

УДК 654

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.035257

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

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РЕЖИМУ СИНХРОНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ФАПЧ

У статті проаналізовано режими роботи системи ФАПЧ, зокрема пошуку, захвату й утримання та з'ясовано, що при пошуку частоти опорного генератора системою не забезпечується настроювання частоти генератора, що керується напругою, максимально близько до цієї частоти. Це, у свою чергу, призводить до того, що після потрапляння частоти опорного генератора в смугу захвату миттєво в роботу включається система ФАПЧ, яка компенсує поточне значення різниці частот двох генераторів, використовуючи частину корисної спроможності фазового детектора відпрацьовувати зміну частот обох генераторів в межах лінійної ділянки своєї дискримінаційної характеристики. Така ситуація еквівалентна незнаходженню частот опорного і керованого генераторів, при їх рівності, в середині області утримання, що негативно позначається на стабільності роботи системи ФАПЧ в цілому.

Ключові слова: фазова автопідстройка частоти (ФАПЧ); фазова синхронізація; підстроювання частоти; керований генератор; опорний генератор; смуга утримання; смуга захвату.

Вступ

Комп'ютери і комп'ютерні мережі в наші дні стали невід'ємною частиною глобальної телекомунікаційної мережі, розвиток якої продовжується вкрай швидкими темпами, зокрема в частині передавання інформації з використанням бездротових систем. Сьогодні бездротові радіотехнології забезпечують як передавання інформації на великі відстані, наприклад, в супутникових і радіорелейних системах зв'язку, так і вирішують проблему так званої «останньої милі» для рухомих і стаціонарних абонентів в мережах широкопasmового бездротового доступу. Бездротовий зв'язок широко використовується і в організації персональних мереж користувачів на основі технологій Wi-Fi та Bluetooth.

Реалізація усіх переваг бездротових технологій можлива за умови стабільної і надійної роботи радіотехнічного обладнання, яке має забезпечувати високі швидкості передавання даних зазвичай в складній заводській ситуації, умовах інтерференції та завмирання сигналу. З огляду на це питання покращення характеристик функціонування радіопередавального і радіоприймального обладнання, як складової частини складних систем передавання даних, завжди залишається актуальним.

У даній статті розглядаються метод підвищення стабільності роботи системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Системи ФАПЧ широко застосовуються при вирішенні завдань радіоприймання та передавання сигналів [1; 2]. Найчастіше вони використовуються при побудові синтезаторів частоти для відповідних радіотехнічних пристроїв [1-3]. Основними елементами системи ФАПЧ є фазовий детектор (ФД), фільтр нижньої частоти (ФНЧ) та генератор з електронним перестроюванням частоти, що синхронізується, — генератор, керований напругою (ГКН). До складу системи ФАПЧ входить також генератор зовнішнього опорного сигналу — опорний генератор (ОГ). За відсутності шумів в замкнутій системі ФАПЧ встановлюється стаціонарний режим, при якому частоти ГКН та ОГ є рівними одна одній, а різниця фаз їх сигналів є постійною. Таким чином, відбувається синхронізація сигналу ГКН сигналом опорного генератора ОГ.

При цьому, в залежності від різниці частоти ОГ та частоти вільних коливань ГКН (частоти ГКН при розімкненому колі ФАПЧ) система ФАПЧ може знаходитись у різних режимах [2; 3]. Основним режимом є режим синхронізації, при якому частоти обох генераторів ОГ ($f_{ог}$) та ГКН ($f_{гкн}$) при замкнутому колі ФАПЧ є рівними, тобто $f_{гкн} = f_{ог}$. Якщо почати повільно змінювати частоту $f_{ог}$, то частота $f_{гкн}$ буде відстежувати її значення. Подібний режим, при якому система ФАПЧ повністю компенсує зміни частоти $f_{ог}$ називається режимом утримання. Смугою утримання ΔF_y називається така різниця між частотами $|f_{гкн} - f_{ог}|$, при якій відбувається зрив стеження частоти $f_{ог}$, що призводить до втрати режиму синхронізації в системі ФАПЧ. Смуга утримання характеризує максимальний статичний діапазон стеження (рис. 1) і визначається за формулою [2]:

$$|\Delta F_y| = K \times K_{ФНЧ}(0), \quad (1)$$

де K — коефіцієнт передачі петлі зворотного зв'язку; $K_{ФНЧ}(0)$ — передаточна функція ФНЧ по постійному струму.

