

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АУТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ З ЦИФРОВИМ ФАЗОВИМ ДЕТЕКТОРОМ З ПРИСТРОЄМ ФОРМУВАЧА СИГНАЛІВ НЕУЗГОДЖЕНОСТІ І ГОТОВНОСТІ

У статті продемонстровано результати моделювання системи фазового автопідстроювання частоти. На основі моделювання в середовищі Micro - Cap встановлено параметри, які впливають на полосу захоплення системи ФАПЧ та одночасно забезпечують її стійкість при різних формах характеристики фазового детектора. Автори підкреслюють, що побудова систем ФАПЧ у відповідності до запропонованих методів дозволяє істотно підвищити швидкодію та динамічну точність цих систем.

Лебедь Е.В., Радзивилов Г.Д. Имитационная модель системы фазовой автоподстройки частоты с цифровым фазовым детектором с устройством формирователя сигналов рассогласования и готовности. В статье продемонстрированы результаты моделирования системы фазовой автоподстройки частоты. На основе моделирования в среде Micro - Cap установлены параметры, которые влияют на полосу увлечение системы ФАПЧ и одновременно обеспечивают ее стойкость при разных формах характеристики фазового детектора. Авторы подчеркивают, что построение систем ФАПЧ в соответствии с предложенными методами позволяет существенно повысить быстродействие и динамическую точность этих систем.

Y. Lebed, G. Radzivilov Simulation model of the system PLL of frequency with a digital phase detector with the device reshaper of signals disagreement and readiness. The results of design the system PLL are shown in the article. On the basis of design in the environment of Micro - Cap which influence on stripe of fascination the system PLL and simultaneously provide her firmness at the different forms description of phase detector are set. Authors underline that the construction the systems of PLL in accordance with the offered methods allows substantially to promote a fast - acting and dynamic exactness of these systems.

Ключові слова: система ФАПЧ, характеристика ФД, смуга захоплення, смуга утримання.

Вступ. Цифрові системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) широко використовуються в техніці зв'язку і управління, радіоавтоматиці, радіовимірювальних комплексах і інших системах автоматичного регулювання. Показники якості систем ФАПЧ, що застосовуються в різноманітних технічних засобах, значною мірою визначають ефективність та якість зв'язку. Останнім часом набуває вусі більшої актуальності використання в перспективних радіотехнічних комплексах різного призначення (повітряні сили, військово-морські сили) повністю цифрових систем ФАПЧ, які застосовуються для детектування ЧМ, а також для дискретного підстроювання фази в системах передачі з ІКМ [3] і для синхронізації в цифрових мережах. Тому цифрові системи ФАПЧ набувають вусі більш широкого використання у сучасних системах мобільного, супутникового, та транкінгового зв'язку.

При аналізі систем фазового автопідстроювання частоти необхідно проаналізувати не лише величини смуг захоплення і утримання, але і час входу в синхронізм. За відомими значеннями смуги захоплення можна оцінити точність наближених методів розрахунку, придатних при довільних характеристиках фазових детекторів. Фазові детектори забезпечують підвищення стійкості до дії адитивних завад.

Проте вимоги до показників якості системи ФАПЧ безперервно зростають. Тому необхідно покращувати динамічні характеристики систем ФАПЧ, підвищувати основні показники якості цих систем - їх динамічну точність та швидкодію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз в роботах [2 – 10], показує, що визначення точного значення смуги захоплення системи ФАПЧ при різних формах характеристики фазового детектора, можливо, якщо відомий коефіцієнт передачі фазового детектора, характеристики якого реалізуються структурами зі зворотнім зв'язком, які мають високі частотні властивості та стійкість.

Метою роботи є дослідження смуги захоплення системи ФАПЧ при різних формах характеристики фазового детектора, реалізованого схемою зі зворотнім зв'язком та

параметрів, які впливають на полосу захоплення системи ФАПЧ та одночасно забезпечують її стійкість.

