

УДК 621.313.325+621.373

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.050634

В. М. НЕЛУП, аспірант;

ORCID: 0009-0001-6499-5444

О. В. ГЕТМАНЕЦЬ, канд. техн. наук, професор,

ORCID: 0009-0004-4109-6405

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ НАСТРОЮВАННЯ ГЕНЕРАТОРА КЕРОВАНОВОГО НАПРУГОЮ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АУТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ**

*У роботі розглядається питання підвищення стабільності функціонування системи ФАПЧ за рахунок застосування різних способів настроювання генератора керованого напругою (ГКН).*

*Зокрема у статті запропоновані структурні схеми настроювання ГКН, які у режимі синхронізації з незначною похибкою забезпечують розміщення частот ГКН і опорного генератора (ОГ) по середині області синхронізації (утримання).*

*Такі методи настроювання ГКН забезпечують підвищення стійкості системи ФАПЧ в режимі синхронізації при впливі несприятливих факторів (збурень): внутрішніх і зовнішніх шумів, завад різної природи і характеру виникнення, нестабільностей роботи апаратури, змін параметрів оточуючого середовища (температури, вологості, тиску тощо).*

*Підвищення стійкості системи ФАПЧ досягається настроюванням частоти ГКН практично до частоти ОГ без використання «ресурсу» фазового детектора, тобто у момент встановлення режиму синхронізації вихідна напруга фазового детектора буде наближена до нуля.*

*Використання запропонованих структурних схем настроювання ГКН можливе як в аналогових, так і цифрових радіотехнічних пристроях, де передбачена система ФАПЧ.*

**Ключові слова:** фазове автопідстроювання частоти (ФАПЧ), режими ФАПЧ, стабільність ФАПЧ, настроювання ГКН.

**Вступ**

На сучасному етапі науково-технічного прогресу у галузі телекомунікацій найбільш швидкими темпами розвиваються бездротові системи передавання даних. Такі бездротові системи будуються на основі різноманітних радіотехнологій. Вони забезпечують передавання інформації як на великі відстані, наприклад, у супутникових і радіорелейних системах зв'язку, так і вирішують проблему так званої «останньої милі» для рухомих і стаціонарних абонентів.

Реалізація переваг бездротових технологій при високих швидкостях передавання даних можлива за умови надійної роботи радіотехнічного обладнання у складній заводовій обстановці, характерній для мереж мобільного зв'язку. З огляду на це питання покращення характеристик функціонування радіопередавального і радіоприймального обладнання бездротових мереж приділяється значна увага.

Перехід від аналогових до цифрових систем передавання інформації значно розширив кількість технологій у сфері радіотехніки та електроніки. Були запроваджені нові технології формування і обробки сигналів з розширеним спектром, оптимального прийому сигналів, методи завадостійкого кодування та енергоефективної модуляції, алгоритми адаптивного розподілу радіоресурсу, тощо. На тлі запровадження найбільш інноваційних рішень продовжуються дослідження у напрямку покращення якості функціонування вже відомих технологій.

Зокрема, система ФАПЧ відома з 30-х років ХХ ст., але широкі можливості її застосування для вирішення значної кількості радіотехнічних завдань були очевидні не відразу. Ця система використовується для стабілізації частоти автогенераторів у прийомпередавачах, від-

новлення несучої у системах синхронізації, побудови синтезаторів частот радіоапаратури і демодуляторів сигналів з кутовою модуляцією тощо [1–3]. Перелік можливих застосувань системи ФАПЧ свідчить про її вагомість серед інших систем радіоавтоматики.

З огляду на викладене, подальші дослідження ФАПЧ тривають. Серед основних перспективних напрямків таких досліджень наступні: оптимізація алгоритмів управління ФАПЧ; зменшення енергоспоживання; робота ФАПЧ ультра широкосмугових та височастотних діапазонів; застосування ФАПЧ у квантовій телекомунікації; робота системи в умовах високих швидкостей руху, тощо.

Проблема підвищення стійкості функціонування системи ФАПЧ за рахунок застосування відповідних алгоритмів настроювання ГКН, що розглядається у цій роботі, може бути віднесена до першого перспективного напрямку, запропонованого вище переліку досліджень. Розроблені у роботі структурні схеми настроювання системи ФАПЧ покликані вирішити питання покращення характеристик функціонування даної системи, а отже є актуальними і заслуговують на подальше практичне використання.

