МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний університет залізничного транспорту
Кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів

Розроблення та дослідження системи автоматичного підстроювання частоти потужного генератора

Пояснювальна записка

до випускної кваліфікаційної роботи першого освітнього ступеня «бакалавр»
ВКР 01.25.01.19.ПЗ

Галузь знань –15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність – 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

Виконав:
Студент 4 курсу групи 106-Д21-АКІТ
(роботу виконано самостійно, відповідно до принципів академічної доброчесності)
_____ Максим БЕЖЕНСЬКИЙ

Керівник:
_____ Олександр СОСУНОВ

Рецензент:
_____ Анатолій ЧОПЕНКО

Харків – 2025 р.

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет інформаційно-керуючих систем та технологій

Кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів

Ступінь освіти бакалавр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н., доцент

Василь СОТНИК

« 24 » лютого2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

БЕЖЕНСЬКОМУ МАКСИМУ ОЛЕКСІЙОВИЧУ група 106-АКІТ-Д21

1 **Тема** «Розроблення та дослідження системи автоматичного підстроювання частоти потужного генератора»,

затверджена розпорядженням по факультету інформаційно-керуючих систем та технологій від «24» лютого 2025 року за № 11

2 **Строк подання студентом закінченої роботи** « 6 » червня 2025 р.

3 **Вихідні дані:**

– проміжна частота 10 МГц, частота посилки зондувальних імпульсів 100 Гц;
– генератор метрового діапазону хвиль – вакуумний тріод, спосіб регулювання - за допомогою керуючого елементу на варикапі (постійна часу Т = 0,05 с);
– тривалість зондувального імпульсу – 10 мкс, система АПЧ – статична;
– забезпечити смугу захоплення ± 1,2 МГц, час регулювання 0,8 с, точність автопідстроювання частоти 100 кГц (пріоритет – смуга захоплення).

4 **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)**

Вступна частина:

– титульний аркуш;
– завдання на випускну роботу;
– анотація;
– реферат;
– зміст;
– перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.

Основна частина:

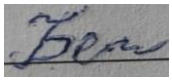
– вступ;
– призначення системи автопідстроювання частоти генератора;
– побудова схеми математичної моделі системи автопідстроювання частоти генератора;
– вибір значень параметрів системи автопідстроювання частоти генератора;
– висновки;
– список використаних джерел.

5 **Перелік графічного матеріалу:**

– назва роботи, назви розділів, автор роботи, керівник – слайд 1;
– призначення системи автопідстроювання частоти генератора – слайди 2-10;
– побудова схеми математичної моделі системи автопідстроювання частоти генератора – слайди 11-14;
– вибір значень параметрів системи автопідстроювання частоти генератора – слайди 15-18.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів
1 Призначення системи автопідстроювання частоти генератора.	17.05.2025
2 Побудова схеми математичної моделі системи автопідстроювання частоти генератора.	24.05.2025
3 Вибір значень параметрів системи автопідстроювання частоти генератора.	31.05.2025

Студент  Максим БЕЖЕНСЬКИЙ

Керівник Олександр СОСУНОВ

Анотація

На підставі функціональної схеми системи автопідстроювання частоти була побудована схема лінеаризованої математичної моделі системи. За її допомогою була проведена попередня оцінка значення загального коефіцієнта підсилення розімкненої системи за вимогами до точності автопідстроювання частоти.

Також була розроблена нелінійна Simulink модель системи автопідстроювання частоти генератора. На підставі дослідження Simulink моделі були обрані значення параметрів системи автопідстроювання частоти генератора, при яких система буде мати стійкість, потрібні ширину смуги захоплення та швидкодію.

Abstract

Based on the functional diagram of the frequency autotuning system, a linearized mathematical model of the system was constructed. With its help, a preliminary estimate of the value of the total gain of the open-loop system was made according to the requirements for the accuracy of frequency autotuning.

A nonlinear Simulink model of the generator frequency autotuning system was also developed. Based on the study of the Simulink model, the values of the generator frequency autotuning system parameters were selected, at which the system will have stability, the required capture bandwidth and speed.