Коли рознесення частот обох ГКН і ОГ буде більше за смугу утримання:

$$|f_{гкн} - f_{ог}| > |\Delta F_y|, \quad (2)$$

в системі ФАПЧ встановлюється режим биття, для якого характерна нерівність частот $f_{\text{ГКН}}$ та $f_{\text{ОГ}}$, а напруга на виході ФД періодично змінюється. Режим синхронізації в цьому випадку відсутній. При зміні різниці частот ГКН і ОГ у напрямку її зменшення при деякому значенні цієї різниці:

$$\Delta f_{\text{поч.}} = |f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}| = |\Delta F_3|, \quad (3)$$

система ФАПЧ переходить в режим захвату. Тобто $\Delta f_{\text{поч.}}$ — це таке значення різниці частот ГКН і ОГ, при якому включається в роботу система ФАПЧ і компенсує цю різницю, забезпечуючи рівність частот $f_{\text{ГКН}} = f_{\text{ОГ}}$. При цьому смугою захвату $|\Delta F_3|$ (рис. 1) [2] називається максимальне початкове рознесення частот ГКН і ОГ $\Delta f_{\text{поч.}} = |f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}|$, при якому система ФАПЧ входить в синхронізм, тобто в режим утримання.

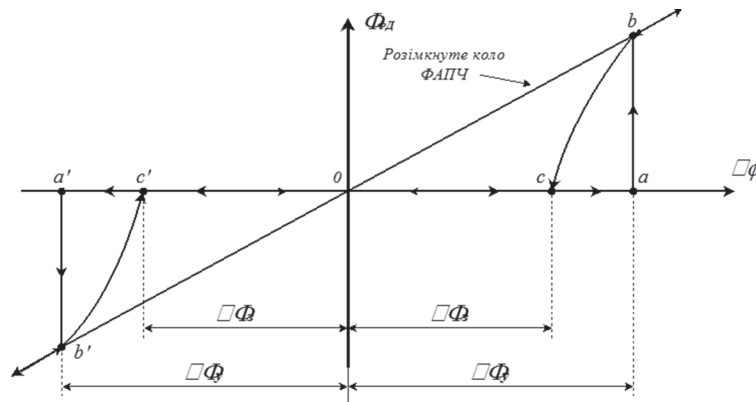


Рис. 1. Характеристика залежності частоти сигналу на виході ФД системи ФАПЧ від різниці частот сигналів на його вході

На рис. 1 наведено залежність частоти $F_{\text{ФД}}$ сигналу на виході фазового детектора системи ФАПЧ від різниці частот ОГ та ГКН $|f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}|$. Початок координат вибрано в точці, де в режимі вільних коливань частоти рівні $|f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}| = 0$. Як видно з рисунку, інтервал частот між точками 0 та c (c') визначає смугу захвату ΔF_3 , а інтервал між точками 0 та a (a') — смугу утримання ΔF_y . Частота $F_{\text{ФД}}$ сигналу на виході фазового детектора у межах смуги утримання дорівнює нулю. Стрілочками позначено можливий напрямок зміни параметрів режиму системи ФАПЧ під час функціонування. При розімкнутому колі зворотного зв'язку ФАПЧ представлено залежність на рисунку відображає пряма лінія.

