде повністю визначатися часом t_y встановлення стаціонарної фази φ_0 при синхронізації ГЛПД шляхом безпосереднього впливу зовнішнього сигналу. В імпульсній системі ФАПЧ час підстройки частоти буде перевищувати t_y , тому що ланки, які приймалися раніше безінерційними (підсилювачі, елемент управління), не будуть такими і будуть мати постійні часу, відмінні від нуля. Тому при виборі конкретної схеми АПЧ це доводиться враховувати. Однак, оскільки зробити відео-підсилювач зі смугою пропускання декілька десятків МГц не складає труднощів, то підстройка за час тривалості синхронізуючих імпульсів (долі мкс) можлива.

Крім того, оскільки до встановлення коливань (фази та амплітуди) ГЛПД на виході безінерційного фазового детектора можливі коливання з частотами $\geq \frac{1}{t_y} \geq 20$ МГц, то для підвищення сталості системи ФАПЧ доцільно використати на виході фазового детектора фільтр зі смугою пропускання $\leq \frac{1}{t_y} \approx 20$ МГц. При цьому слід пам'ятати, що цей фільтр не визначає смугу синхронізму ФАПЧ, яка повністю визначається смугою синхронізації ГЛПД і може значно перевищувати смугу пропускання фільтра.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Фазовая автоподстройка частоты. – Связь, 1966.
2. Тагер А.С. Генерация и усиление колебаний СВЧ с помощью диодов с динамическим отрицательным сопротивлением. Докторская диссертация, АН СССР. – Институт радиоэлектроники, 1962.
3. Тагер А.С., Цебиев А.М. Синхронизация генератора на ЛПД внешним гармоническим сигналом // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия “Электроника СВЧ”, 1962. – № 7.
4. Тагер А.С., Вальд-Перлов В.М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. – Сов. радио, 1968.

КРАВЕЦЬ Леонід Григорович – кандидат технічних наук, доцент, директор Науково-дослідного інституту радіосистем, завідувач кафедри радіотехніки Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- теорія складних радіотехнічних систем;
- теорія і техніка радіоприймальних і радіопередавальних пристроїв.