Зміст

Перелік основних скорочень…… 8
Вступ…….. 10
1 Призначення системи автопідстроювання частоти генератора 13
1.1 Аналіз варіантів побудови радіоприймальних пристроїв….. 13
1.2 Деякі особливості супергетеродинного приймача..…….. 18
1.3 Керування частотою електричних коливань генератора за допомогою електричного керуючого елемента на основі варикапа…… 21
1.4 Висновки за розділом……. 23
1.5 Постановка задачі кваліфікаційної роботи……. 24
2 Побудова схеми математичної моделі системи автопідстроювання частоти генератора……. 25
2.1 Функціональна схеми автопідстроювання частоти генератора…… 25
2.2 Побудова схеми математичної моделі змішувача...…… 26
2.3 Побудова схеми математичної моделі підсилювача проміжної частоти…….. 27
2.4 Побудова схеми математичної моделі частотного дискримінатора…….. 28
2.5 Побудова схеми математичної моделі фільтра……... 37
2.6 Побудова схеми математичної моделі підсилювача……... 38
2.7 Побудова схеми математичної моделі керуючого елемента. 38
2.8 Схема математичної моделі системи автопідстроювання

частоти генератора……... 39
2.9 Висновки за розділом……. 43
3 Вибір значень параметрів системи автопідстроювання частоти генератора ……. 44
3.1 Визначення значення загального коефіцієнта підсилення…. 44
3.2 Особливості роботи системи АПЧ генератора при великих відхиленнях частоти сигналу від перехідної частоти частотного дискримінатора……. 49
3.3 Особливості аналізу системи АПЧ генератора як суттєво нелінійної системи керування……. 59
3.4 Розрахунок параметрів частотного дискримінатора на розстроєних контурах……... 63
3.5 Побудова та дослідження Simulink моделі системи автопідстроювання частоти генератора……. 64
3.6 Висновки за розділом…….. 69
Висновки……. 71
Список використаних джерел…….. 73
Додаток……... 75

Вступ

В теперішній час широке застосування отримала супергетеродинна схема побудови радіоприймальних пристроїв. Така схема побудови дозволяють вирішувати завдання необхідної фільтрації відбитих від цілей сигналів, забезпечення заданого підсилення, вирішення проблеми селективності. Крім цього в супергетеродинних приймачах забезпечується простота перестройки частоти, яка досягається завдяки зміні частоти гетеродина та перестройки смуги пропускання коливальної системи преселектора.

В передавальних пристроях в якості автогенератора в метровому діапазоні хвиль часто застосовується ламповий тріод. Однак він має суттєвій недолік – низьку відносну стабільність частоти. Крім цього, при перенастроювані частоти (для захисту від активних завад) точність встановлення частоти складає за порядком величини 0,5 МГц. Внаслідок цього сигнал на проміжної частоті може частково або взагалі не потрапляти в смугу перепускання підсилювача проміжної частоти (ППЧ), який має фіксовану частоту настройки. Це приводить до погіршення точності виміру координат або взагалі до втрати сигналу від повітряних об’єктів.

Для запобігання такого становища використовується спеціальна система автоматичного керування – система автопідстроювання частоти (АПЧ). Ця система підтримує проміжну частоту поблизу частоти настройки ППЧ шляхом керування частотою гетеродина або безпосередньо автогенератора. Таким чином, система АПЧ є фактично системою стабілізації проміжної частоти.

До системи АПЧ висувається низка суперечливих вимог, які важко задовольнити при одноканальній побудові системи. Тому, як правило, таки системи будуються за двоканальною схемою, де перший канал (грубий канал) включається на початку роботи системи АПЧ, а другий канал (точний канал)

включається після закінчення роботи грубого каналу та зменшення частотного розстроювання до смуги захоплення точного каналу.

В роботі розглядається система АПЧ грубого каналу, де об’єктом керування є гетеродин з керуючим елементом на варикапі.