### *Особливості настроювання системи фазового автопідстроювання частоти та встановлення режиму синхронізації (утримання)*

В системах ФАПЧ забезпечується захоплення частоти сигналу зовнішнього ОГ  $f_i$  частотою ГКН  $f_g$  із встановленням режиму синхронізації і подальшим стеженням за частотою  $f_i$ . Коли початкове значення частоти  $f_i$  перебуває за межами смуги захоплення системи ФАПЧ  $\Delta F_3$ , необхідно здійснити перестроювання ГКН для пошуку частоти  $f_i$  і забезпечення її входження в  $\Delta F_3$ .

Розміщення смуги захоплення  $\Delta F_3$ , смуги утримання  $\Delta F_y$  (синхронізації), частот ГКН  $f_g$  і ОГ  $f_i$  представлено на рис. 1.

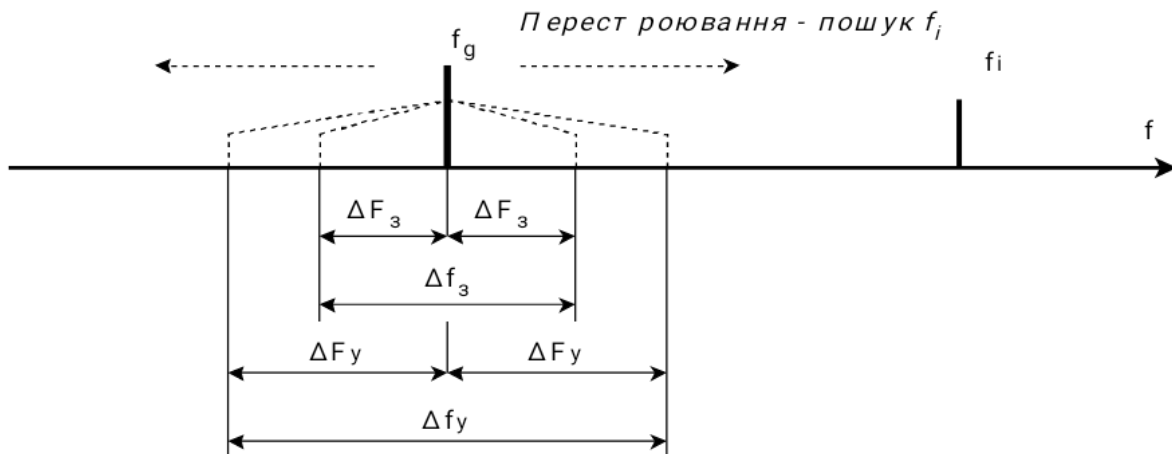


Рис. 1. Розміщення частот генератора керованого напругою і опорного генератора та смуг захоплення й утримання на осі частот

На рис. 1 позначені:  $\Delta f_3=2(\Delta F_3)$  – область захоплення;  $\Delta f_y=2(\Delta F_y)$  – область утримання.

З рис. 1 видно, що  $\Delta F_3$  і  $\Delta F_y$  розміщуються симетрично відносно частоти ГКН  $f_g$  і при перестроюванні зміщуються вздовж частотної осі у напрямку перестроювання.

Тут під шириною смуги утримання  $\Delta F_y$  розуміють різницю частот ГКН і ОГ  $\Delta F_y=|f_g-f_i|$ , при якій відбувається зрив стеження за частотою  $f_i$ , що призводить до втрати режиму синхронізації.

При входженні частоти зовнішнього сигналу  $f_i$  у смугу захоплення ГКН  $\Delta F_3$  відбувається практично миттєва синхронізація двох генераторів, при якій частоти ГКН і ОГ будуть рівні  $f_g=f_i$ . Після захоплення частоти ОГ система ФАПЧ здійснює стеження за цією частотою у межах області утримання ГКН  $\Delta f_y$ .

У момент входження частоти  $f_i$  у смугу захоплення  $\Delta F_3$  подальше перестроювання ГКН по частоті припиняється. У протилежному випадку, смуги захоплення  $\Delta F_3$  і утримання ГКН  $\Delta F_y$  зміщуватимуться по частотній осі і частота  $f_i$  може вийти за межі цих смуг. Це, у свою чергу, призведе до зриву режиму синхронізації та необхідності розпочати пошук  $f_i$  спочатку. При

цьому у момент захоплення частоти  $f_i$  подальша інформація щодо напрямку і величини перестроювання ГКН фактично відсутня.