Моделювання перехідних процесів системи ФАПЧ з цифровим фазовим детектором

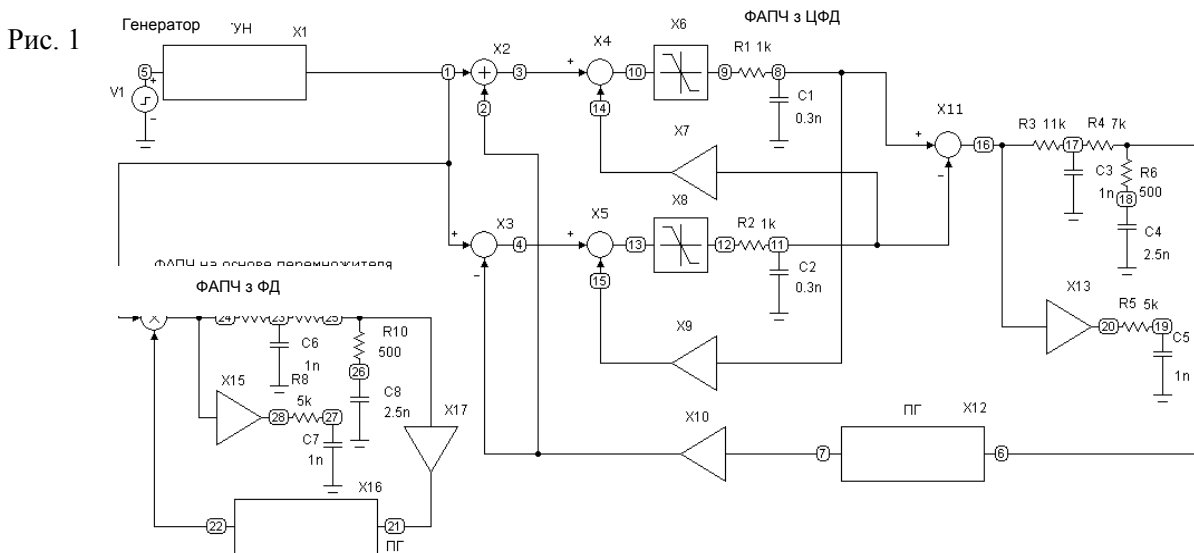
На рис. 1 зображена змодельована система ФАПЧ, що містить структурні схеми вихідної системи ФАПЧ з фазовим детектором (ФАПЧ з ФД) та ФАПЧ з цифровим фазовим детектором з пристроєм формування сигналів неузгодженості і готовності (ФАПЧ з ЦФД) за допомогою пакету моделювання Місго – Сар [1].

Цифровий фазовий детектор з пристроєм формування сигналів неузгодженості і готовності призначений для вимірювання фазової неузгодженості між двома гармонійними сигналами або цифровими імпульсними послідовностями.

Для порівняння результатів одночасно виконаємо моделювання системи ФАПЧ в якості фазового детектора, якої застосований ідеальний перемножувач.

Генератор (рис. 1) формує напругу, яка лінійно змінюється. Блок VCO налаштований на проміжну частоту 465 кГц і має девіацію частоти ± 20 кГц.

Лінійний підсилювач з коефіцієнтом підсилення $K=1$.



Модель системи ФАПЧ

Напруга на виходах ФНЧ системи ФАПЧ з ЦФД (при розімкнених зворотних зв'язках, коли $K = 0$ [2, 3] і системи ФАПЧ з ФД (на входах перебудованих генераторів ПГ), представлена на рис. 2.

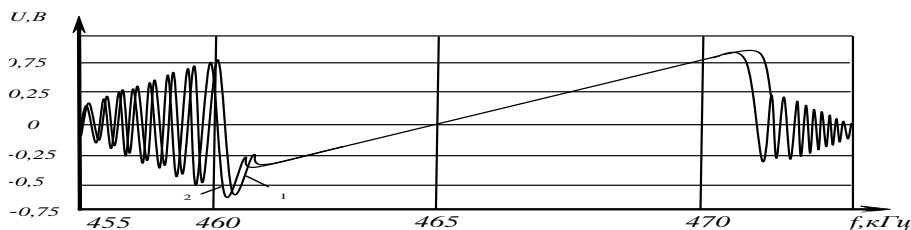


Рис. 2 Напруга на виходах системи: 1. ЦФД 2. ФАПЧ з ФД

У колі зворотного зв'язку ФАПЧ з ФД у вигляді ідеального перемножувача встановлений підсилювач X17 з коефіцієнтом підсилення 1,33. Підсилювач X17 призначений для встановлення однакових коефіцієнтів систем ФАПЧ з ЦФД і ФД. На рис. 3 визначені смуги захоплення і утримання за значенням фазового зсуву, які дозволяють визначити стан системи ФАПЧ.

