

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра радіотехніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

«Магістр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **«Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-19м
напряму підготовки (спеціальності)
спеціальності 172 – Телекомунікації
та радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Садлій Ю. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. РТ

Семенов А. О.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2020 р.

Рецензент: к.т.н., професор каф. ТКСТБ

Бортник Г.Г.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2020 р.

Вінниця ВНТУ - 2020 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет Інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
 Кафедра Радіотехніки
 Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр
 Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., професор О.В. Осадчук

“ 28 ” 09 2020 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Садлію Юрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів»
керівник роботи Семенов Андрій Олександрович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від “25” 09 2020 року №214
2. Строк подання студентом роботи 10 грудня 2020 року
3. Вихідні дані до роботи: діапазон робочих частот 0,01 ... 10 МГц; діапазон вимірювання добротності 0,1 ... 200; діапазон вимірювання характеристичного опору 0.01...10 кОм; зведена похибка вимірювання, не більше 2.0%; час вимірювання, не більше 1 с; споживана потужність, не більше 7 ВА; живлення пристрою має відбуватися від джерела живлення ЕОМ з напругами $\pm 5В$; вид обміну інформацією паралельний; інформаційна ємність даних 8 біт; вид передачі даних неперервний; час готовності до роботи, не більше 1 хв.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вибір методу вимірювання параметрів резонансних контурів; розробка структурної схеми вимірювача та її попередній розрахунок; електричний розрахунок каскадів амплітудно – фазового вимірювача параметрів резонансних контурів; моделювання каскадів пристрою на ЕОМ; конструкторські розрахунки вимірювача; економічна частина, безпека життєдіяльності; висновки; перелік посилань; додатки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схема електрична структурна; схема електрична принципова; креслення друкованої плати; складальне креслення; результати моделювання каскадів вимірювача; амплітудно-фазовий метод вимірювання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Семенов А. О.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доцент Березюк О. В.		
Економічна частина	к.е.н., ст. викл. Кавецький В.В.		

7. Дата видачі завдання 29 вересня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2020-14.09.2020	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2020-21.09.2020	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2020-25.09.2020	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09.2020-09.10.2020	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2020-25.10.2020	
6.	Розділ моделювання	26.10.2020-04.11.2020	
7.	Розробка графічної частини МКР	05.11. 2020-15.11.2020	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	16.11.2020-19.11.2020	
9.	Охорона праці (ОП)	19.11.2020-22.11.2020	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2020-29.11.2020	
11.	Нормоконтроль	30.11.2020-01.12.2020	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2020-04.12.2020	
13.	Захист МКР ЕК	11.12.2020-14.12.2020	

Студент

_____ (підпис)

Садлій Ю. О.

Керівник роботи

_____ (підпис)

Семенов А. О.

РЕФЕРАТ

УДК 621.38

Садлій Ю. О. Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 151 с.

На українській мові. Рис.: 38. Табл.: 24. Бібліогр.: 44 назв.

У даній магістерській кваліфікаційній роботі проведена розробка амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів.

При цьому було проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності розробки, розраховано економічний ефект від розробки та впровадження пристрою у виробництво, розроблено структурну схему, схему електричну принципову, проведено електричні розрахунки та моделювання на ЕОМ окремого блоку амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів, а також розраховано надійність роботи пристрою. Було також розглянуто питання безпеки життєдіяльності при обслуговуванні пристрою.

Розроблено структурні, функціональні та принципові електричні схеми пристрою для дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

В економічній частині МКР були отримані такі результати. Загалом запланована науково-дослідна робота з проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів вимагає грошового вкладення для виконання в межах 164427,78 грн.

В розділі Охорони праці та безпеки у надзвичайних ституаціях було розглянуто такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів вібропоглинання, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, безпека у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: вимірювач, послідовний резонансний контур, паралельний резонансний контур, параметри резонансного контуру, похибка вимірювання, генератор діапазонний, вимірювач відношення амплітуд, вимірювач фазового зсуву.

ABSTRACT

Sadliy Yu.O. Investigation of amplitude-phase methods for measuring the Q-factor of reactive elements of radio-technical oscillatory circuits. Master's qualification work. - Vinnitsa: VNTU, 2020. - 151 c. In Ukrainian language. Figs.: 38. Tables: 24. Refs.: 44 titles.

In the master's qualification work, the carried spent development of a amplitude-phase measuring instrument of parameters of resonant contours.

Thus the feasibility report on expediency of development was carried spent, economic benefit of development and introduction of the device in manufacture is designed, the block diagram, the circuit electric basic is developed, electric calculations and modeling on the COMPUTER of the separate block of a amplitude-phase measuring instrument of parameters of resonant contours are made, and also reliability of work of the device is designed. The safety issue of ability to live also was considered at service of the device.