З рис. 1 видно, що  $\Delta f_3$  і  $\Delta f_y$  на частотній осі розміщуються симетрично відносно частоти власних коливань ГКН  $f_g$ . Тому, після встановлення режиму синхронізації, коли частота ГКН за рахунок відпрацювання ФАПЧ стає рівною частоті ОГ ( $f_g=f_i$ ), значення цих частот розмістяться на краю області утримання  $\Delta f_y$ . Це негативно позначається на роботі ФАПЧ, оскільки нестабільності, завади, шуми, коливання кліматичних параметрів і напруги живлення тощо, зазвичай призводять до зміщення значень частот обох генераторів у режимі синхронізації [4]. Так зміщення у напрямку середини області утримання  $\Delta f_y$  не позначиться на стабільності системи. Зміщення у протилежному напрямку – від середини області утримання, призведе до швидкого виходу значень частот генераторів за межі цієї області, а отже і зриву режиму синхронізації.

Режими перестроювання ГКН, захопту і утримання частоти  $f_i$  відповідно до викладених міркувань відображено на рис. 2.

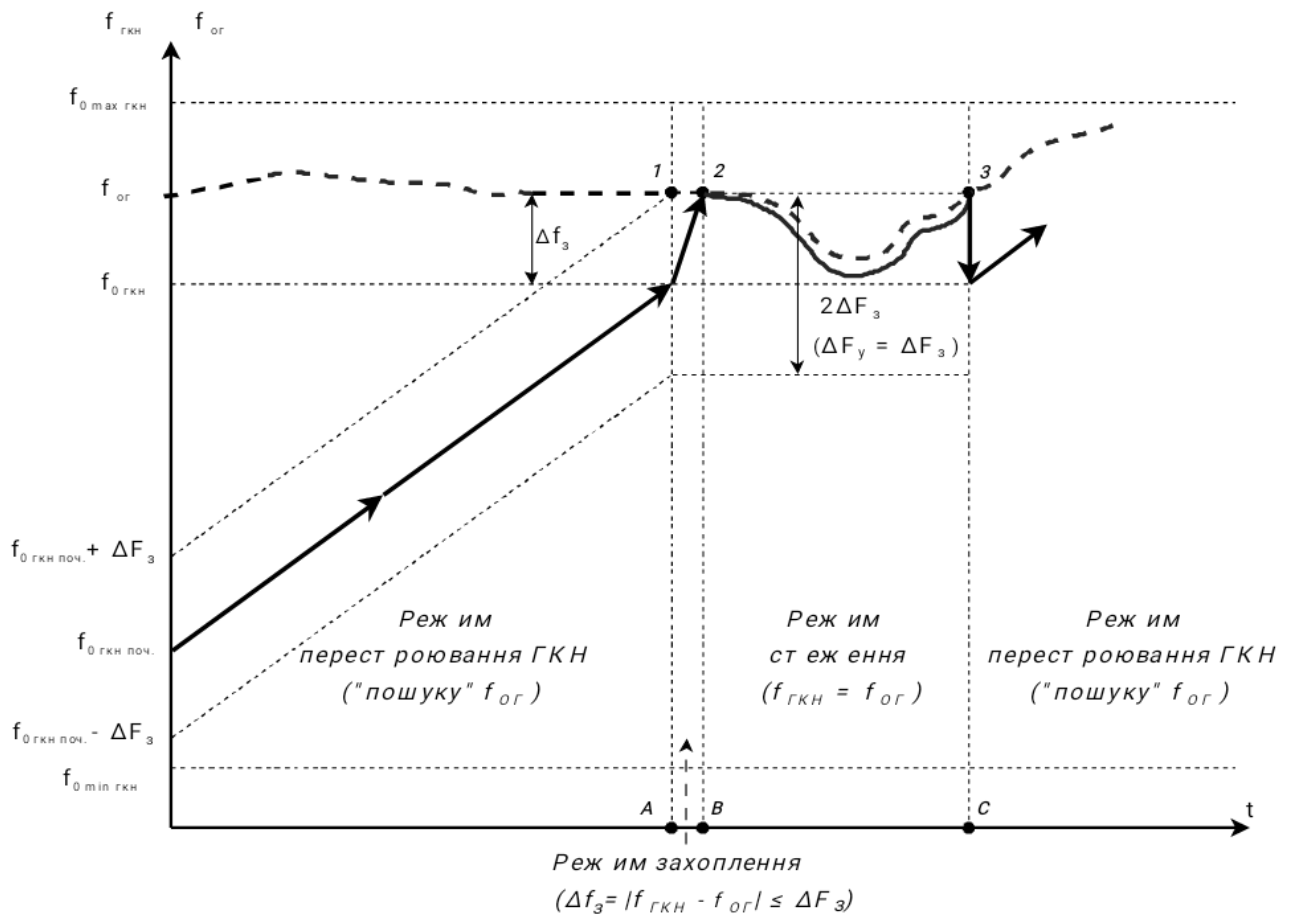


Рис. 2. Зміна  $f_g$ ,  $f_i$ ,  $\Delta F_3$  ( $\Delta F_y$ ) у різних режимах роботи

На приведеній на рис. 2 часовій діаграмі вертикалі відповідають:

- 1–А – моменту входження частоти  $f_i$  у смугу захоплення при виконанні умови  $|f_g-f_i| \leq \Delta F_3$ ;
- 2–В – моменту встановлення режиму синхронізації при виконанні для ГКН і ОГ умови  $f_g=f_i$ ;
- 3–С – моменту зриву режиму синхронізації при виконанні умови  $|f_g-f_i| > \Delta F_y$ , після чого відбувається перестроювання ГКН для пошуку частоти ОГ  $f_i$ .

З рис. 1 також видно, що  $\Delta f_3$  і  $\Delta f_y$  розміщені симетрично відносно частоти вільних коливань ГКН  $f_g$  (частота при розімкненому колі ФАПЧ). Отже, в режимі синхронізації поточне значення частот ГКН і ОГ при їх рівності  $f_g=f_i$ , розмістяться не в середині, а близько до краю смуги утримання  $\Delta F_y$ . Зазвичай у ФАПЧ  $\Delta F_y > \Delta F_3$ , але на рис. 2 ці смуги для зручності зображені як рівні.