Як видно з рис. 1, в замкнутій системі ФАПЧ в режимі синхронізації під дією зовнішніх факторів може бути зміна різниці $\Delta f = |f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}|$, як в сторону підвищення стійкості режиму синхронізації (зменшення Δf) так і в зворотну сторону (збільшення Δf). Підвищення стійкості режиму синхронізації при дії зовнішніх факторів відбувається при зміні початкової різниці частот Δf від більшого значення до меншого в граничному випадку до нуля. Як вже було зауважено, причиною зміни частоти в режимі вільних коливань ГКН може бути вплив зовнішніх, зокрема кліматичних чинників [2; 3], якими можуть бути температура, тиск і т.д.

Таким чином, завжди існує загроза зриву режиму синхронізації під час експлуатації апаратури при виконанні умови $|f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}| > \Delta F_y$. Для зниження впливу довкілля на функціонування та підвищення стійкості режиму синхронізації системи ФАПЧ бажано при налаштуванні системи мінімізувати значення параметру $\Delta f_{\text{поч.}}$ до якомога меншого значення, тобто практично в центр області синхронізації. При цьому треба врахувати, що системи ФАПЧ в апаратурі зв'язку повинні мати змогу перестроюватись автоматично з однієї опорної частоти на іншу.

Проблемою, яка заважає налаштуванню ГКН таким чином, щоб частота його коливань при розімкнутому колі ФАПЧ була в околі частоти опорного генератора, є настання режиму синхронізації в точці де різниця початкових частот дорівнює ширині смуги захвату:

$$\Delta f_{\text{поч.}} = |f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}| = |\Delta F_3|. \quad (4)$$

При захваті стрибком настає режим синхронізації, при якому $|f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}| = 0$, і критерій для подальшого налаштування частоти ГКН максимально близько до частоти ОГ зникає. При цьому виникає питання налаштування системи ФАПЧ таким чином, щоб мінімізувати параметр $\Delta f_{\text{поч.}}$. За рахунок цього зросте стійкість режиму синхронізації до впливу зовнішніх факторів, а отже надійність функціонування апаратури значно підвищиться.

Основна частина

Для пошуку шляхів щодо налаштування частоти коливань ГКН $f_{\text{ГКН}}$ (при розімкнутому колі ФАПЧ) якомога ближче до частоти ОГ $f_{\text{ОГ}}$, тобто мінімізації значення $\Delta f_{\text{поч.}}$, розглянемо принцип функціонуван-

ня балансного фазового детектора. Векторну діаграму напруг на діодах балансного фазового детектора та на його виході наведено на рис. 2. Фазовий детектор (ФД), який також називається фазовим компаратором, це пристрій з двома вхідними сигналами: зовнішнього ОГ з частотою $f_{ог}$ та ГКН з частотою $f_{гкн}$. Кут φ визначає фазовий зсув між цими сигналами в режимі синхронізму. Смуга утримання обмежується діапазоном зміни вихідної напруги ФД u_d , а також залежить від передаточних функцій інших ланок кола ФАПЧ. Із рис. 2 видно, що вихідна напруга ФД u_d , яку слід розглядати як суму векторів u_{out1} і u_{out2} на діаграмі, відстежує різницю фаз в діапазоні кутів $\pm\pi/2$ радіан. Тому максимально допустима різниця фаз φ (статична похибка фаз) складає $\pm\pi/2$ радіан, а максимально вихідна напруга фазового компаратора дорівнює:

$$\pm u_{d(max)} = \pm(\pi/2) \times (K_d), \tag{5}$$

де K_d — передаточна функція фазового компаратора; $\pm u_{d(max)}$ — амплітуда зміни вихідної напруги фазового компаратора. При цьому передаточна функція визначена для конкретних вхідних напруг фазового компаратора. Таким чином, максимальна зміна вихідної частоти ГКН складає:

$$\pm \Delta f_{max} = \pm(\pi/2) \times (K_d)(K_f)(K_o)(K_a), \tag{6}$$

де $\pm \Delta f_{max}$ — смуга утримання (максимальна зміна частоти ГКН в режимі синхронізму); K_f, K_o, K_a — передаточні функції ФНЧ, ГКН (крутизна перестроювання) та підсилювача.

