

УДК 621.391

д-р техн. наук Сайко В. Г. ORCID: 0000-0002-3059-6787 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук, професор Радзівілов Г. Д. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук Комаров В. О. ORCID: 0000-0002-4929-4527 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
д-р філософії Фомін М. М. ORCID: 0000-0002-6864-4238 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
д-р техн. наук, професор Туровський О. Л. ORCID: 0000-0002-4961-0876 (ДУІКТ)
Лисенко Д. О. ORCID: 0009-0009-5120-7929 (ДУІКТ)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФАЗОВИХ ШУМІВ НА ПАРАМЕТРИ РОБОТИ СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ МЕРЕЖ КОГНІТИВНОГО РАДІО В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ОПОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

У роботі проведено аналіз впливу фазових шумів на параметри роботи систем синхронізації мереж когнітивного радіо на фоні нестабільності напруги живлення опорних генераторів.

У першій частині дослідження проведено оцінку впливу похибок пристрою фазової синхронізації та пристрою тактової синхронізації на достовірність повідомлення, що приймається. Отримані залежності ймовірності помилки когерентного прийому протилежних двійкових сигналів за наявності похибок фазової та тактової синхронізації чисельними методами.

У другій частині розроблена імітаційна модель оцінки впливу фазових шумів на параметри роботи систем синхронізації мереж когнітивного радіо на фоні нестабільності напруги живлення опорних генераторів. За основу була взята лінійна модель фазової петлі (PLL) з ПІ-фільтром (пропорційно-інтегральний фільтр). Новизна дослідження полягає у розробці імітаційної моделі фазової петлі з ПІ-фільтром, яка дозволяє оцінювати вплив фазових шумів та нестабільності напруги живлення опорних генераторів на параметри синхронізації. Отримано залежності спектральної щільності фазової помилки та передаточної функції від шуму живлення до фазової помилки, що дозволяє кількісно оцінити механізм проникнення нестабільності живлення в частотні характеристики PLL. Проведено чисельне порівняння впливу параметрів ПІ-фільтра (T_i , K_f) на якість роботи PLL та стійкість системи до шумів живлення, що поглиблює методіку оптимізації параметрів синхронізаторів. Практична цінність дослідження: розроблена модель дозволяє прогнозувати стійкість систем синхронізації когнітивних радіомереж у реальних умовах, коли опорні генератори зазнають впливу нестабільності живлення. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування PLL-структур для когнітивних приймачів, де критично важливе збереження когерентності прийому при дії внутрішніх шумів та завод. Визначені критерії (спектральна щільність, RMS фазова помилка), які можуть застосовуватись як метрики надійності та якості для порівняння різних архітектур систем синхронізації.

У третій частині розроблена методика оцінки впливу точності стабілізаторів напруги на фазову стабільність системи синхронізації. Наукова новизна розробленої методики: запропоновано новий підхід до кількісної оцінки впливу нестабільності стабілізаторів живлення на фазову стабільність систем синхронізації; розроблено MATLAB-модель, яка дозволяє проводити віртуальні експерименти та визначати допустимі межі нестабільності живлення з урахуванням конкретних параметрів PLL та VCO.

Ключові слова: фазові шуми, нестабільність живлення, методика оцінки впливу точності стабілізаторів напруги.

V. Saiko, G. Radzivilov, V. Komarov, M. Fomin, O. Turovskiy, D. Lysenko. Analysis of the influence of phase noise on the operation parameters of cognitive radio network synchronization systems in conditions of instability of the power supply voltage of reference generators

The paper analyzes the influence of phase noise on the operation parameters of cognitive radio network synchronization systems against the background of instability of the power supply voltage of reference generators. In the first part of the study, the influence of the errors of the phase synchronization device and the clock synchronization device on the reliability of the received message was assessed. The dependences of the probability of error of coherent reception of opposite binary signals in the presence of phase and clock synchronization errors were obtained by numerical methods. In the second part, a simulation model was developed to assess the influence of phase noise on the parameters of the synchronization systems of cognitive radio networks against the background of instability of the supply voltage of the reference generators. The basis was taken as a linear model of the phase loop (PLL) with a PI filter (proportional-integral filter). The novelty of the study lies in the development of a simulation model of the phase loop with a PI filter, which allows to assess the influence of phase noise and instability of the supply voltage of the reference generators on the synchronization parameters. The dependences of the spectral density of the phase error and the transfer function from the supply noise to the phase error were obtained, which allows to quantitatively assess the mechanism of penetration of the supply instability into the frequency characteristics of the PLL. A numerical comparison of the influence of PI filter

parameters (T_i , K_f) on the quality of PLL operation and the system's resistance to power supply noise was carried out, which deepens the methodology for optimizing synchronizer parameters. Practical value: the developed model allows predicting the stability of synchronization systems of cognitive radio networks in real conditions, when reference oscillators are affected by power supply instability. The results obtained can be used in the design of PLL structures for cognitive receivers, where it is critically important to maintain reception coherence under the influence of internal noise and interference. The determined criteria (spectral density, RMS phase error) can be used as reliability and quality metrics for comparing different architectures of synchronization systems. In the third part, a methodology for assessing the influence of voltage stabilizer accuracy on the phase stability of the synchronization system is developed. Scientific novelty of the developed methodology: a new approach to quantitatively assessing the influence of power supply stabilizer instability on the phase stability of synchronization systems is proposed; A MATLAB model has been developed that allows for virtual experiments and the determination of acceptable limits for power supply instability, taking into account specific PLL and VCO parameters.

Keywords: phase noise, power supply instability, method for assessing the impact of voltage stabilizer accuracy.

Постановка завдання у загальному вигляді

Розвиток когнітивних радіомереж обумовлює підвищені вимоги до надійності та завадостійкості систем синхронізації, які забезпечують коректне відновлення фазових і часових параметрів сигналів. В умовах динамічного використання спектра, високого рівня завад і мінливих характеристик каналів зв'язку похибки синхронізації безпосередньо впливають на достовірність прийому повідомлень та ефективність функціонування мережі.

Особливу увагу привертають фазові шуми та нестабільність напруги живлення опорних генераторів, що призводять до зміни робочої частоти генераторів та погіршення характеристик фазових автопідлаштованих систем (PLL). Це може зумовлювати виникнення додаткової фазової помилки, зростання ймовірності бітових помилок при когерентному прийомі та зниження стійкості системи синхронізації.

Традиційні підходи до аналізу фазових автопідлаштованих систем розглядають їх у ідеалізованих умовах, часто нехтуючи впливом нестабільності живлення та внутрішніх шумів. У сучасних когнітивних мережах така спрощена модель є недостатньою. Необхідним є створення більш детальної моделі, що враховує чутливість фазового детектора, параметри керованого генератора Voltage-Controlled Oscillator (VCO), характеристики ПІ-фільтра та додаткові фактори, зокрема вплив шумів живлення.

Таким чином, актуальною є задача розробки імітаційної моделі фазової петлі з ПІ-фільтром та оцінки впливу фазових шумів і нестабільності напруги живлення на параметри синхронізації когнітивних радіомереж. Це дозволить отримати кількісні характеристики фазових помилок, визначити критичні параметри системи та сформулювати практичні рекомендації для проектування надійних синхронізаторів у когнітивних приймачах. Важливою також є розробка методики оцінки впливу точності стабілізаторів напруги на фазову стабільність системи синхронізації.

Аналіз публікацій за темою досліджень

Вступ до проблематики

Польові та лабораторні дослідження когнітивних радіомереж підтверджують, що надійність когерентного прийому значною мірою визначається якістю фазової та часової синхронізації. Ключовими джерелами деградації є фазовий шум опорних генераторів, джитер, а також проникнення шумів живлення у контур PLL та тракти відновлення тактової частоти. Тому сучасні роботи фокусуються на моделюванні шумів, методах їх фільтрації та оптимізації параметрів контуру [1–5].

Моделі фазового шуму та основи PLL

Класичні праці з фазових автопідлаштованих систем [1–18] обґрунтовують використання лінійної моделі малих сигналів PLL, де ПІ/ПІД-фільтри формують бажану смугу пропускання та запас стійкості. Для оцінки власних шумів генератора застосовують моделі на кшталт формули Лісона [2] та стохастичні описи шуму фази/частоти. Подальші роботи

деталізують джерела шуму у фазовому детекторі, керованому генераторі (VCO) та у ланцюгах керування напругою, підкреслюючи роль параметрів чутливості K_d та K_f [5].

Вплив похибок фазової і тактової синхронізації на BER

У літературі показано, що систематична та випадкова фазові похибки призводять до ефективного зменшення відношення сигнал/шум на вході детектора, що безпосередньо підвищує ймовірність бітової помилки при когерентному прийомі BPSK/QPSK [3; 4]. Для тактової синхронізації джитер семплювання викликає міжсимвольні завади та зміщення рішення, що погіршує характеристики приймача навіть при незмінних канальних умовах. Поширеною є практика оцінювати BER через інтегральну (RMS) фазову помилку в заданій смузі частот та її зв'язок з еквівалентним SNR-перекосом [5].