### Реалізовані способи настроювання генератора керованого напругою системи фазового автопідстроювання частоти

У раніше опублікованих роботах [5–7] розглядалось питання підстроювання ГКН після захоплення частоти ОГ  $f_i$ . Метою підстроювання було розміщення у режимі синхронізації значень частот ГКН і ОГ по середині області утримання  $\Delta f_y$ , а відповідно і області захоплення  $\Delta f_z$ . Подібне підстроювання ГКН запропоновано для систем інжекційної синхронізації і ФАПЧ.

Структурна схема підстроювання ГКН після захоплення частоти  $f_i$  для системи інжекційної синхронізації представлена на рис. 3.

Принцип роботи структурної схеми на рис. 1 наступний.

У режимі перестроювання після захоплення ГКН частоти ОГ лічильник по модулю 2 (ЛМ2) по сигналу детектора синхронізму (ДС) перемикається у стан логічної одиниці і активує керований атенюатор (КА). Це призводить до зменшення потужності вхідного сигналу ОГ та зриву режиму синхронізації. В результаті перестроювання ГКН продовжиться до повторного захоплення частоти вхідного сигналу  $f_i$  у межах вже зменшеної ширини області захоплення  $\Delta f_z$ . Залежність області синхронізації  $\Delta f_c$  від параметрів сигналів ГКН і ОГ виражається формулою [6]:

$$\Delta f_c = (f_g/Q_n) \cdot (P_i/P_g)^{1/2}, \quad (1)$$

де  $P_i$  – потужність вхідного сигналу ОГ;  $P_g$  – потужність сигналу ГКН;  $Q_n$  – добротність навантажувальної системи ГКН.

Відповідно до формули (1) при зменшенні величини  $P_i$  відбувається зменшення  $\Delta f_c$ , а відповідно і  $\Delta f_z$ . Оскільки в режимі синхронізації частоти ГКН і ОГ при їх рівності  $f_g=f_i$  лежать на краю області синхронізації, відбувається зрив цього режиму і ГКН починає перестроюватися. У результаті відбувається повторне входження частоти сигналу ОГ у зменшену область захоплення  $\Delta f_z'$ . Після повторного захоплення частоти ОГ  $f_i$  та встановлення режиму синхронізації ДС спрацьовує вдруге, по сигналу якого подальше перестроювання ГКН припиняється. У той же час ЛМ2 перемикається у стан логічного нуля і припиняє послаблення КА потужності вхідного сигналу ОГ  $P_i$ . Це призводить до відновлення початкового значення ширини смуги синхронізації, а значення частот ГКН і ОГ, які наразі є рівними  $f_g=f_i$ , розміщуються по середині смуги синхронізації  $\Delta f_c$  з точністю до  $\Delta F_3'$ .