Structural, functional and basic electrical circuits of a device for measuring the quality factor of a measuring instrument of parameters of resonant contours have been developed.

The following results were obtained in the economic part of the MCR. In general, the planned research work on the study of amplitude-phase methods for measuring the quality factor of reactive elements of radio oscillatory circuits requires a monetary investment to perform within 164427.78 UAH.

The section on labor protection and safety in emergency situations addressed such issues of labor protection and safety in emergencies as technical solutions for occupational health and industrial sanitation, determination of vibration absorption parameters, technical solutions for industrial and fire safety during the amplitude study. phase methods of measuring the quality factor of reactive elements of radio oscillatory circuits, safety in emergency situations.

Keywords: measuring instrument, series resonant contour, parallel resonant contour, parameters of the resonant contour, measuring error, band generator, phase measuring instrument, amplitude measuring instrument.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ВИБІР МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ	13
1.1 Метод вимірювання повної провідності.....	13
1.2 Мостовий метод.....	14
1.3 Метод дискретної лічби.....	17
1.4 Фазовий метод.....	20
1.5 Амплітудно-фазовий метод.....	24
1.6 Аналіз точності амплітудно-фазового методу вимірювання.....	28
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЧА ТА ЇЇ ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК	31
2.1 Розробка структурної схеми амплітудно – фазового вимірювача параметрів резонансних контурів.....	31
2.2 Попередній розрахунок структурної схеми вимірювача параметрів резонансних контурів.....	34
2.3 Розробка уточненої структурної схеми вимірювача параметрів резонансних контурів.....	50
3 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК КАСКАДІВ АМПЛІТУДНО – ФАЗОВОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ	53
3.1 Електричний розрахунок емітерного повторювача.....	53
3.2 Електричний розрахунок двопівперіодного випрямляча.....	61
3.3 Електричний розрахунок згладжувального фільтра.....	66
4 МОДЕЛЮВАННЯ КАСКАДІВ ПРИСТРОЮ НА ЕОМ	69
5 КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ ВИМІРЮВАЧА	73
5.1 Конструктивний розрахунок трансформатора.....	73
5.2 Розрахунок надійності пристрою.....	83
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	87
6.1 Оцінка наукового, технічного та економічного рівня НДДКР.....	87

6.2 Розрахунок витрат на проведення НДДКР з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів	99
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	110
7.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	110
7.2 Промислова та пожежна безпека під час проведення дослідження	117
7.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях	119
7.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи стенду «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів » в умовах надзвичайних ситуацій	124
ВИСНОВКИ	127
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	129
Додаток А (обов'язковий). Технічне завдання	133
Додаток Б (обов'язковий). Схема електрична структурна амплітудно-фазового вимірювача	141
Додаток В (обов'язковий). Схема електрична принципова амплітудно-фазового вимірювача	143
Додаток Д (обов'язковий). Креслення друкованої плати амплітудно-фазового вимірювача	145
Додаток Е (обов'язковий). Складальне креслення амплітудно-фазового вимірювача	147
Додаток Ж (обов'язковий). Результати моделювання каскадів амплітудно-фазового вимірювача	149
Додаток К (обов'язковий) Амплітудно-фазовий метод вимірювання	151

ВСТУП

Актуальність теми.

Науково-технічний прогрес невід’ємно пов’язаний з подальшим вдосконаленням засобів вимірювання, покращенням їх якості та автоматизацією процесу вимірювання, створенням нових засобів та автоматичних приладів в електрорадіовимірвальній техніці, електроніці, автоматичній та телемеханіці [1, 2].

В сучасних радіотехнічних системах та пристроях автоматики дуже широко використовуються резонансні контури (особливо паралельні), які використовуються як елементи радіоприймальних, радіопередавальних, радіовимірвальних, телевізійних пристроїв, а також згладжувальних фільтрів і т.і. Однією з основних характеристик паралельних резонансних контурів, що характеризує їх як якісно, так і кількісно, є добротність [3, 4].

Як відомо, під добротністю резонансного контуру розуміють відношення реактивної енергії до активної (відповідно реактивної потужності до активної або реактивної складової повного опору до його активної складової). Крім того, відношення реактивної складової повного опору резонансного контуру до його активної складової є частиною співвідношення, яке визначає фазочастотну характеристику (ФЧХ) такого пристрою або фазовий зсув вихідного сигналу відносно вхідного, тобто $\varphi_K(\omega) = \frac{\text{Im}\{Z_K(j\omega)\}}{\text{Re}\{Z_K(j\omega)\}}$, де $\text{Im}\{Z_K(j\omega)\}$ та $\text{Re}\{Z_K(j\omega)\}$ – відповідно реактивна та активна складові повного (комплексного) опору резонансного контуру [5, 6].