Проникнення шумів живлення у контур синхронізації

Окрема група робіт присвячена впливу нестабільності живлення на частоту VCO та контурне керування [5; 8]. Автори вводять коефіцієнт чутливості частоти до напруги живлення (PSKVCO) і розглядають шлях перетворення шуму живлення у фазову помилку через передаточні функції PLL. Зазначається важливість високого коефіцієнта придушення пульсацій живлення (PSRR) регуляторів, ізоляції живлення VCO/мікшера, використання LDO/фільтрів НЧ та правильного трасування землі [8].

Оптимізація ПІ-фільтра та вибір смуги контуру

Дослідження показують компроміс між швидкодією та завадостійкістю: ширший контур краще придушує низькочастотні відхилення, але пропускає більше високочастотних шумів фази; занадто вузький — погіршує захоплення та стійкість до доплерівських/частотних зсувів [1; 3]. Запропоновані методики налаштування (через коефіцієнти підсилення та запас фазової стійкості) дозволяють мінімізувати інтегральну фазову помилку з урахуванням спектра джерел шуму та вимог до часу захоплення [4; 5].

Метрики та підходи до моделювання

Сучасні публікації рекомендують використовувати узгоджені метрики: спектральну щільність фазової помилки, інтегральну (RMS) фазову помилку у робочій смузі, передаточні функції від зовнішніх збурень (живлення, температура) до фази, а також емпіричні залежності BER для типових модуляцій [2; 4; 5]. Імітаційні моделі у середовищах MATLAB/Simulink та Python дозволяють поєднати лінеаризовані моделі PLL із шумовими збудженнями, відтворити як стаціонарний режим, так і перехідні процеси (захоплення/утримання синхронізму).

Системи синхронізації в когнітивному радіо

У контексті когнітивного радіо підкреслюється, що динамічний доступ до спектра і перестроювання несучої/тактової частоти підсилюють вимоги до швидкого захоплення та низького рівня фазової помилки [6; 7; 9]. Досліджуються адаптивні стратегії налаштування параметрів PLL залежно від сценарію використання спектра, каналів із завадами та наявності зовнішніх завад, а також взаємодія контурів фазової і тактової синхронізації у приймачах з багатостандартною підтримкою [7; 9; 10].

Відомі підходи до зниження впливу шумів

Серед інженерних рішень виділяють: рознесення живлення «чутливих» блоків, застосування високоякісних опорних генераторів із низьким фазовим шумом, оптимізацію коефіцієнтів підсилення, а також методи післядетекторної обробки (фазова згладжувальна фільтрація, відстеження частоти) [5; 8]. Для тактової синхронізації використовують петлі відновлення такту з покращеною фільтрацією джитера та алгоритмічне пригнічення ISI [3; 4].

Висновки за результатами огляду і дослідницькі прогалини

Незважаючи на значний прогрес у моделюванні та інженерних рішеннях, менше уваги приділено стику двох факторів: одночасному впливу фазових шумів і нестабільності живлення опорних генераторів у когнітивних приймачах з ПІ-фільтрами [9; 10]. Обмежено представлені узгоджені порівняння варіантів налаштування за інтегральною фазовою помилкою, спектральними метриками та безпосереднім впливом на BER у динамічних сценаріях

когнітивного радіо [7; 9]. Заповненню саме цієї прогалини присвячена ця робота, де поєднано чисельну оцінку похибок фазової/тактової синхронізації з імітаційним моделюванням впливу шумів живлення у лінійній PLL з ПП-фільтром.

Постановка завдання

Метою роботи є дослідження впливу фазових шумів на параметри роботи систем синхронізації мереж когнітивного радіо на фоні нестабільності напруги живлення опорних генераторів.

Виклад основного матеріалу

I. Оцінка впливу похибок пристроїв фазової та тактової синхронізації на достовірність повідомлення, що приймається

Системи синхронізації важливі для забезпечення правильної роботи багатьох електронних пристроїв, особливо в телекомунікаціях та обробці сигналів. У таких системах часто використовується опорне коливання, яке служить еталоном для інших сигналів. Метод синхронізації по миттєвій фазі (СПМ) дозволяє досягти високої точності синхронізації, враховуючи миттєву зміну фази опорного коливання. Це особливо важливо в умовах, коли фаза коливання може змінюватися з часом, наприклад, через завади або зміни умов передачі сигналу.

У цій частині розглянемо аспекти впливу на сигнал короткочасної нестабільності частот опорних генераторів систем синхронізації — фазового шуму. Треба зауважити, що шум живлення підключається до внутрішнього процесу генерації частоти VCO і являє собою зовнішнє збурення, яке додається паралельно до керуючого сигналу в частотному домені. Контур може частково або повністю пригнічувати цей вплив у смузі регулювання. VCO — Voltage-Controlled Oscillator, українською — *генератор, керований напругою*. Його основна властивість: частота вихідного сигналу змінюється пропорційно прикладеній керуючій напрузі. У контексті PLL (фазової автопідлаштованої системи) VCO — це елемент, який «підганяє» свою частоту під еталонний сигнал так, щоб зменшити фазову помилку. Ключовим параметром VCO є фазовий шум — власний шум генератора, який впливає на стабільність сигналу.

Наявність флуктуацій фази призводить до того, що СПМ опорного коливання виявляється відмінною від дельта-функції. Можна показати, що спектр прийнятого сигналу є згортою спектрів переданого сигналу та опорного коливання. Таким чином, крім випадкового повороту сигнального сузір'я відбувається розмиття форми прийнятого сигналу в частотній області, втрата ортогональності між піднесучими, і, як наслідок, посилення міжканальної інтерференції (МКІ). Зі зменшенням відстані між піднесучими вплив фазових шумів значно посилюється і може призвести до непрацездатності системи. Нині існують системи, в яких відстань між піднесучими вимірюється сотнями герц — одиницями кілогерц. Це вимагає застосування високостабільних опорних генераторів як на передавальній, так і на приймальній стороні, а також спеціальних алгоритмів обробки сигналу для оцінки та компенсації як флуктуації фази, так і МКІ. Вплив фазового шуму на OFDM-системи оцінено в [17; 18]. Але дослідженню питань, які пов'язані з впливом нестабільності напруги у системах синхронізації на якісні характеристики сигналів приймальних пристроїв, розробники не достатньо приділяють увагу. Тому далі ми зупинимося більш детально на цьому питанні.

Робота окремих ступенів системи синхронізації по-різному позначається на якості роботи мереж радіозв'язку загалом. Похибки в роботі пристрою циклової синхронізації (ПЦС) та пристрою кадрової синхронізації (ПКС) призводять до неправильного прийому всього повідомлення або частини його, а в роботі пристрою фазової синхронізації (ПФС) та пристрою тактової синхронізації (ПТС) — до зниження його достовірності. Оцінимо вплив похибок ПФС та ПТС на достовірність повідомлення, що приймається. ПФС входить до складу когерентного демодулятора та забезпечує збіг по фазі напруги місцевого генератора та несучої

частоти. Похибки $\Delta \varphi$ ПФС призводять до зменшення відношення сигнал/шум на виході пристрою обробки:

$$q^2(\Delta \varphi) = \left(\frac{2E}{N_0} \right) \cos^2(\Delta \varphi), \quad (1)$$

де q^2 — ефективне відношення сигнал/шум (SNR) на виході приймача;
 E — енергія символу (для BPSK — енергія біта);
 N_0 — спектральна густина шуму (одностороння);
 $\Delta \varphi$ — похибка фазової синхронізації (рад).

Тому, оцінюючи достовірність повідомлення з урахуванням помилок ПФС, можна ввести умовну ймовірність помилки $P_{oш}(\Delta \varphi)$. Якщо швидкість флуктуації помилок ПФС мала (інтервал кореляції випадкового процесу $\Delta \varphi(t)$ багато більше тривалості посилок), то середню ймовірність помилок $\overline{P_{oш}}(\Delta \varphi)$ можна знайти за формулою:

$$\overline{P_{oш}}(\Delta \varphi) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{oш}(\Delta \varphi) w(\Delta \varphi) d(\Delta \varphi), \quad (2)$$

де $P_{oш}(\Delta \varphi)$ — умовна ймовірність помилки при фіксованій $\Delta \varphi$;
 $w(\Delta \varphi)$ — густина ймовірності похибки $\Delta \varphi$ (далі — гаусівська, $N(0, \sigma_\varphi^2)$).