Застосування подібного методу настроювання можливе також і для систем ФАПЧ [7], які знаходять широке застосування у різних радіотехнічних пристроях.

### Альтернативні методи настроювання системи фазового автопідстроювання частоти в середину області синхронізації

Розглянута вище на рис. 3 структурна схема настроювання забезпечує у режимі синхронізації розміщення частот ГКН і ОГ з певною похибкою по середині області синхронізації  $\Delta f_c$  системи інжекційної синхронізації.

Водночас подібний результат настроювання ГКН можливий з використанням інших підходів, які відображають структурні схеми нижче. Перший варіант такої структурної схеми представлений на рис. 4.

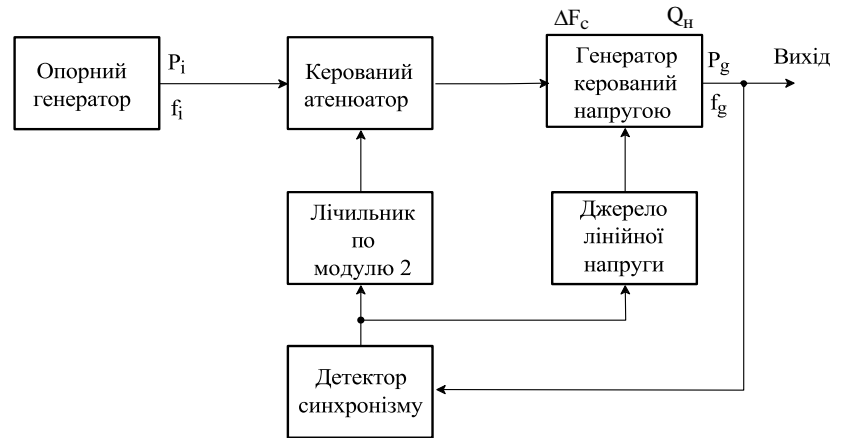


Рис. 3. Структурна схема підстроювання ГКН для системи інжекційної синхронізації

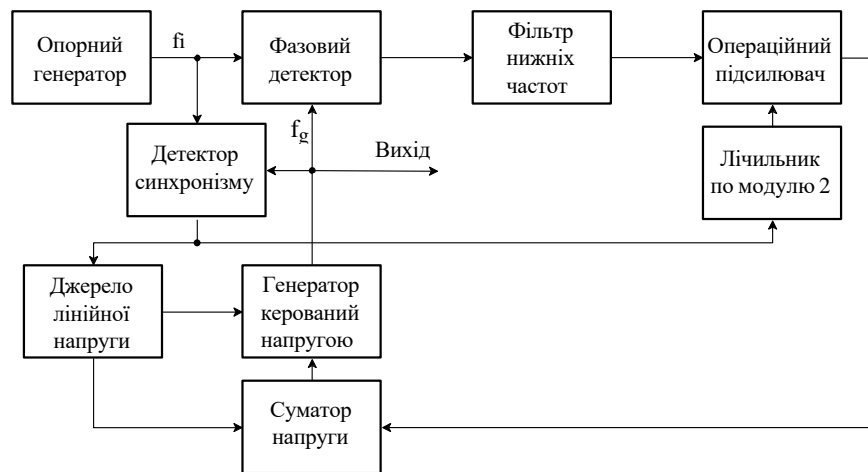


Рис. 4. Структурна схема системи фазового автопідстроювання частоти з настроюванням генератора керованого напругою шляхом зміни коефіцієнта підсилення операційного підсилювача

Слід зважати, що в ФАПЧ ширина області синхронізації (утримання)  $\Delta f_c$  більша за ширину області захоплення  $\Delta f_3$  і залежить від коефіцієнта передавання кола зворотного зв'язку [1]:

$$\Delta f_c = \pi (K_d)(K_f)(K_a)(K_g), \quad (2)$$

де  $K_d$ ,  $K_f$ ,  $K_a$ ,  $K_g$ , – передаточні функції фазового детектора (ФД), фільтра нижніх частот (ФНЧ), операційного підсилювача (ОП) і генератора керованого напругою (ГКН).