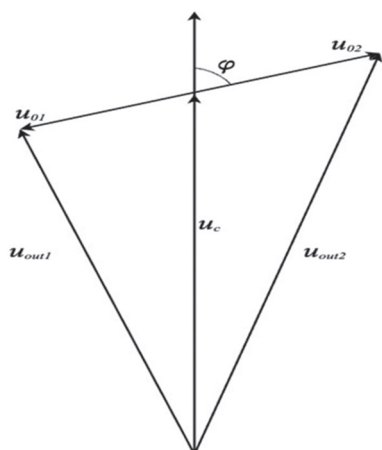


Рис. 2. Векторна діаграма напруг сигналів фазового компаратора

На векторній діаграмі позначені: u_{01}, u_{02} — напруги, визначені вхідним сигналом від опорного генератора; u_c — напруга, визначена сигналом від ГКН; u_{out1}, u_{out2} — векторні суми напруг, прикладених до діодів компаратора.

Замінюючи $(K_d)(K_f)(K_o)(K_a)$ на K_L — коефіцієнт передачі розімкнутої петлі, отримаємо:

$$\pm \Delta f_{max} = \pm(\pi/2) \times K_L. \tag{7}$$

З урахуванням того, що область синхронізації (утримання) $\Delta f_c = 2\Delta f_{max}$, отримаємо:

$$\Delta f_c = \pi K_L. \tag{8}$$

В середині області утримання виконується умова $\Delta f_{поч.} = 0$, тобто різниця між частотами коливань ОГ та ГКН дорівнює нулю. В режимі синхронізації зсув фази між ними в цьому випадку дорівнює 90° .

Як впливає з виразу (8), ширина області утримання пропорційна K_d — передаточній функції фазового компаратора, і для використання K_d у цьому виразі необхідне певне значення вхідної напруги згідно з рис. 2. Тобто ширина смуги утримання (області утримання) Δf_c пропорційна напрузі вхідного сигналу ФД. Таким чином, змінюючи напругу (потужність) вхідного сигналу можна регулювати значення Δf_{max} та відповідно величину $\Delta f_{поч.}$, оскільки $\Delta f_{поч.} \sim \Delta f_{max}$.

При цьому, при зменшенні області утримання Δf_c відбувається зменшення і смуги захвату ΔF_z , що при наступному захваті частоти ОГ системою ФАПЧ призведе до зменшення різниці між частотами коливань ОГ та ГКН $\Delta f_{поч.}$ у момент потрапляння $f_{ог}$ в смугу захоплення ΔF_z .

У свою чергу відновлення потужності вхідного опорного сигналу призведе до зростання Δf_{max} та відповідно Δf_c до початкового значення, при цьому $\Delta f_{поч.}$ залишиться на попередньому незначному рівні і частота коливань ГКН розміщуватиметься практично в центрі смуги синхронізації. У такому

Рис. 3. Режими настроювання синхронізації: стандартний та зі зменшенням рівня опорного сигналу. Позначення Δu та $\Delta u'$ відповідають діапазону напруг, в якому виконуються умови захвату та утримання з шириною смуги частот Δf_c та $\Delta f'_c$

випадку стабільність режиму синхронізації, а отже і стійкість до впливу зовнішніх факторів буде максимальною. На рис. 3 наведено графіки настроювання режиму синхронізації без використання зміни рівня вхідного сигналу та при зменшенні його.

На першому з цих рисунків, розташованому вище, наведено діаграму настроювання за стандартним алгоритмом, коли потужність опорного сигналу не змінюється. В цьому випадку при зміні керуючої напруги ГКН в сторону підвищення та досягненні нею режиму синхронізації: $|f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}| < |\Delta F_3|$ подальше перестроювання не відбувається і частота коливань ГКН – $f_{\text{ГКН}}$ знаходиться на краю області утримання Δf_c . Такий режим є нестійким до впливу зовнішніх факторів.