Складність залежності ймовірності помилок $P_{oш}$ від похибки $\Delta \varphi$ не дозволяє отримувати точну формулу для $P_{oш}(\Delta \varphi)$. Тому користуються або наближеними співвідношеннями, знайденими за тих чи інших спрощеннях, або чисельними методами. Вплив помилок ПФС на стійкість до завад можна оцінити за наближеною формулою, справедливою для систем із фазовою модуляцією будь-якої кратності m :

$$\overline{P_{oш}}(\Delta \varphi) \approx 1 - \Phi \left[\frac{\pi}{m} \frac{h}{\sqrt{1 + 2\sigma_\varphi^2 h^2}} \right], \quad (3)$$

де $\Phi(x)$ — функція Лапласа-Гауса (CDF стандартного нормального), $1 - \Phi(x) = Q(x)$;
 m — кратність фазової модуляції (для BPSK $m = 2$);
 $h = \sqrt{2E/N_0}$ — похибка фазової синхронізації;
 σ_φ — СКВ похибки фази (рад).

Значення σ_φ у формулі (3) задано у радіанах.

Графік залежності ймовірності помилки когерентного прийому протилежних двійкових сигналів за наявності похибок фазової синхронізації наведено на рисунку 1.

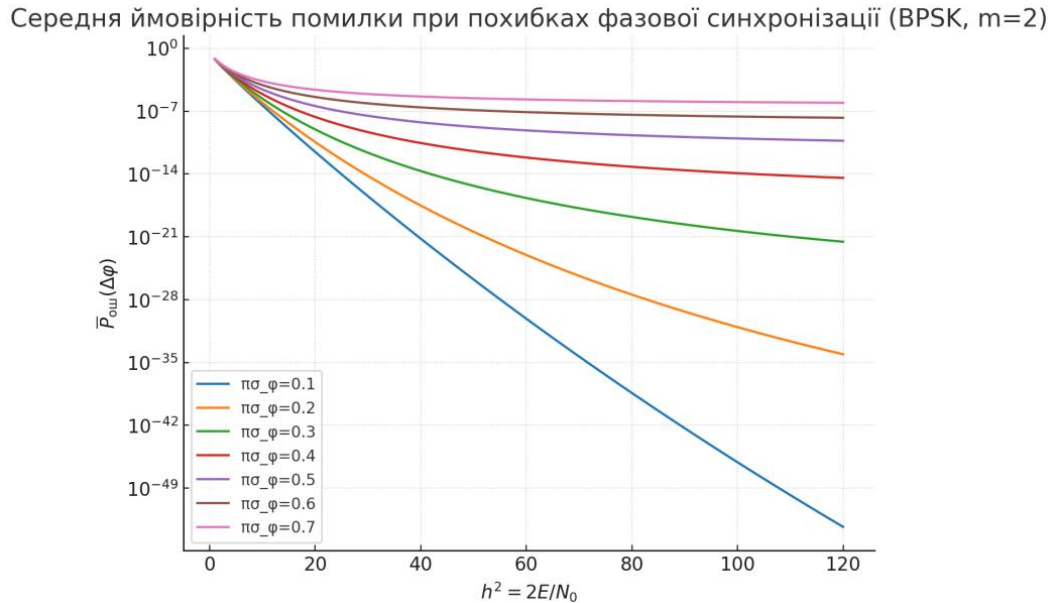


Рис. 1. Залежності ймовірності помилки когерентного прийому протилежних двійкових сигналів за наявності похибок фазової синхронізації

Похибки тактової синхронізації призводять до того, що момент відліку напруги на виході корелятора або узгодженого фільтра не відповідає моменту закінчення посилки. Тоді при зміні символів на вході вирішальної схеми будуть накопичуватися сигнали від посилок різного знака і відношення сигнал/шум q^2 зменшиться:

$$q^2(\varepsilon) = q^2(1 - 2|\varepsilon|), \quad (4)$$

де ε — нормована похибка моменту відбору (частка тривалості символу; $|\varepsilon| \leq 0.5$ — «вікно» синхронного відбору).

Ввівши умовну ймовірність помилки $P_{ош}(\varepsilon)$ і знаючи закон зміни $w(\varepsilon)$, можна обчислити середню ймовірність помилки $\overline{P}_{ош}(\varepsilon)$ аналогічно (2). Як і в попередньому випадку, кількісні результати можна отримати чисельними методами. Помилки тактової синхронізації, на відміну від фазової, будуть впливати тільки на прийом символів, що чергуються.

Для випадкової послідовності двійкових символів ймовірність зміни знаку дорівнює 0,5, а середня ймовірність помилки дорівнює:

$$\overline{P}_{ош}(\varepsilon) = 0,5 [P_{ош}(\varepsilon) + P_{ош}], \quad (5)$$

де $P_{ош}(\varepsilon)$ — умовна BER для символів, що чергуються, за наявності ε ;

$P_{ош}$ — BER при ідеальній тактовій синхронізації (для BPSK $P_{ош} = Q(h)$);

множник 0,5 — ймовірність чергування бітів у випадковій двійковій послідовності.

Графік залежності ймовірності помилки когерентного прийому протилежних двійкових сигналів за наявності похибок тактової синхронізації наведено на рисунку 2.

Середня ймовірність помилки при похибках тактової синхронізації (BPSK)

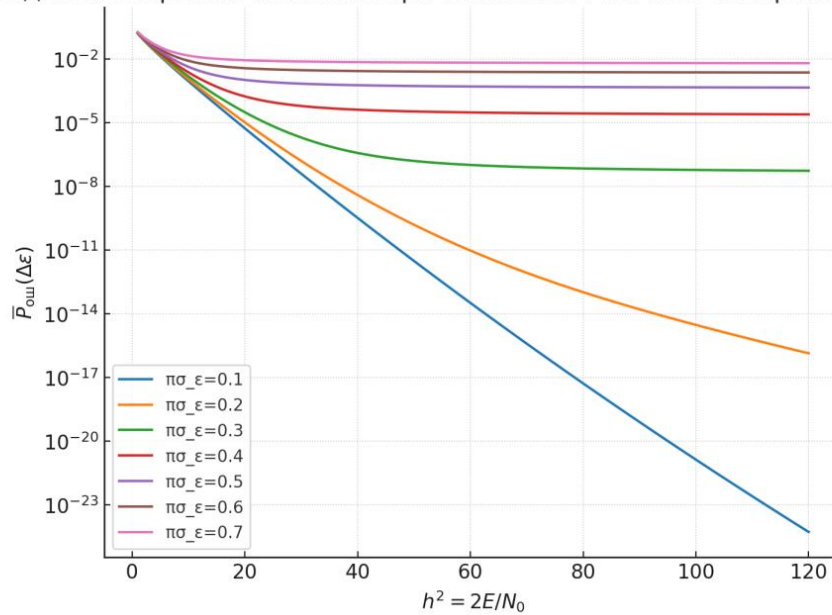


Рис. 2. Залежності ймовірності помилки когерентного прийому протилежних двійкових сигналів за наявності похибок тактової синхронізації

Із отриманих графіків (див. рис. 1 та рис. 2) виходить, що зростання джитера (більші $\pi\sigma_\phi$ або $\pi\sigma_\epsilon$) створює помилкову “підлогу”: при великому SNR крива перестає спадати експоненційно й виходить на плато тим вище, чим більша дисперсія похибки. Це видно на обох рисунках. Помилкова “підлога” у висновках означає, що навіть при збільшенні SNR нестабільність напруги живлення вносить обмеження $\rightarrow$ рівень помилок не падає нижче певного значення. Вона виникає через системні похибки, такі як нестабільність генераторів (VCO, гетеродинна), фазові шуми PLL, джитер тактових імпульсів. У випадку синхронізації: навіть при високій потужності сигналу нестабільність напруги живлення викликає фазові коливання, і крива BER (bit error rate) «застигає» на певному рівні.

Плато — це ефект, коли система синхронізації, внаслідок фазових шумів від живлення, «застигає» на ділянці зі сталою ймовірністю помилки, і подальше збільшення потужності сигналу чи фільтрації не покращує результат.

Цікаво порівняти ступінь впливу на завадостійкість помилок фазової та тактової синхронізації при заданому відношенні сигналу в каналі. Для цього припустимо, що тактова частота формується з опорної, рівної частоті несучої, шляхом поділу на k_d (k_d — коефіцієнт ділення частоти). Тоді флуктуації фази тактової частоти будуть меншими за флуктуації фази опорної частоти в k_d разів. При цього випливає, що в режимі стеження, коли неоднозначність відліку фази тактової частоти усунена, на завадостійкість будуть впливати помилки пристрою фазової синхронізації. Це твердження справедливе і тоді, коли опорна та тактова частоти формуються від різних генераторів.

II. Імітаційна модель оцінки впливу фазових шумів на параметри роботи систем синхронізації мереж когнітивного радіо на фоні нестабільності напруги живлення опорних генераторів

Для проведення подальших досліджень була розроблена імітаційна модель, параметри якої наведено нижче.

Опис моделі

За основу була взята лінійна модель фазової петлі (PLL) з ПП-фільтром (пропорційно-інтегральний фільтр).