Структурна схема на рис. 4 працює подібно до схеми інжекційної синхронізації на рис. 3. Відмінність полягає у тому, що після першого захоплення частоти ОГ  $f_i$  системою ФАПЧ, зрив режиму синхронізації відбувається за рахунок зменшення коефіцієнта підсилення ОП  $K_a$ . З виразу (2) зменшення  $K_a$  призводить до зменшення  $\Delta f_c$ , а також  $\Delta f_3$ , ширина якої для простого RC-фільтра визначається [1]:

$$\Delta f_3 = 2(\Delta f_{\max})^{1/2} / RC, \quad (3)$$

де  $\Delta f_{\max}$  – смуга синхронізації (область утримання  $\Delta f_c = 2\Delta f_{\max}$ ).

Ця схема працює без керованого атенюатора, а ОП має змінний коефіцієнт підсилення, управління яким здійснюється лічильником по модулю 2 (ЛМ2).

Після зриву синхронізації відбувається настроювання ГКН ближче до частоти ОГ  $f_i$  за рахунок її захоплення в межах більш вузької смуги захоплення  $\Delta F_3'$ . Повторне встановлення режиму синхронізації забезпечить спрацювання ДС і ЛМ2, відновлення коефіцієнта підсилення ОП і як результат розміщення частот ГКН і ОГ ближче до середини початкової області синхронізації  $\Delta f_c$ .

Наступний спосіб передбачає вимкнення перестроювання ГКН і одночасне замикання кола зворотного зв'язку системи ФАПЧ по сигналу детектора синхронізму при рівності частот генераторів  $f_g = f_i$ .

Така структурна схема настроювання ГКН відрізняється простотою реалізації і представлена на рис. 5.

У структурній схемі на рис. 5 детектор синхронізму (ДС) порівнює частоти сигналів ГКН і ОГ та за умови рівності цих частот  $f_g = f_i$  формує сигнал, що замикає коло зворотного зв'язку ФАПЧ і зупиняє пе-

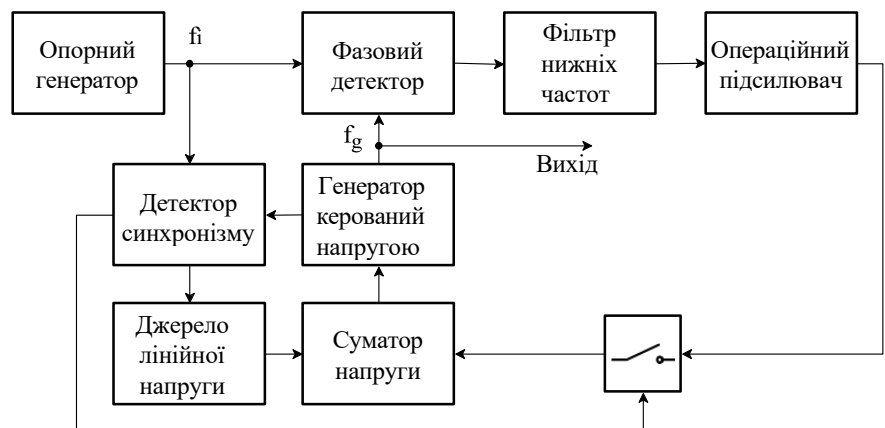


Рис. 5. Структурна схема системи фазового автопідстроювання частоти з настроюванням шляхом комутації кола зворотного зв'язку

рестроювання ГКН, фіксуючи конкретне значення напруги ДЛН.

При цьому необхідно забезпечити спосіб перестроювання ГКН, щоб при наближенні частоти сигналу цього генератора до частоти сигналу ОГ швидкість перестроювання зменшувалась. Така зміна швидкості перестроювання необхідна для зменшення ймовірності проминуті частоту ОГ за час вмикання кола ФАПЧ. Тобто в ДЛН необхідно передбачити можливість стеження за різницею частот ГКН і ОГ  $\Delta f = |f_g - f_i|$  та зміни швидкості перестроювання ГКН в залежності від цього значення.

Реалізація такого перестроювання ГКН мінімізує час перебування ФАПЧ у режимі захоплення, практично миттєво встановлюючи режим синхронізму.