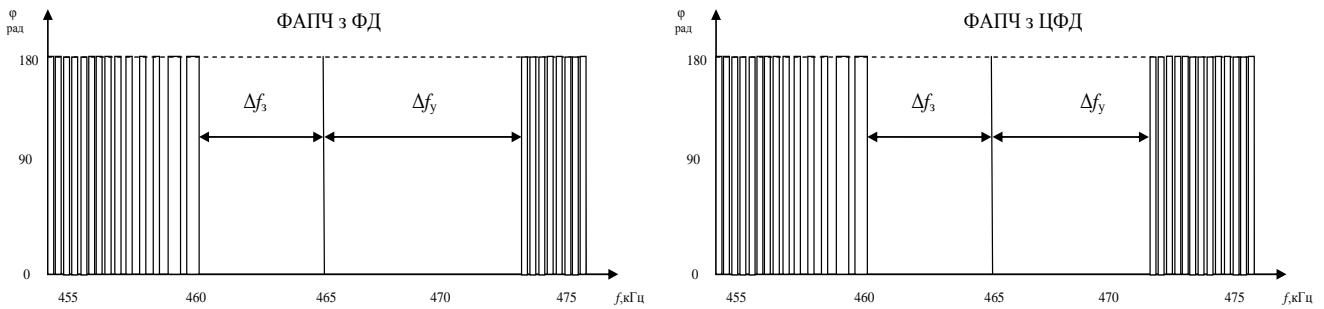


Рис. 3

В результаті математичного моделювання встановлено, що смуги захоплення Δf_z та утримання Δf_y для систем ФАПЧ з ФД і з ЦФД при $K = 0$ відповідно дорівнюють:

ФАПЧ с ФД: $\Delta f_z = 4,58$ кГц; $\Delta f_y = 7,46$ кГц;

ФАПЧ с ЦФД: $\Delta f_z = 4,32$ кГц; $\Delta f_y = 7,18$ кГц.

Результати моделювання дозволяють зробити висновок, що смуги захоплення Δf_z і утримання Δf_y систем ФАПЧ з ФД і з ЦФД при $K = 0$ відрізняються на 5,7 % та 3,8 % відповідно.

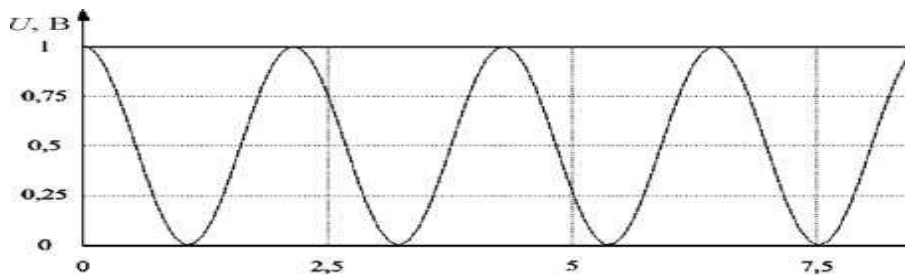


Рис. 4

Модулі спектру вихідної напруги ПГ систем ФАПЧ з ФД і з ЦФД показані на рис. 5.