На нижньому рисунку наведено діаграму настроювання з пониженням рівня опорного сигналу в процесі настроювання. В цьому випадку смуга захвату $\Delta F'_3$ і область утримання $\Delta f'_c$ зменшуються по відношенню до вихідних значень: $\Delta F'_3 < \Delta F_3$ і $\Delta f'_c < \Delta f_c$. Різниця $|f_{\text{ГКН}} - f_{\text{ОГ}}| = \Delta f_{\text{поч}}$ також буде меншою, тобто частота $f_{\text{ГКН}}$ буде ближчою до середини області утримання. При відновленні рівня опорного сигналу до початкового значення область утримання також збільшиться до вихідної величини Δf_c . При цьому $\Delta f_{\text{поч}}$ буде знаходитись на рівні, що відповідає зміщенню $f_{\text{ГКН}}$ ближче до середини області утримання. Це свідчить про підвищення стійкості режиму синхронізації.

На рис. 4 наведено блок-схему системи ФАПЧ, що використовує запропонований метод настроювання.

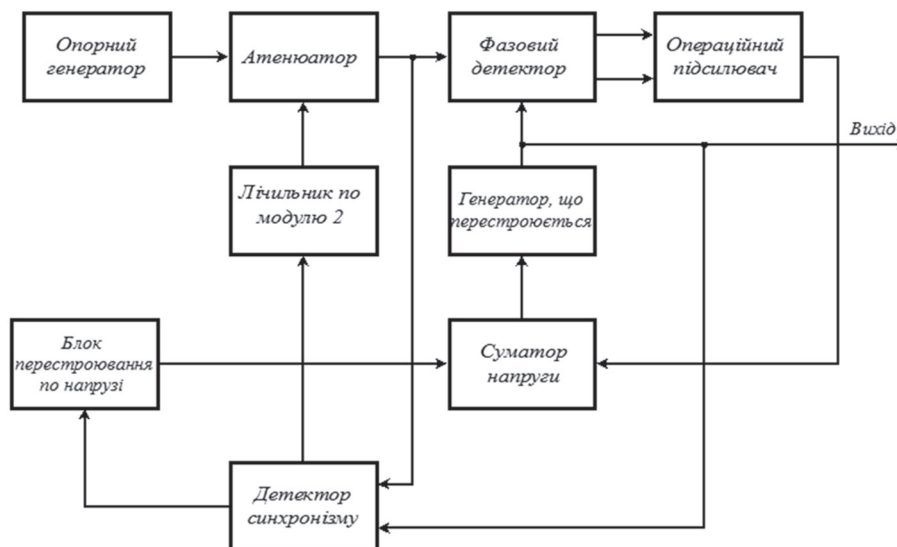


Рис. 4. Блок-схема системи ФАПЧ з підвищеною стійкістю режиму синхронізації

Відповідно до наведеної блок-схеми синхронізуючий сигнал подається з виходу ОГ через керований атенюатор (КА) на вхід фазового детектора (ФД), на інший вхід якого подається сигнал ГКН. З виходу ФД сигнал подається на вхід операційного підсилювача (ОП), з виходу якого через суматор напруги (СН) надходить на вхід ГКН для його перестроювання в режимі захвату і фазової синхронізації. На інший вхід суматора (СН) надходить напруга з джерела керованої напруги (ДКН), яка змінюється у часі по лінійному закону для перестроювання ГКН за частотою. Сигнали з ОГ та ГКН також подаються на входи детектора синхронізму (ДС), виходи якого під'єднані до входу ДКН та лічильника за модулем 2 (ЛМД).