ПІ-фільтр у PLL — це коригуюча ланка, яка забезпечує швидку реакцію на зміну фази (P) і ліквідує сталу похибку (I), формуючи оптимальний баланс між швидкодією та точністю.

Фільтр у фазовій автопідлаштованій системі знаходиться між фазовим детектором і VCO. Його задача:

сформувати таку напругу керування для VCO, щоб система була стійкою і точно відслідковувала вхідний сигнал;

зменшити вплив шумів і збурень.

ПІ-фільтр — це комбінація двох дій:

P – пропорційна дія, коли вихід прямо пропорційний вхідному сигналу;

I – інтегральна дія, яка накопичує помилку у часі, щоб усунути сталу похибку.

Пропорційна частина P швидко реагує на зміни фази, що робить систему швидшою.

Інтегральна частина I накопичує навіть маленькі відхилення фази у часі, щоб усунути постійну фазову похибку (PLL стає «точним»). Разом із тим, інтегральна дія робить систему чутливішою до шумів, тому вибір T_i важливий для компромісу між точністю та стійкістю.

Передавальна функція визначається наступним виразом:

$$F(s) = K_f \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad \text{з } K_f=1, T_i = 0.01 \text{ с,}$$

де K_f — коефіцієнт підсилення ПІ-фільтра у каналі керування. Він масштабує вихід напруги з фільтра перед подачею на VCO. Фізично K_f визначає швидкість реакції PLL на фазові похибки: чим більше K_f , тим швидше PLL реагує, але тим сильніше чутлива до шумів;

T_i — інтегральний час у ПІ-фільтрі у частотній області, який визначає «силу» інтегрування;

T_i — визначає швидкість інтегратора:

малий T_i → швидке усунення сталої помилки, але більша чутливість до шумів;

великий T_i → повільніше усунення помилки, але краща стійкість.

Його характеристики АЧХ та ФЧХ наведені на рисунках 3 та 4.

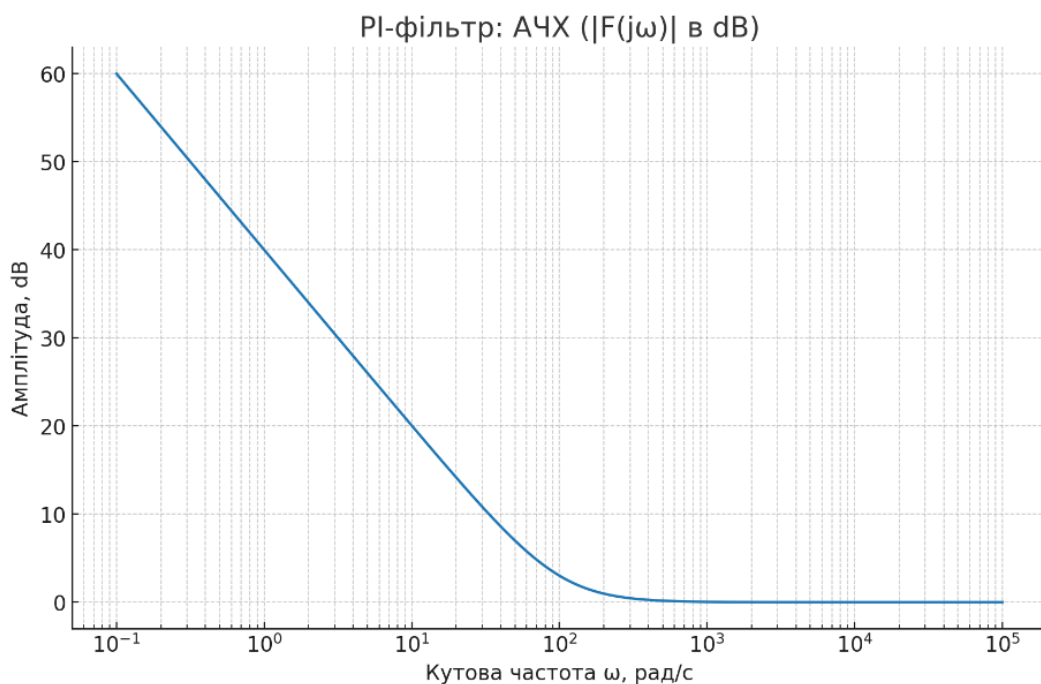
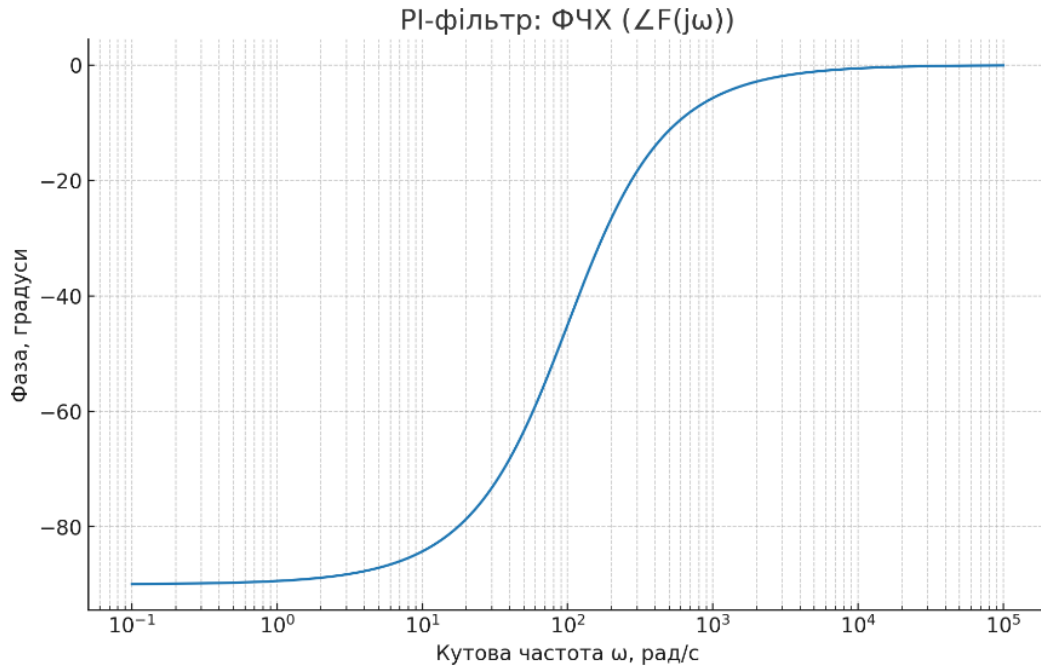


Рис. 3. АЧХ ($|F(j\omega)|$ у dB) ПІ-фільтра


 Рис. 4. ФЧХ ($\angle F(j\omega)$) ПІ-фільтра

Фазова помилка від шуму живлення. Це передавальна функція від збурення (нестабільності напруги живлення) до фазової помилки PLL. Вона показує, наскільки шум живлення впливає на фазову помилку на виході PLL, та визначається:

$$F_e(j\omega) = \frac{K_{vs}}{j\omega (1+L(j\omega))}, \quad L(j\omega) = \frac{K_d K_{vco} F(j\omega)}{j\omega},$$

де $K_d = \frac{1 \text{ рад}}{\text{В}}$ — чутливість фазового детектора;

$K_{vso} = 2\pi * \frac{10^6 \text{ рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$ — чутливість VCO;

$K_{vs} = 2\pi * \frac{10^5 \text{ рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}$ — вплив нестабільності напруги живлення на частоту VCO.

Спектральна щільність фазової помилки:

$$S_\phi(\omega) = |F_e(j\omega)|^2 S_v.$$

Шум живлення прийнято як білий зі спектральною щільністю $S_v = 1 * 10^{-6} \text{ В}^2/\text{Hz}$.

Амплітудна щільність (фазовий шум):

$$S_\phi(f) = \sqrt{S_\phi(\omega)}.$$

Результати моделювання

На рисунку 5 показано спектр фазової помилки від шуму живлення.