### Висновки

У роботі встановлено, що стійкість ФАПЧ в режимі синхронізації при дії збурень (впливів) різного характеру і природи забезпечується розміщенням значень частот ГКН і ОГ, при їх рівності, по середині області синхронізації.

Розглянуті у роботах [5-7] алгоритм і структурна схема настроювання ГКН для системи інжекційної синхронізації засвідчили, що таке настроювання дозволяє підвищити стійкість системи й зменшити рівень фазових шумів [6]. Водночас у цій схемі точність настроювання ГКН є невисокою і визначається значенням зменшеної під дією керованого атенюатора ширини смуги захоплення.

У роботі розроблені структурні схеми настроювання ГНК системи ФАПЧ, які реалізують альтернативний підхід, у порівнянні із схемою інжекційної синхронізації й забезпечують більшу точність настроювання. Ці схеми настроювання ФАПЧ простіші у технічній реалізації у порівнянні зі схемою інжекційної синхронізації. Практичне використання розроблених структурних схем настроювання ГКН сприятиме підвищенню стійкості системи ФАПЧ, а також стабільності роботи різноманітних радіотехнічних систем в умовах дії на них тих чи інших зовнішніх і внутрішніх збурень.

### Список літератури

1. Wayne Tomasi. *Electronic Communication Systems: Fundamentals through Advanced (4th Edition)*. – Prentice Hall, 2001. – 947p.
2. Roland E. Best. *Phase-Locked Loops. Design, simulation and applications. 6-th edition*. – McGraw Hill, 2007. – 505p.
3. В.К. Стеклов, І.С. Щербина. *Системи фазового автоідстроювання та синхронно-фазові демодулятори*. - К.: Техніка, 2006. – 288с.
4. В.В.Аврутов, І.В.Аврутова, В.М. Попов. *Випробування приладів і систем. Види випробувань та сучасне обладнання: навчальний посібник*. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2009. – 64 с.
5. Пристрій синхронізації генератора: А.с.1187268 СРСР, МКІ НОЗ L 7/00./ Манько О.О., Сич В.П. - № 3474011/24-09; Заявлено 22.07.82; опубл.23.10.85.
6. Манько О.О. *Метод настроювання синхронізованого НВЧ-генератора, що забезпечує низький рівень шумів вихідного сигналу // Праці УНДІРТ.*- 2002.- №2(30).- с.24-26.
7. Каток В.Б., Манько О.О. *Алгоритм настроювання системи фазового автоідстроювання частоти // Технологія і конструювання в електронній апаратурі*. – 1999. – № 2-3. – с. 53-54.

V. Nelup, O. Hetmanets

### METHODS OF VOLTAGE CONTROLLED GENERATOR FREQUENCY TUNING TO INCREASING SYNCHRONIZATION STABILITY OF PHASE-LOCKED LOOP SYSTEM

*The work considers issues of increasing the stability of the operation of the PLL system by means of using of various methods of tuning the voltage-controlled oscillator (VCO).*

*In particular, the article proposes structural schemes for tuning the VCO, which in the synchronization mode with a slight error ensure the placement of the frequencies of the VCO and the reference generator (RG) in the middle of the synchronization area.*

*Such tuning of the VCO usually occurs when the PLL system is been turning on in the case when the RG frequency is outside the synchronization band and accordingly the capture band of the system. In such a case, when the VCO is tuning in the PLL system occurs sequential change of three modes of operation, in particular, the beat, capture and synchronization (hold) modes.*

*Proposed methods of tuning the VCO provide an increase in the stability of the PLL system in the synchronization mode under the influence of adverse factors (disturbances): internal and external noises, interference of various nature, instabilities in the operation of the equipment, changes parameters of the surrounding environment (temperature, humidity, pressure, etc.).*

*Increasing the stability of the PLL system is achieved by tuning the frequency of the VCO almost to the frequency of the RG without using the "resource" of the phase detector, that is, at the moment of setting the synchronization mode, the output voltage of the phase detector is close to zero. As mentioned above, this corresponds to placing the frequencies of VCO and RG in hold mode as close as possible to the middle of the synchronization band of the PLL system.*

*The use of the proposed structural schemes for tuning the VCO is possible in both analog and digital radio engineering devices, where a PLL system is provided.*

**Keywords:** phase-locked loop (PLL), PLL modes, PLL stability, VCO tuning.

---