Система АПЧ є суттєво нелінійною системою автоматичного керування. Тому аналітичні методи дослідження таких систем є наближеними та мають обмежену застосовність. Це змушує до пошуку альтернативних методів досліджень. Зараз, в зв’язку з великим прогресом в області цифрової техніки та інформатики, з’явились дуже зручні інструментальні засоби цифрового моделювання. Одним з таких засобів є додаток Simulink пакету Matlab, який найбільш пристосований для моделювання систем автоматичного керування.

Основною перевагою цифрового моделювання над аналітичними методами є можливість дослідження як лінійних так й нелінійних, як дискретних так й неперервних, як цифрових так й імпульсних систем автоматичного керування (САК) на підставі єдиного підходу.

В роботі Simulink модель системи АПЧ використовується для вибору значень параметрів системи АПЧ, щоб забезпечити стійкість системи та необхідні показники якості системи – потрібні ширину смуги захоплення та час регулювання.

Аналітична лінеаризована модель системи АПЧ використовується обмежено тільки для забезпечення потрібної точності підстроювання частоти шляхом визначення належного значення загального коефіцієнта підсилення розімкненої системи.

Кваліфікаційна робота складається з трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

В першому розділі роботи розглядаються варіанти побудови радіоприймальних пристроїв, особливості супергетеродинного приймача. В зв’язку з тим, що в роботі розглядається система АПЧ лампового тріода у варіанті керування частотою гетеродина (грубий канал), то в розділі також

наведена інформація про керування частотою генератора за допомогою керуючого елемента електричного типу на варикапі. Наприкінці розділу приводиться постановка задачі кваліфікаційної роботи.

Другій розділ бакалаврської роботи присвячений побудові лінеаризованої математичної моделі системи АПЧ. Спочатку в розділі розглядається функціональна схема системи АПЧ та принцип її дії. На її підставі будуються лінеаризовані математичні моделі окремих функціональних блоків системи. Математична модель всієї системи АПЧ виходить як об’єднання математичних моделей окремих пристроїв. Наприкінці розділу ця модель перетворюється та коректно спрощується для зручності подальшого використання.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи на підставі лінеаризованої математичної моделі системи АПЧ оцінюється значення загального коефіцієнта підсилення розімкненої системи АПЧ, виходячи з вимоги щодо точності автопідстроювання частоти. Потім приводяться необхідні відомості для аналізу стійкості системи АПЧ як суттєво нелінійної системи автоматичного керування та необхідні відомості о характері роботи системи АПЧ при великих відхиленнях проміжної частоти від перехідної частоти частотного дискримінатора. Для запобігання аналітичних складностей при дослідженні стійкості системи АПЧ, а також для забезпечення потрібної ширини смуги захоплення і швидкодії системи будується Simulink модель системи АПЧ. На підставі дослідження Simulink моделі будуть обрані значення параметрів системи автопідстроювання частоти генератора, при яких система буде мати стійкість, потрібну ширину смуги захоплення та швидкодію.

В висновках формулюються основні результати роботи.

У списку використаних джерел приведені джерела інформації, які були використані при написанні кваліфікаційної роботи.

Висновки

1. Супергетеродинна схема побудови приймачів знайшла широке застосування в усіх діапазонах радіочастот, демонструючи суттєві переваги перед альтернативними схемами.

2. Для підвищення дальності дії радіолокаційних станцій необхідно використовувати потужні генератори НВЧ коливань із високим ККД. У цьому контексті ламповий генератор на вакуумному тріоді є доцільним вибором для РЛС метрового діапазону, оскільки поєднує хорошу потужність та ефективність. Проте він характеризується недостатньою стабільністю частоти.

3. У супергетеродинному приймачі проміжна частота є сталою, а амплітудно-частотна характеристика підсилювача проміжної частоти узгоджена з частотним спектром сигналу. За наявності розбіжностей між проміжною частотою сигналу та частотою налаштування ППЧ спостерігається зниження точності визначення координат цілей або повна втрата сигналу. Щоб уникнути цього, необхідне стабільне керування частотою коливань — зокрема, частотою гетеродина. Через простоту реалізації керування малопотужним генератором доцільно застосовувати систему АПЧ саме до гетеродина.

4. Оскільки система АПЧ генератора є нелінійною, її аналітичний аналіз має обмежене застосування. Тому для точного вибору параметрів поряд із лінеаризованою математичною моделлю була створена та досліджена її Simulink модель.