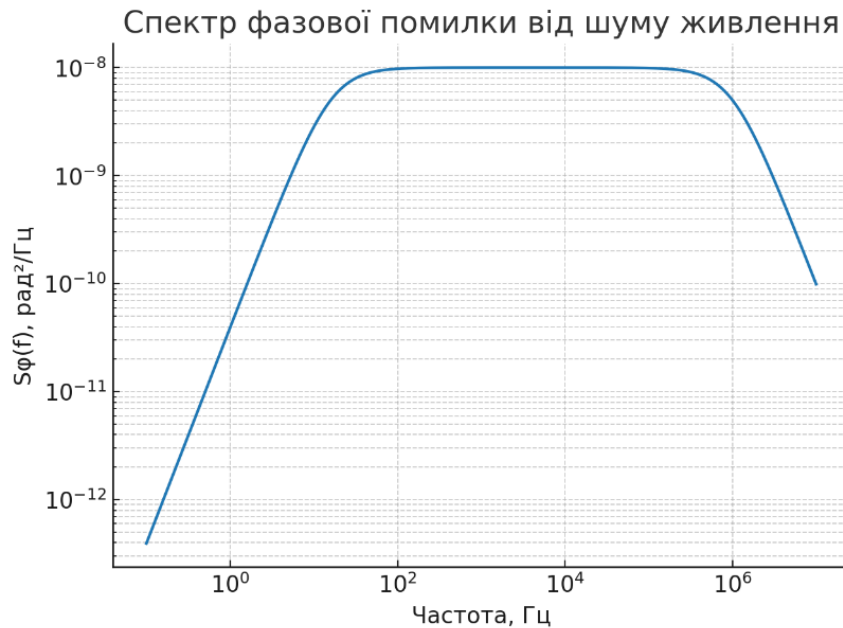


Рис. 5. Спектр фазової помилки від шуму живлення

Як випливає із графіків, на низьких частотах спектральна щільність фазової помилки майже стала. Це пояснюється тим, що при дуже низьких частотах збурення в основному проходить на вихід PLL без значного придушення, бо фільтр та контур ще не створюють суттєвої корекції.

На середніх частотах — в області частот, близьких до смуги пропускання петлі (~десятки-сотні кГц для наших параметрів), починається спад $S\phi(f)$. Це обумовлено роботою петлі PLL, яка пригнічує низькочастотні збурення завдяки зворотному зв'язку.

На високих частотах — при частотах значно вищих за смугу пропускання PLL (вище ~ 1 МГц) спектральна щільність знову вирівнюється і навіть зростає, бо петля вже не може компенсувати швидкі зміни. Тут фаза VCO безпосередньо повторює миттєві зміни частоти від шуму живлення.

У цілому, смуга придушення шуму живлення обмежена пропускнуою здатністю PLL. Чим ширша смуга — тим ефективніше зниження низькочастотної складової фазової помилки.

На рисунку 6 показано передаточну функцію від шуму живлення до фазової помилки.

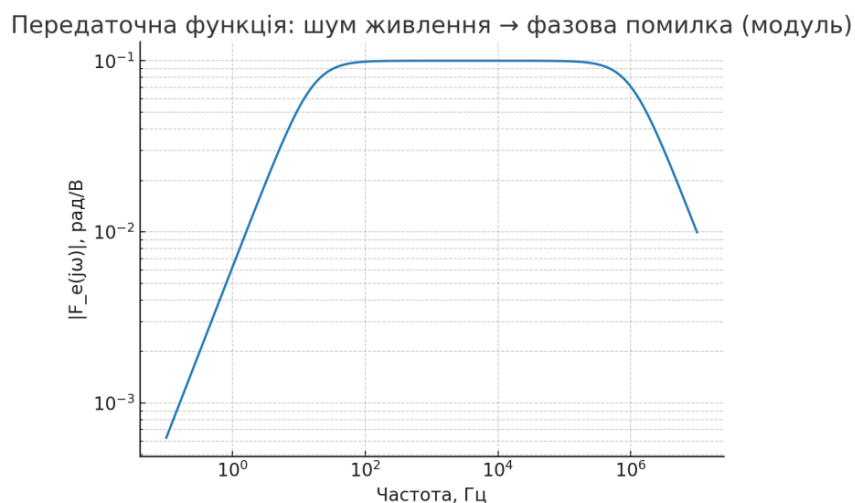


Рис. 6. Передаточна функція від шуму живлення до фазової помилки

Передаюча функція показує, що основний захист від шуму живлення відбувається лише в межах смуги пропускання петлі PLL. За її межами збурення проходять практично без ослаблення.

На дуже низьких частотах значення $|Fe|$ велике, бо зворотний зв'язок не встигає коригувати фазу VCO — майже весь вплив нестабільності живлення передається на фазу вихідного сигналу.

У смузі регулювання PLL видно спад характеристики приблизно з нахилом -20 дБ/дек (для нашої ПІ-петлі). Тут шум живлення ефективно пригнічується.

На високих частотах (вище частоти зрізу) передаюча функція знову наближається до передатної VCO без регулювання, бо зворотний зв'язок не працює.

Далі наведемо інтегральну (RMS) фазову помилку на заданій смузі частот, яка дає кількісну оцінку якості придушення.

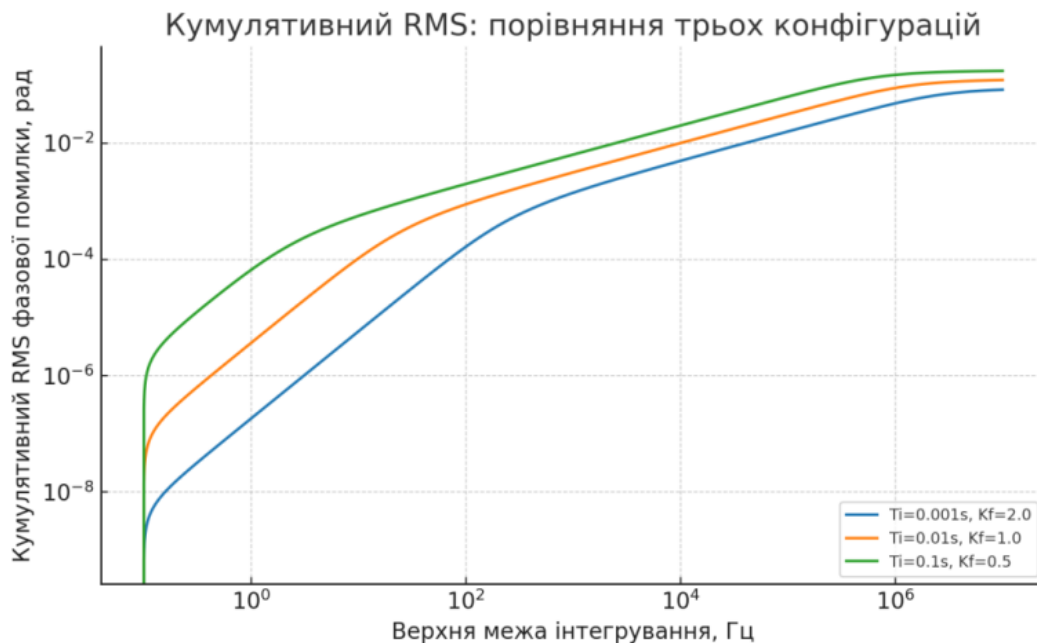


Рис. 7. Кумулятивний RMS: порівняння трьох конфігурацій

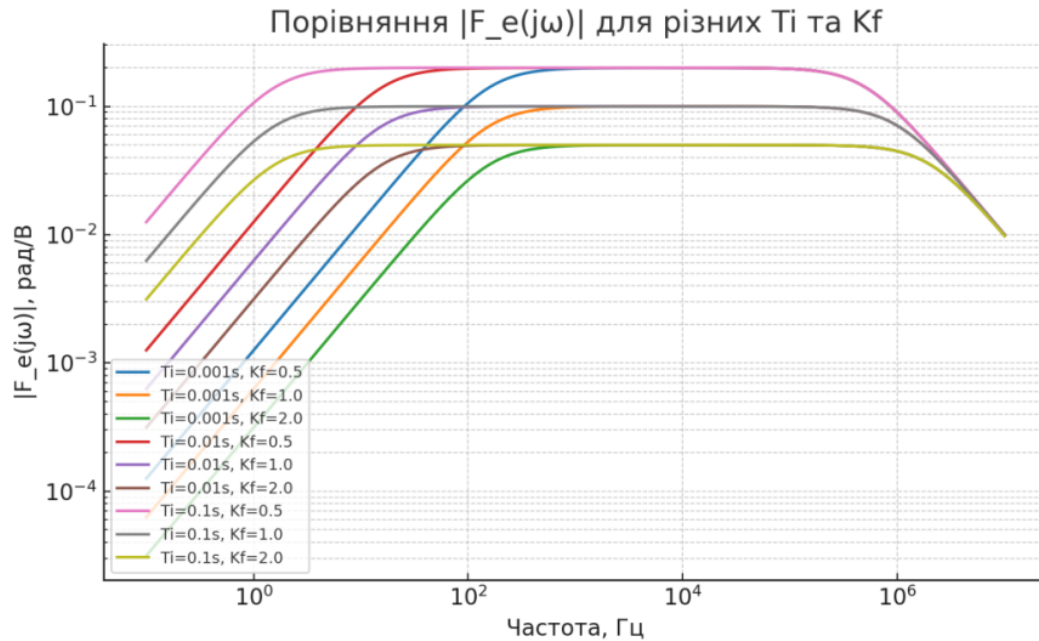
На рисунку 7 додано графік кумулятивного RMS від верхньої межі інтегрування, який показує, на яких частотах накопичується основна помилка:

загальний RMS фазової помилки: 0.1213 рад $\approx 6.95^\circ$;

загальна дисперсія: 1.4711×10^{-2} рад².