На початковому етапі настроювання ДКН формує лінійно зростаючу напругу, яка через СН подається на ГКН для перестроювання останнього у межах визначеного діапазону частот. При входженні частоти сигналу ОГ в смугу захвату системи ФАПЧ та встановленні режиму синхронізму, ДС виробляє керуючий сигнал (перший сигнал синхронізму), який подається ЛМД у момент часу t_{c1} (рис. 5). На виході лічильника з'являється потенціал, що відповідає рівню логічної одиниці. При цьому ДКН не реагує на перший сигнал синхронізму і продовжує формувати напругу, що перестроє частоту ГКН. Високий вихідний потенціал ЛМД встановлює величину загасання керованого атенюатора, рівною визначеному значенню α (рис. 5). З огляду на зменшення потужності сигналу опорного генератора, зменшується ширина області утримання (синхронізації) Δf_c до величини $\Delta f'_c$, а також і ширина смуги захвату ΔF_3 до величини $\Delta F'_3$, що призводить до зриву синхронізації системи ФАПЧ. Зрив режиму синхронізації призводить до зникнення сигналу синхронізму на виході ДС і перестроювання ГКН продовжується до появи другого сигналу синхронізму на виході цього детектора у момент часу t_{c2} . Цей сигнал перемикає ЛМД у початковий стан з низькою напругою на виході, в результаті чого загасання керованого атенюатора стає рівним нулю (рис. 5). Одночасно сигнал синхронізму надходить до ДКН, який припиняє перестроювання ГКН (рис. 5).

Встановлення режиму синхронізму вдруге свідчить, що частота коливань ГКН знаходиться у межах зменшеної смуги захвату $\Delta F'_3 \ll \Delta F_3$ (а також в межах зменшеної області утримання $\Delta f'_c \ll \Delta f_c$). Отже, в

цьому випадку розбіжність між початковою частотою (при розімкнутій петлі ФАПЧ) по відношенню до смуги захвату і області утримання буде $\Delta f_{\text{поч.}} \ll \Delta F_3$ і $\Delta f_{\text{поч.}} \ll \Delta f_c/2$ відповідно. Враховуючи той факт, що частота середини області утримання співпадає з частотою ОГ $f_{\text{ог}}$, виконання останніх нерівностей свідчить про те, що $f_{\text{ГКН}}$ знаходиться практично в середині області утримання.

Після зменшення загасання атенюатора до нуля потужність опорного сигналу набуває попереднього значення і ГКН працює в режимі синхронізму, при цьому частота його коливань $f_{\text{ГКН}}$ знаходиться з точністю до $\Delta F'_3$ ($\Delta f'_c/2$) в середині області утримання (синхронізації) Δf_c . Такий режим роботи при підвищеній точності настроювання дозволяє збільшити стійкість режиму синхронізації до впливу ряду зовнішніх чинників, зокрема температури, тиску і т.д.

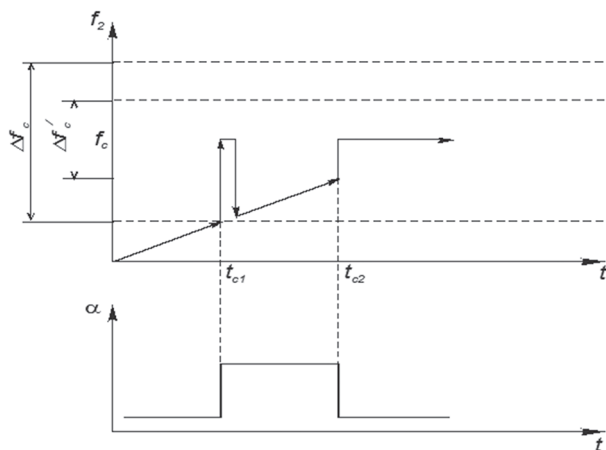


Рис. 5. Спосіб настроювання системи ФАПЧ в режим синхронізації з підвищеною стійкістю

дозволяє зменшити смугу утримання й захвату і за рахунок зриву синхронізації здійснити більш точне настроювання ГКН максимально близько до частоти ОГ. Після такого піднастроювання рівень опорного сигналу зростає до початкового, а частота коливань ГКН знаходиться практично в середині області утримання. Таке настроювання ГКН має забезпечити підвищену стійкість системи ФАПЧ в режимі синхронізації до впливу різноманітних зовнішніх і внутрішніх впливів, які можуть призвести до зриву режиму синхронізації. Даний спосіб повинен враховуватись при розробці радіоапаратури різних видів застосування та виконання, оскільки надійність функціонування такої апаратури значно зростає.