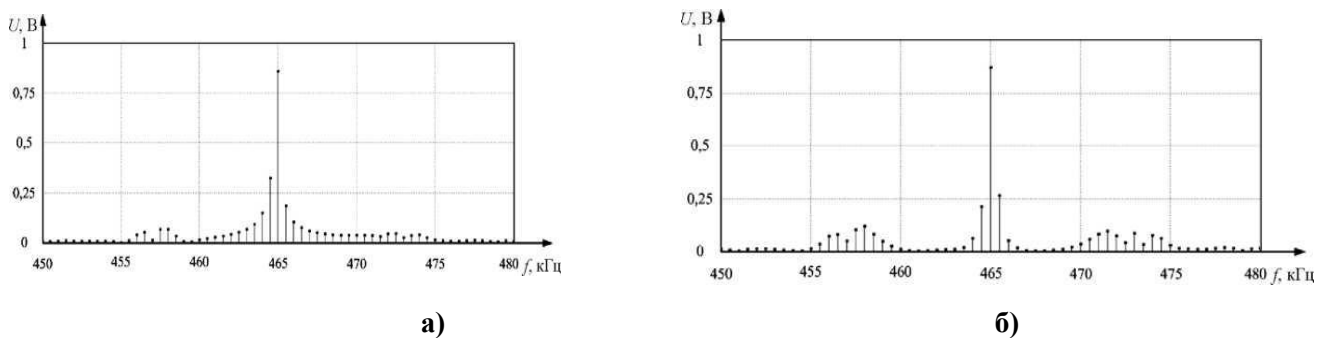


Рис. 5 а) ФАПЧ з ФД; б) ФАПЧ з ЦФД

На рис. 6 – 8 показані напруги на входах ПГ для ФАПЧ з ЦФД при різних значеннях коефіцієнтів зворотного зв'язку $K: 0,2; 0,5; 0,9$.

Аналіз рисунків дозволяє зробити висновок: збільшення K призводить до збільшення смуг захоплення і утримання системи.

В таблиці 1 приведенні значення смуг захоплення та утримання, отриманні при моделюванні для значень коефіцієнта зворотного зв'язку K від 0 до 0,95.