5. Шляхом дослідження лінеаризованої математичної моделі та Simulink моделі системи АПЧ генератора були вибрані значення параметрів системи, при яких вона буде мати потрібну ширину смуги захоплення, точність автопідстроювання частоти та швидкодію згідно завдання.

6. За результатами роботи можна зробити висновок, що цифрові методи моделювання та дослідження нелінійних систем автоматичного керування за

допомогою сучасних інструментальних засобів дозволяють швидко отримати результат без значних труднощів, які притаманні аналітичним методам. Однак аналітичні методи все ж доповнюють цифрові, бо дозволяють побачити орієнтовні напрямки досліджень та обмежують області пошуку значень параметрів, що вибираються.

Список використаних джерел

1. Єлізаренко А. О. Елементи радіоприймальних пристроїв : Конспект лекцій [Текст] /. А. О. Єлізаренко. – Харків: УкрДУЗТ, 2022. – 43 с.

2. Каганов В.И. Системы автоматического регулирования в передатчиках [Текст] /. В. И. Каганов. – М.: Связь, 1969. – 232 с.

3. Сачук І.І. Основи автоматики і систем керування. Частина 1 [Текст] /. І. І. Сачук, В .Ш. Хісматулін. – Харків: ХУПС, 2005. – 208 с.

4. Хісматулін В.Ш. Системи керування. Частина 2 [Текст] /. В .Ш. Хісматулін. – Харків: ХВУ, 2004. – 123 с.

5. Хісматулін В.Ш. Теорія автоматичного керування. Ч. І. Теорія лінійних неперервних систем автоматичного керування : Підручник для вузів [Текст] / В. Ш. Хісматулін, С. В. Панченко. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – 239 с.

6. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування : Підручник [Текст] / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

7. Ладанюк А.П. Методи сучасної теорії управління : Підручник [Текст] / А. П. Ладанюк, Н. М. Луцька, В. Д. Кишенько, Л. О. Власенко. – К.: Вид-во Ліра-К, 2018. – 368 с.

8. Вагин Ю.В. Частотный дискриминатор радиоприемных устройств [Текст] /. Ю .В. Вагин, А. Г. Ляшенко. – М.: Связь, 1971. – 48 с.

9. Александров Є.Є. Теорія автоматичного керування. Т. 1. Автоматичне керування рухомими об’єктами і технологічними процесами [Текст] / Є. Є. Александров, Є. П. Козлов, Б. І. Кузнєцов. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2002. – 490 с.

10. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування технологічними об’єктами : Навчальний посібник [Текст] / А. П. Ладанюк, К. С. Архангельська, Л. О. Власенко. – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.

11. Корнієнко В.І. Теорія систем керування : Підручник [Текст] / В. І. Корнієнко, О. Ю. Гусєв, О. В. Герасіна, В. П. Щокін. Мін. освіти і науки України, Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.

12. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем [Текст] /. Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. – 550 с.

13. Ковальчук А.О. Типові системи автоматичного керування. Частина 1 Навчальний посібник [Текст] /. А. О. Ковальчук, І. І. Сачук, О. О. Сосунов та ін.. за загальною редакцією О. О. Сосунова. – Х. : ХУПС, 2013. 316 с.

14. Paluszek, M. Practical MATLAB. Deep learning. M. Paluszek, S. Thomas. Apress, 2020. – 252 p.

15. Забара С.С. Моделювання систем у середовищі MATLAB [Текст] / С. С. Забара, О. О. Гагарін, І. М. Кузьменко, Ю. Д. Щербашин. – Київ, 2011. – 137 с.

16. Гурко О.Г. Аналіз і синтез систем автоматичного керування в MATLAB : Навчальний посібник [Текст] / О. Г. Гурко, І. Ф. Єрьоменко. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 286 с.

17. Гоблик Н.М. MATLAB в інженерних розрахунках. Комп’ютерний практикум [Текст] / Н. М. Гоблик, В. В. Гоблик. – Львів: Львівська політехніка, 2020. – 192 с.