Дані рисунка 7 показують, що в діапазоні $\leq$ десятки Гц крива зростає дуже повільно і вклад низьких частот мінімальний. Це наслідок зворотного зв'язку PLL та інтегрувальної природи. На середніх частотах (кГц...сотні кГц) крива зростає — у цій області майже пласке. На високих частотах ($\approx$ МГц і вище) крива продовжує зростати та добирає велику частку загального RMS, бо за межами смуги регулювання петля вже не пригнічує збурення, і фаза VCO повторює зміну частоти від шуму живлення. На графіку кумулятивного RMS видно (див. рис. 7): конфігурація з високим K_f та малим T_i дає найменший накопичений RMS у всьому діапазоні (синя крива нижня). Конфігурація з великим T_i і малим K_f (зелена крива) — найгірша.

На рисунку 8 показані результати моделювання $|Fe|$ порівняння для різних T_i, K_f .

Рис. 8. Результати моделювання $|F_e|$ порівняння для різних T_i, K_f

Збільшення K_f (підсилення фільтра) зменшує $|F_e|$ у смузі регулювання (видимий зсув кривої вниз/вліво) і, відповідно, знижує вклад шуму живлення у фазу — це призводить до зменшення RMS.

Зменшення T_i (швидший інтегральний термін) також підвищує швидкодію петлі на низьких частотах, зменшуючи вплив низькочастотного шуму. Однак занадто мале T_i може вплинути на стійкість (ця модель — лінійна, тому частотна оцінка, стабільність потребує додаткового аналізу запасу по фазі).

III. Методика оцінки впливу точності стабілізаторів напруги на фазову стабільність системи синхронізації

Проведений вище аналіз дозволив сконцентрувати увагу на задачах, пов'язаних із нестабільністю напруги живлення, яка впливає на фазову стабільність системи синхронізації, а, отже, на якість демодуляції, стійкість до завад і загальну надійність приймальних пристроїв.

Для цього спочатку були класифіковані основні фактори, які пов'язані з впливом нестабільності напруги живлення на якість роботи систем синхронізації телекомунікаційних мереж.

Класифікація основних факторів, які пов'язані з впливом нестабільності напруги живлення

1. Зростання фазового шуму та джитера

Нестабільність живлення викликає коливання частоти VCO, що проявляється у вигляді фазового шуму та джитера. Це безпосередньо погіршує часову точність відліків сигналу та знижує коректність синхронізації.

2. Погіршення відношення сигнал/шум (SNR)

Додаткові флуктуації у фазі перетворюються в еквівалентний шум. Це знижує ефективне SNR на вході демодулятора і призводить до зростання похибок відновлення сигналу.

3. Зростання ймовірності бітових помилок (BER)

Для систем із цифровою модуляцією (QPSK, QAM) навіть невеликі фазові відхилення через нестабільність живлення призводять до збільшення BER, особливо при високих порядках модуляції.

4. Втрата ортогональності в OFDM-системах

У багатонесучих системах (LTE, Wi-Fi, 5G NR) фазова нестабільність спричиняє інтерференцію між піднесучими (ICI), що погіршує пропускну здатність і збільшує необхідність у складних алгоритмах компенсації.

5. Зниження точності оцінки частоти та фази

У системах із когерентним прийомом нестабільність живлення ускладнює оцінку несучої частоти та фази, що призводить до зсувів у фазових діаграмах сигналу (IQ-площина).

6. Вплив на синхронізацію в часі

Джитер, спричинений шумом живлення, може призвести до помилок при визначенні моменту початку символів, що особливо критично для систем із щільним мультиплексуванням.

7. Підвищене енергоспоживання компенсуючих алгоритмів

Для компенсації нестабільності напруги необхідно використовувати додаткові фільтри, коректори частоти або цифрові PLL-алгоритми, що збільшує складність і енергоспоживання приймального пристрою.

На цей час розроблено багато методів та інженерних рішень по проблематиці щодо зниження впливу шумів. Незважаючи на значний прогрес у моделюванні та інженерних рішеннях, мало уваги приділено розробці методів підвищення точності роботи стабілізаторів напруги для систем синхронізації в радіотехнічних пристроях і засобах телекомунікації. Тому важливою є розробка методики оцінки впливу точності стабілізаторів напруги на фазову стабільність системи синхронізації.

Методика та алгоритм оцінки впливу точності стабілізаторів напруги на фазову стабільність системи синхронізації

Як відомо, нестабільність живлення напруги впливає на фазову стабільність системи синхронізації, а, отже, на якість демодуляції, стійкість до завад і загальну надійність приймальних пристроїв. Нижче наведена методика, яка дозволяє кількісно оцінити вплив стабілізаторів напруги на роботу системи синхронізації.

Етап 1. Вихідні дані та постановка задачі

Вхідний параметр — нестабільність напруги живлення:

$$\Delta U = (U - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}},$$

де U — миттєве значення напруги живлення;

$U_{\text{ном}}$ — номінальне значення.

Відомо, що нестабільність живлення впливає на:

роботу гетеродинів і генераторів (VCO);

фазову помилку в PLL;

спектр фазових шумів.

Етап 2. Модель перетворення нестабільності живлення у фазову нестабільність

Для генератора з керуванням напругою (VCO):

$$\Delta f = K_v * \Delta U,$$

де K_v — коефіцієнт чутливості VCO [Гц/В].

Фазова похибка за час t :

$$\varphi(t) = 2\pi \int_0^t \Delta f(\tau) d\tau.$$

Фазова дисперсія:

$$\sigma_{\varphi}^2 \approx (2\pi K_v \cdot \Delta U \cdot T)^2,$$

де T — характерний час інтеграції в PLL.

Етап 3. Критерії оцінки впливу

1. Ймовірність помилки фазової синхронізації:

$$P_{slip} \approx \exp(-\Delta\omega_{hold} / \sigma_{\varphi}),$$

де $\Delta\omega_{hold}$ — смуга утримування PLL.

2. Вплив на якість демодуляції (BER) для когерентного прийому:

$$\text{BER} \approx Q(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0 \cdot \cos^2(\sigma_{\varphi})}),$$

де σ_{φ} — середньоквадратична фазова помилка.

3. Стійкість до завад:

$$(S/N)_{eff} = S / (N + N_{\varphi}),$$

де N_{φ} — еквівалентна шумова потужність, внесена фазовими флуктуаціями.

Етап 4. Алгоритм оцінки:

Крок 1. Задати номінальну напругу $U_{ном}$ та діапазон відхилень ΔU .

Крок 2. Визначити параметри генератора: K_v , смугу утримання PLL ($\Delta\omega_{hold}$), час інтеграції T .

Крок 3. Обчислити σ_{φ} для кожного рівня нестабільності живлення.

Крок 4. Побудувати залежності: $\sigma_{\varphi}(\Delta U)$, $P_{slip}(\Delta U)$, $\text{BER}(\Delta U)$.

Крок 5. Визначити допустимий рівень нестабільності напруги $\Delta U_{доп}$, при якому $\sigma_{\varphi} < \sigma_{\varphi\max}$.

Етап 5. Результат методики

Вихід: гранична точність роботи стабілізатора напруги, що забезпечує потрібний рівень фазової стабільності.

Формально:

$$\Delta U_{доп} \leq \sigma_{\varphi\max} / (2\pi \cdot K_v \cdot T).$$

Отже, дана методика дозволяє кількісно оцінити вплив стабілізатора напруги на фазову стабільність системи синхронізації через розрахунок фазової похибки, ймовірності зриву синхронізації, BER та ефективного SNR.

Імітаційна модель реалізації методики оцінки впливу точності стабілізаторів напруги на фазову стабільність системи синхронізації

Графічна інтерпретація цієї методики (залежності $\sigma_{\varphi}(\Delta U)$ та $\text{BER}(\Delta U)$) у вигляді MATLAB-моделі (див. скрипт 1) шляхом моделювання представлена на рисунках 8–12.

Скрипт 1 (головний фрагмент). Вплив нестабільності живлення на фазову стабільність

```
%% MATLAB: Power-supply stability → phase stability in PLL
% Extended version: adds bandwidth and Kv sweeps, plus 3D BER surface
% How to run: save as `pll_power_stability_extended.m`, then run.
```

```
clear; clc; close all;
```

```
%% ----- Console summary -----
fprintf('--- Summary ---\n');
for b = 1:numel(Bn_set)
    for k = 1:numel(Kv_set)
        T = 1/(2*pi*Bn_set(b));
        sigma_phi_max = deg2rad(sigma_phi_max_deg);
        DeltaU_allow = sigma_phi_max/(2*pi*Kv_set(k)*T);
        fprintf('Bn=%d Hz, Kv=%0f Hz/V ⇒ ΔU_allow ≈ %.3f%%\n', ...
            Bn_set(b), Kv_set(k), 100*DeltaU_allow);
    end
end
```

Рисунок 8 показує лінійне зростання фазової похибки від нестабільності живлення і межу допустимого відхилення.