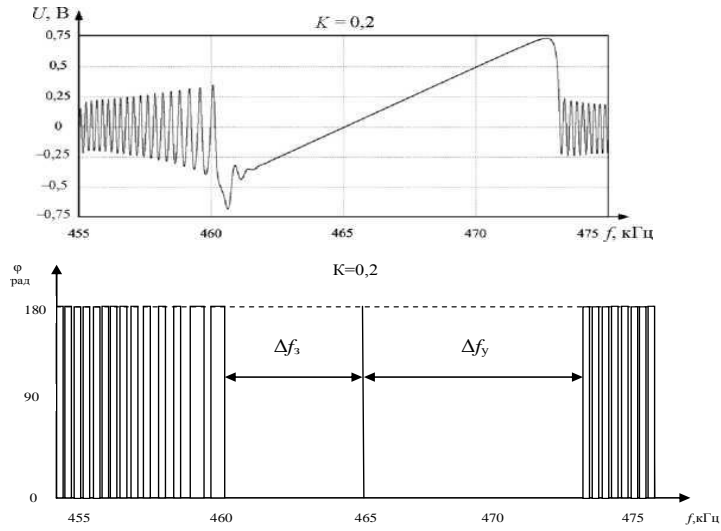


Рис. 6

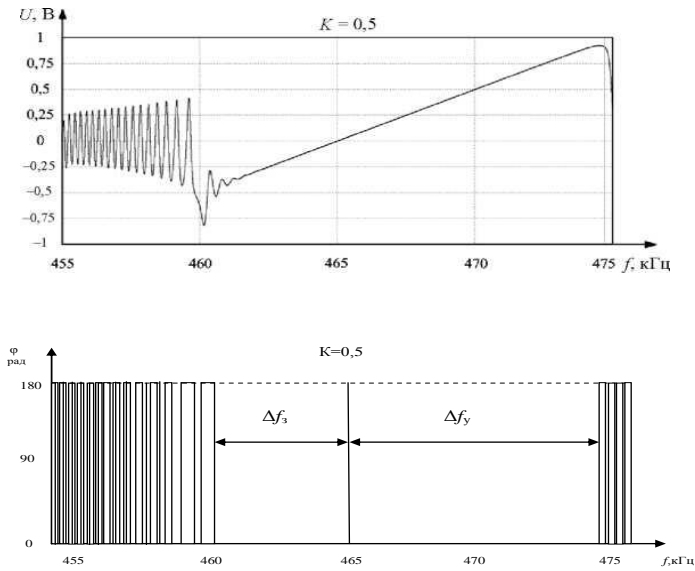


Рис. 7

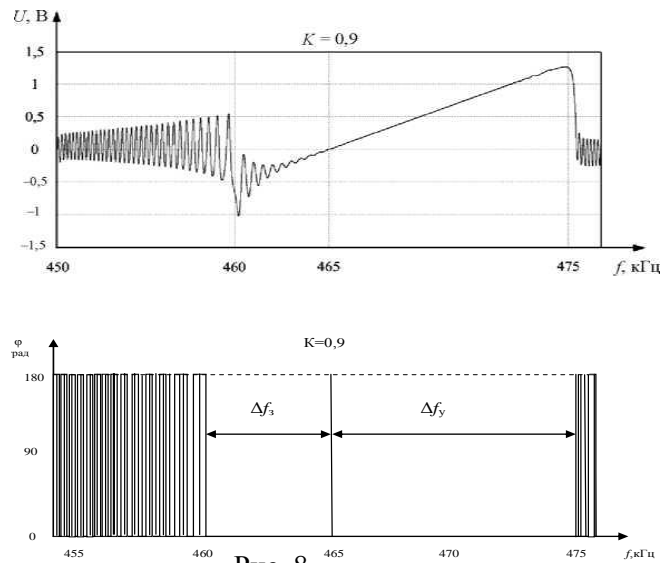


Рис. 8

Δf	ФАПЧ с ФД	ФАПЧ с ЦФД										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
Δf_3 , кГц	4,6	4,3	4,5	4,7	4,8	5	5,1	5,3	5,4	5,5	5,6	5,6
Δf_y , кГц	7,5	7,2	7,4	7,8	8,5	9,3	9,9	10,5	10,9	11,2	11,3	11,3

Графіки залежності ширини смуги захоплення і утримання від величини коефіцієнтів зворотного зв'язку K приведені на рис. 9.

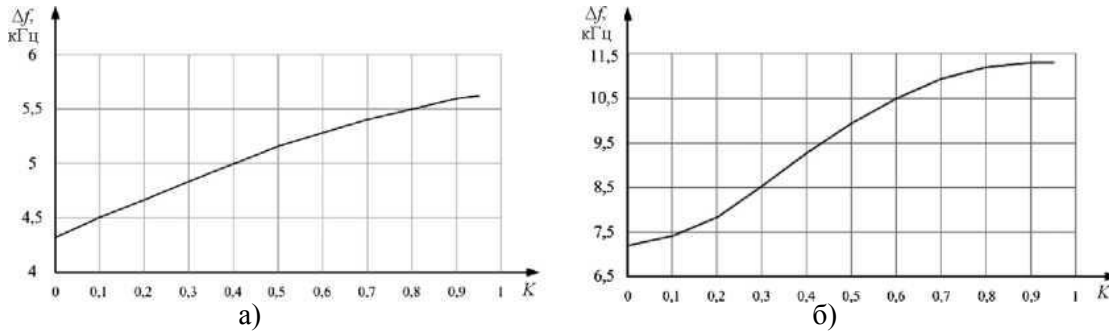


Рис.9 Графіки залежності ширини смуги захоплення та утримання від величини коефіцієнтів зворотного зв'язку а) ФАПЧ з ФД; б) ФАПЧ з ЦФД

При встановленні коефіцієнта зворотних зв'язків в системі ФАПЧ з ЦФД $K=0,9$:

- 1) смуга захоплення збільшується на 30 % в порівнянні з системою ФАПЧ з ФД з нерегульованою характеристикою;
- 2) смуга утримання збільшується на 50 % в порівнянні з системою ФАПЧ з ФД з нерегульованою характеристикою.