Подібний метод може застосовуватись для систем з інжекційною синхронізацією [4]. При цьому, крім підвищення стійкості режиму синхронізації при використанні опорного генератора з малим рівнем шумів, такий метод дозволяє значно понизити рівень шумів синхронізованого генератора [5].

Висновки

У роботі запропоновано спосіб настроювання системи ФАПЧ, який забезпечує мінімізацію різниці частоти коливань синхронізованого генератора (при розімкненому колі ФАПЧ) та опорного (еталонного) генератора. З цієї метою здійснюється зміна рівня синхронізуючого сигналу в процесі настроювання системи ФАПЧ, а саме зменшення рівня опорного сигналу на певний проміжок часу

Список використаної літератури

1. *Стеглов В. К., Щербина І. С. Системи фазового автопідстроювання та синхронно-фазові демодулятори. К.: Техніка, 2006. 288 с.*
2. *Wayne Tomasi. Electronic Communication Systems: Fundamentals through Advanced (4th Edition). Prentice Hall, 2001. 947 p.*
3. *Аврутов В. В., Аврутова І. В., Попов В. М. Випробування приладів і систем. Види випробувань та сучасне обладнання: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 64 с.*
4. *Манько А. А., Сич В. П. Пристрій синхронізації генератора: А. с. 1187268 ССРСР, МКІ НОЗ L 7/00./ № 3474011/24-09; Заявлено 22.07.82; опр. 23.10.85.*
5. *Манько А. А. Метод налаштування синхронізованого СВЧ-генератора, що забезпечує низький рівень шумів вихідного сигналу // Праці УНДІРТ. 2002. №2(30). С. 24–26.*

V. Nelup, O. Hetmanets

INCREASING THE STABILITY OF THE SYNCHRONIZATION MODE OF THE PLL SYSTEM

Nowadays, the extremely rapid development of the global telecommunications network is accompanied by the search for new and the improvement of already existing radio- and other technologies, which are intended to further advance existing systems towards the construction of even more productive global transport networks, as well as networks of wireless broadband access, including 6G mobile communication networks and networks of subsequent generations.

Among the important and widely used systems, it is worth highlighting the radio engineering system such as the Phase-Locked Loop (PLL) system, the capabilities for further improvement of which are far from exhausted. In particular, articles on various research issues and the use of the PLL systems for various applications are regularly published in world scientific and engineering publications.

The use of PLL covers the issues of stabilizing the frequency of high-frequency generators, building high-precision frequency synthesizers and narrowband tracking filters, signal extraction against the background of noise in Doppler systems, demodulation of signals with frequency and phase modulation, the operation of magnetic recording playback devices, etc.

This article analyzes the operating modes of the PLL system, in particular search, capture and hold, and it is found that when searching for the frequency of the reference generator, the system does not provide tuning of the frequency of the voltage-controlled generator as close as possible to this frequency. This, in turn, leads to the fact that after the frequency of the reference generator enters the capture range, the PLL system is instantly activated, which compensates for the current value of the frequency difference between the two generators, using part of the useful capability of the phase detector to process the frequency changes of both generators within the linear section of its discrimination characteristic. This situation is equivalent to not finding the frequencies of the reference and controlled generators, when their frequencies are equal, in the middle of the retention area, which negatively affects the stability of the PLL system as a whole.

Based on the conducted analysis and the obtained conclusions, the paper proposes the principle of adjusting the PLL system as close as possible to the middle of the synchronization (holding) area, which ensures increased stability of the system against the influence of external factors, and also positively affects the reduction of the frequency noise level of this system. According to this principle of tuning, a corresponding block diagram of the PLL system was developed and an explanation of the operation of such a scheme was provided.

Keywords: phase-locked loop (PLL); phase synchronization; frequency tuning; controlled generator; reference generator; holding band; capture band.