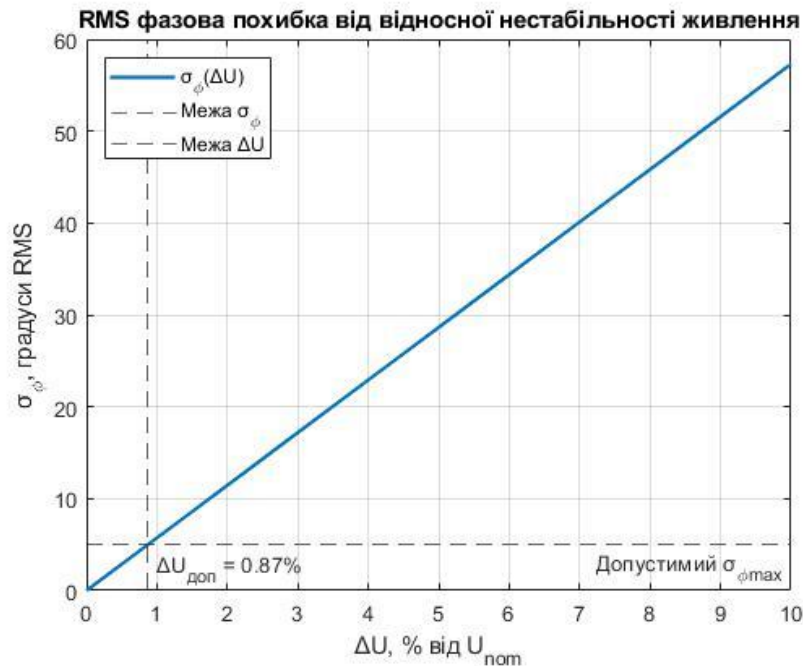
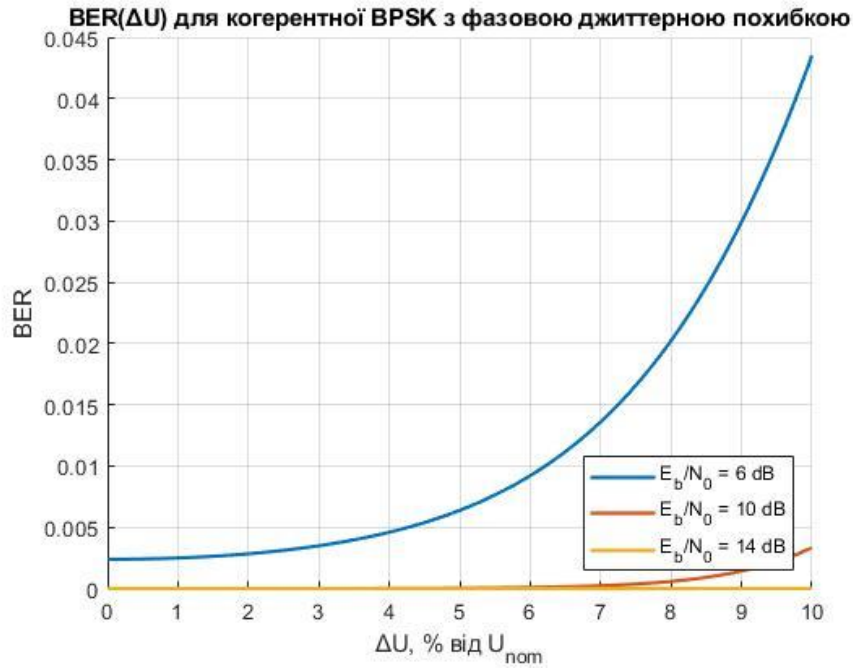


Рис. 8. Графік $\sigma_{\phi}(\Delta U)$ з лініями допусків $\sigma_{\phi,max}(\Delta U)$ і ΔU

Рисунок 9 показує вплив ΔU на BER при різних Eb/N_0 , де більш шумні системи виявляють вищу чутливість.

Рис. 9. Сімейство кривих BER (ΔU) кількох E_b/N_0

На рисунках 10–12 показано вплив ширини смуги PLL на фазову похибку (рис. 10), вплив K_v на фазову похибку (рис. 11), 3D-поверхня BER($\Delta U, E_b/N_0$) для наочного порівняння (рис. 12).

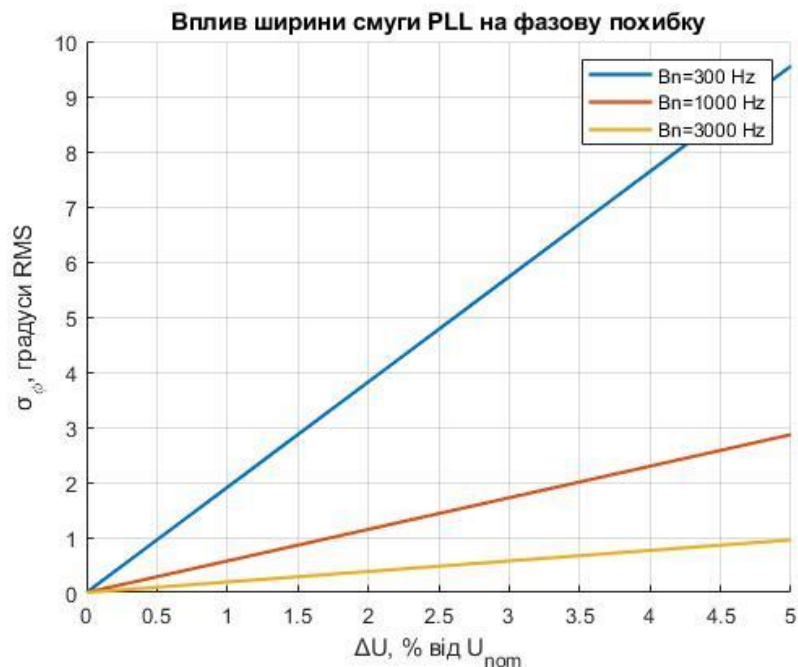


Рис. 10. Вплив ширини смуги PLL на фазову похибку

Графік на рисунку 10 показує, як ширина смуги PLL впливає на чутливість системи до нестабільності живлення. Чим вужча смуга (B_n), тим швидше росте фазова похибка при зростанні ΔU .

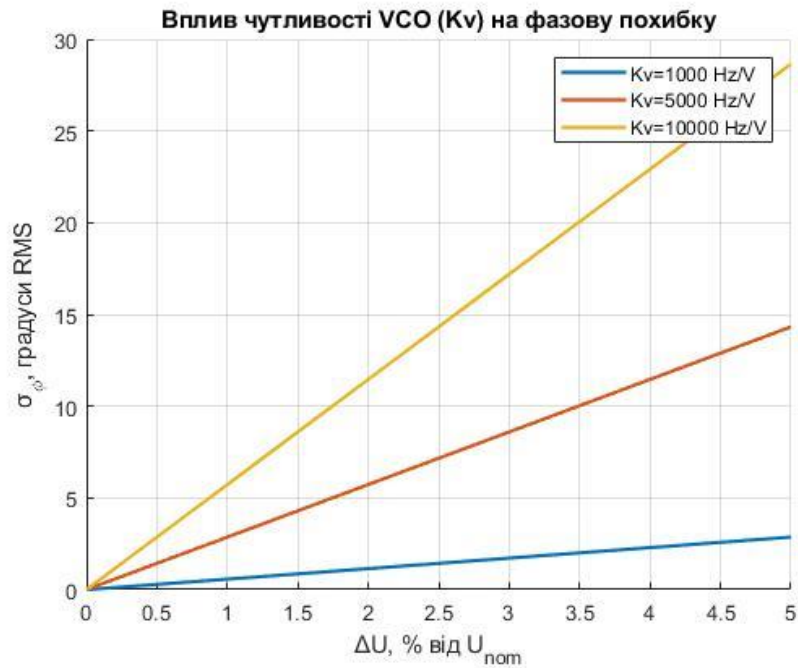


Рис. 11. Вплив K_v на фазову похибку

Графік на рисунку 11 демонструє вплив коефіцієнта чутливості VCO (K_v). При більшому K_v навіть невелика нестабільність живлення спричиняє значну фазову нестабільність.