При дослідженнях систем ФАПЧ основним питанням, окрім визначення смуги захоплення і утримання, є побудова проєкцій фазових портретів [2, 3] і дослідження характеру перехідного процесу [4 – 7].

На рис. 10 приведені результати моделювання перехідних процесів в системі ФАПЧ при розстроюванні в межах смуги утримання 465 кГц

Аналіз кривих на рис. 10 дозволяє зробити наступні висновки:

- при $0 < K < 1$ перехідний процес носить коливальний характер;
- у системі відсутні процеси аперіодичного і не коливального характеру.

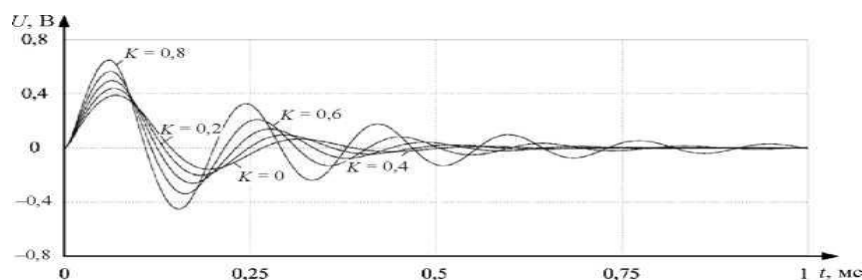


Рис. 10 Перехідні процеси в системі ФАПЧ при різних значеннях K

Характер перехідних процесів на рис. 10 а також дослідження стійкості системи ФАПЧ з ЦФД дозволяє зробити наступні висновки: система ФАПЧ с ЦФД стійка для значень коефіцієнтів зворотного зв'язку $0 < K < 1$.

Проте надмірне підвищення коефіцієнтів підсилення K в колах зворотних зв'язків до значень, що призводять до формування прямокутної характеристики ЦФД, призводить до зникнення стійкості системи ФАПЧ внаслідок виникнення стійкого граничного циклу. На

мал. 11 приведені графіки напруги на вході ПГ для ФАПЧ з ЦФД при $K = 1$, стану системи.

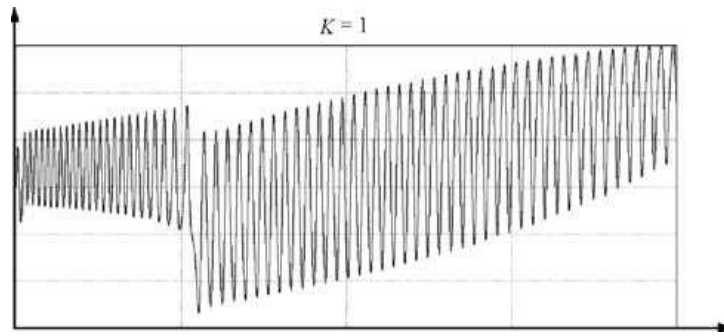
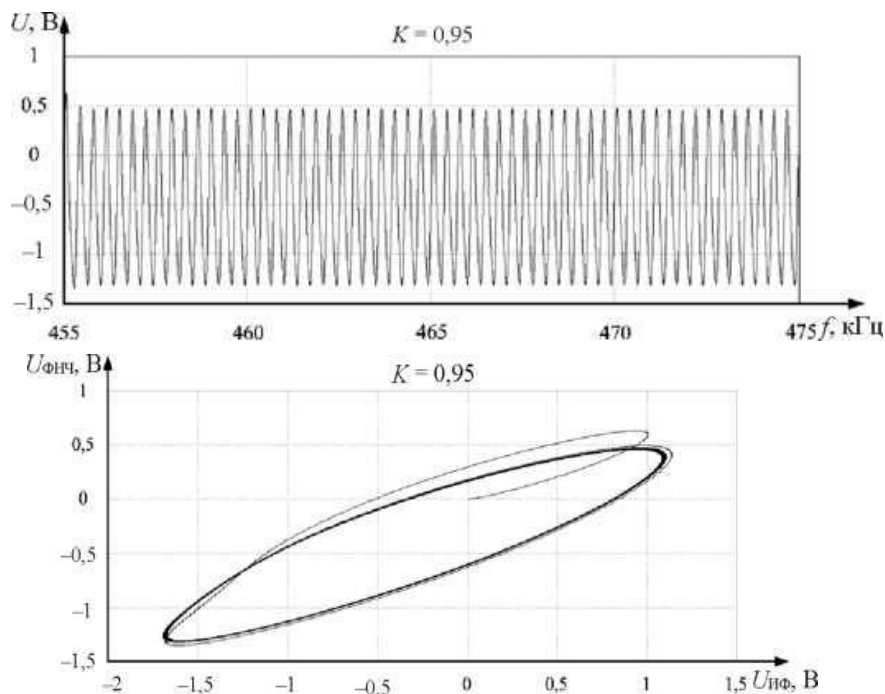