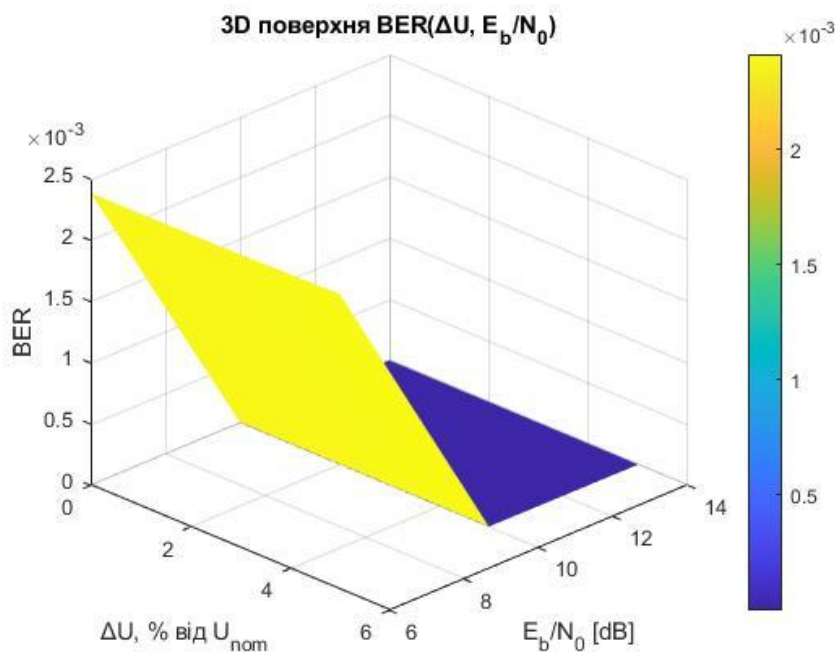


Рис. 12. 3D-поверхня $BER(\Delta U, E_b/N_0)$ для наочного порівняння

Графік на рисунку 12 (3D) дозволяє оцінити одночасний вплив ΔU та E_b/N_0 на BER. Видно, що при високому E_b/N_0 система стійка до ΔU , тоді як при низькому E_b/N_0 навіть малі відхилення живлення істотно погіршують BER.

Аналіз результатів моделювання

У процесі проведеного аналізу встановлено, що точність стабілізаторів напруги має безпосередній вплив на фазову стабільність систем синхронізації:

1. Нестабільність напруги живлення призводить до флуктуацій вихідної частоти генераторів (VCO), що викликає зростання фазового шуму та погіршення характеристик синхронізації.

2. Фазова похибка внаслідок нестабільної роботи стабілізаторів формує помилкову “підлогу” в спектрі фазових флуктуацій, що обмежує граничну чутливість приймачів у високоточних системах.

3. При зростанні амплітуди варіацій напруги спостерігається плато у спектрі фазового шуму, що обмежує ефективність фільтрації за допомогою ПІ-регулятора.

4. Використання високоточних стабілізаторів з малими відхиленнями дозволяє істотно знизити фазову похибку, забезпечуючи підвищення стійкості системи та зменшення ймовірності втрати синхронізації.

5. Практичний висновок: для систем синхронізації з високими вимогами до фазової стабільності необхідно застосовувати високоточні стабілізатори напруги з низьким рівнем шуму, мінімізованим температурним дрейфом та покращеною динамікою регулювання.

Таким чином, забезпечення високої точності стабілізації живлення є ключовою умовою досягнення низького рівня фазових флуктуацій і високої якості синхронізації в сучасних телекомунікаційних системах.

Висновки

1. Розширено підхід до аналізу систем синхронізації в когнітивному радіо — вперше одночасно враховано вплив похибок фазової та тактової синхронізації на достовірність прийнятих повідомлень у когерентних приймачах.

2. Розроблено імітаційну модель фазової петлі з ПІ-фільтром, яка дозволяє оцінювати вплив фазових шумів та нестабільності напруги живлення опорних генераторів на параметри синхронізації.

3. Отримано залежності спектральної щільності фазової помилки та передаточної функції від шуму живлення до фазової помилки, що дозволяє кількісно оцінити механізм проникнення нестабільності живлення в частотні характеристики PLL.

4. Запропоновано підхід до оцінки інтегральної (RMS) фазової помилки у заданій смузі частот як узагальненого показника завадостійкості систем синхронізації когнітивного радіо.

5. Проведено чисельне порівняння впливу параметрів ПІ-фільтра (T_i , K_f) на якість роботи PLL та стійкість системи до шумів живлення, що поглиблює методику оптимізації параметрів синхронізаторів.

6. Запропоновано новий підхід до кількісної оцінки впливу нестабільності стабілізаторів живлення на фазову стабільність систем синхронізації.

7. Вперше враховано взаємозв'язок між відносним відхиленням напруги живлення (ΔU), параметрами PLL (ширина смуги захоплення, коефіцієнт чутливості VCO) та показниками якості приймання (σ_ϕ , BER).

8. Розроблено MATLAB-модель, яка дозволяє проводити віртуальні експерименти та визначати допустимі межі нестабільності живлення з урахуванням конкретних параметрів PLL та VCO.

9. Отримано нові аналітичні залежності, що дозволяють прогнозувати деградацію BER залежно від ΔU та E_b/N_0 , що раніше не розглядалося у відомих методиках оцінки.

10. Методика забезпечує науково обґрунтовану основу для оптимізації вимог до стабілізаторів живлення у високоточних приймальних пристроях.

Напрямки подальших наукових досліджень

Подальші наукові дослідження доцільно зосередити на кількох взаємопов'язаних аспектах.

По-перше, перспективним є поглиблений аналіз впливу фазових шумів у багатоканальних когнітивних приймачах, де додаткову роль відіграють взаємні завади між каналами. Це дозволить уточнити вимоги до архітектури синхронізаторів у системах з динамічним розподілом спектра.

По-друге, актуальним є дослідження впливу нестабільності джерел живлення у широкому діапазоні частот та режимів навантаження на характеристики PLL у когнітивних системах. Зокрема, важливо визначити критичні рівні коливань живлення, які призводять до втрати когерентності прийому.

По-третє, необхідною є оптимізація параметрів ПІ-фільтра фазової петлі з використанням багатокритеріальних методів (генетичні алгоритми, алгоритм рою частинок тощо), що дасть змогу забезпечити компроміс між швидкістю та стійкістю системи до внутрішніх шумів і нестабільності живлення.

Подальший розвиток також передбачає моделювання інтегрованого впливу фазових шумів, температурних факторів і коливань напруги живлення, що дозволить створити комплексну модель стійкості синхронізації у реальних умовах експлуатації. Важливим напрямом є дослідження кооперативних когнітивних систем синхронізації, де завдяки розподіленій обробці сигналів можливе часткове компенсування фазових зсувів і похибок тактової синхронізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gardner F. M. *Phaselock Techniques*. 3rd ed. New York: Wiley, 2005. 428 p.
2. Leeson D. B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum // *Proc. IEEE*. 1966. Vol. 54, No. 2. P. 329–330.
3. Lindsey W. C., Chie C. M. A survey of digital phase-locked loops // *Proc. IEEE*. 1981. Vol. 69, No. 4. P. 410–431.
4. Best R. E. *Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2007. 444 p.
5. Razavi B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. New York: McGraw-Hill, 2001. 684 p. (розділи з VCO та фазового шуму).
6. Mitola J., Maguire G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal // *IEEE Personal Communications*. 1999. Vol. 6, No. 4. P. 13–18.
7. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2005. Vol. 23, No. 2. P. 201–220.
8. Bahl I., Bhartia P. *Microwave Solid State Circuit Design*. 2nd ed. Wiley-Interscience, 2003. 560 p.
9. Mahmoud H. A. et al. Cognitive radios: A survey on software-defined radio and cognitive radio techniques // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2009. Vol. 11, No. 4. P. 2–16.
10. Wu Y., Ling F., Guo Y. Study on the impact of phase noise in cognitive radio synchronization loops // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. 2017. Vol. 64, No. 3. P. 745–758.
11. Бойко Ю. М., Єрьоменко О. І. Аналіз моделей систем синхронізації у цифрових приймачах / Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції. Одеська національна академія зв'язку ім. Попова, 5–10 червня, 2015 р. Одеса. С. 192–194.
12. Бойко Ю. М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій / Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 1. С. 204–213.
13. Анализ систем синхронизации при наличии помех / Б. И. Шахтарин. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 360 с.
14. Туровський О. Л. Мінімізація дисперсії фазової помилки в системах фазової синхронізації замкнутого типу в режимі стеження за несучою частотою / О. Л. Туровський // Вісник інженерної академії. 2019. № 4. С. 22–27.

15. Turovsky O. Combined system of phase synchronization with increased order of astatism in frequency monitoring mode / O. Turovsky, Y. Khlaponin, H. M. Muhi-Aldin et al. // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2616, Session. 1. P. 53–62.
16. Turovsky O. L. Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise / O. L. Turovsky // Technology audit and production reserves. 2020. Vol. 3, No 4. P. 16–22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210242.
17. Стеклов В. К., Щербина І. С. Системи фазового автопідстроювання та синхронно-фазові демодулятори. К.: Техніка, 2006. 288 с.
18. Комбіновані системи фазової автопідстроювання / В. К. Стеклов, А. А. Руденко, О. К. Юдін. К.: Техніка, 2004. 328 с.