Рис. 11

При зміні частоти опорного генератора (у умовах коли крутизна характеристики ЦФД не змінюється, $K = 0,95$) на частотах, більших смуги утримання, система не стійка. На рис. 12 і 13 приведені осцилограми напруги на вході ПГ і проекції фазового портрета відповідно.



Висновки

У статті продемонстровано імітаційну модель системи фазового автопідстроювання частоти.

На основі моделювання приведені визначення смуги захоплення системи ФАПЧ з різними формами характеристики фазового детектора, яка реалізується схемою зі зворотним зв'язком.

Відповідність отриманих значень показників якості системи ФАПЧ підтверджують можливість підвищення швидкості системи ФАПЧ.

Результати моделювання системи ФАПЧ підтвердили, що параметри які впливають смугу захоплення системи ФАПЧ одночасно забезпечують стійкість, про що свідчать отримані результати:

При встановленні коефіцієнта зворотних зв'язків в системі ФАПЧ з ЦФД $K = 0,9$:

– смуга захоплення збільшується на 30 % в порівнянні з системою ФАПЧ з ФД з нерегульованою характеристикою;

– смуга утримання збільшується на 50 % в порівнянні з системою ФАПЧ з ФД з

нерегульованою характеристикою.

Характер перехідних процесів для дослідження стійкості системи ФАПЧ з ЦФД дозволяє зробити наступні висновки:

– система ФАПЧ с ЦФД стійка для значень коефіцієнтів зворотного зв'язку $0 < K < 1$.

– система ФАПЧ с ЦФД при $K = 0,95$ переходить в нестійкий стан і знаходиться в режимі биття.

Напрямок подальших досліджень визначено розробку універсального алгоритму для побудови системи ФАПЧ, з урахуванням критеріїв мінімуму часу перехідних процесів та середньоквадратичної помилки системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Амелина М.А., Амелин С.А. // Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – с . 464.
2. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. // Системы фазовой автоподстройки частоты. – М.: Связь, 1972. – с . 447.
3. Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е., Сиденков А.С. // Исследование системы ФАПЧ с фазовым дискриминатором с обратными связями – Научный вестник НГТУ том 57, № 4, 2014. – с. 109 – 118.
4. Бондарь П.А. Моделирование и исследование частотных детекторов на основе кольца фазовой автоподстройки частоты // Известия Южного федерального университета – Технические науки № 1 (78), 2008. – с. 36.
5. Радиоприемные устройства : учебник для вузов / Н.Н. Фомин, Н.Н Буга, О.В. Головин [и др.] ; под ред. Н. Н. Фомина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
6. Прокис Дж. Цифровая связь // пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2000. – с. 348.
7. Kay S. Accurate Single Frequency Estimator / S. Kay, A. Fast // IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing. – ASSP-37, 1987 – 1990, Dec. 1989.
8. Стиффлер Дж. Ж. Теория синхронной связи / Дж. Ж. Стиффлер; пер. с англ.-М.: Связь, 1975. – с. 256.
9. Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, А. П. Полоневич, Н. В. Градобоева. Комбинированная система фазовой автоподстройки частоты. Часть 3. Показатели качества системы // Зв'язок №3, 2012. – с. 64 – 68.
10. Dan Talbot, Frequency acquisition techniques for Phase-locked loops, IEEE Press, 2012.