Аналіз останніх досліджень.

В ідеальних резонансних контурах добротність прямує до нескінченності, смуга пропускання до нуля, а фазовий зсув на резонансній частоті дорівнює нулю. Наявність втрат в обмотках котушок індуктивності та діелектрику конденсаторів призводить до відхилення фазового зсуву на резонансній час-

тоті від нуля, а також до кінцевих значень добротності та смуги пропускання. Величина цих відхилень і є мірою якості резонансних контурів [7, 8].

Серійні вимірювачі параметрів резонансних контурів перекривають діапазон частот 1 кГц ... 300 МГц: Е4-10 (5...1000 кГц), Е4-7 (50 кГц...35 МГц), Е4-11 (30...300 МГц). При цьому діапазон вимірювання добротності 5...1000, а похибка вимірювання не перевищує (6...8)%. Однак при вимірюванні добротності резонансних контурів на низьких частотах виникають значні труднощі. Проведений аналіз методів контролю якості резонансних контурів за величиною добротності показав, що відомі методи майже не придатні для контролю основних параметрів резонансних контурів і не дозволяють в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання цих параметрів (добротності, резонансної частоти, смуги пропускання, коефіцієнту затухання, опору втрат, ємності контуру, індуктивності контуру, характеристичного опору, еквівалентного резонансного опору і т.і.), тому що класичний резонансний метод характеризується значними похибками, а мостовий – досить трудомісткий і майже не підлягає автоматизації [9, 10].

Тому постає задача розробки нових вимірювачів параметрів резонансних контурів, які мають невелику масу, незначну вартість, невелику похибку вимірювання і можуть використовуватися для контролю таких параметрів в широкому діапазоні частот [11, 12].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилася згідно з напрямами дослідження в рамках прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт 32-Д-395 «Розроблення та дослідження радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних приладів фізичних величин для військових та цивільних об'єктів» (номер державної реєстрації 0119U000895), а також у відповідності із планами наукових досліджень по кафедрі радіотехніки Вінницького національного технічного університету на 2019 і 2020 календарні роки.

Метою роботи є розробка амплітудно-фазового методу та засобу для вимірювання параметрів резонансних контурів, що має невелику масу, не-

значну вартість, невелику похибку вимірювання і можуть використовуватися для контролю таких параметрів в широкому діапазоні частот.

Задачами досліджень магістерської кваліфікаційної роботи є:

- провести аналіз сучасних методів вимірювання енергетичних і селективних параметрів і характеристик радіотехнічних резонансних контурів;
- здійснити вибір методу вимірювання енергетичних і селективних параметрів і характеристик радіотехнічних резонансних контурів;
- розробити амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів;
- здійснити моделювання та експериментальне дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

Об'єкт дослідження – процес модельного дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

Предметом дослідження є амплітудно-фазові методи та математичні моделі для вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

Наукова новизна одержаних результатів – полягає в рішенні актуальної науково-технічної задачі удосконалення амплітудно-фазових методів для вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

Практична новизна одержаних результатів – полягає у запропонованому амплітудно-фазовому вимірювачі параметрів резонансних контурів, а також в отриманих нових результатах експериментальних і модельних досліджень добротності та характеристичного опору радіотехнічних коливальних контурів.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції

студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи», 11-30 травня 2019 року, ВНТУ м. Вінниця.

Публікації результатів наукових досліджень. За темою досліджень автором опубліковано 3 статті: 1) у збірнику матеріалів Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи», 11-30 травня 2019 року, м. Вінниця [13]; 2) у збірнику матеріалів III Всеукраїнській науково-практична інтернет-конференція "Інформаційно-комп'ютерні технології: стан, досягнення та перспективи розвитку", 26-27 листопада 2020 р., м. Житомир [14]; 3) III Всеукраїнська науково-технічна конференція "Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення", 26-27 листопада 2020 р., м. Житомир [15].

1 ВИБІР МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ

1.1 Метод вимірювання повної провідності

Схема для вимірювання повних провідностей наведена на рис.1.1. В цьому випадку використовується паралельний вимірювальний контур [2], який складається з робочих елементів та досліджуваного кола. Досліджуване коло розглядається як паралельне з'єднання активної G_X та реактивної B_X провідностей. Для забезпечення збільшення напруги на контурі при резонансі його включають через конденсатор зв'язку.

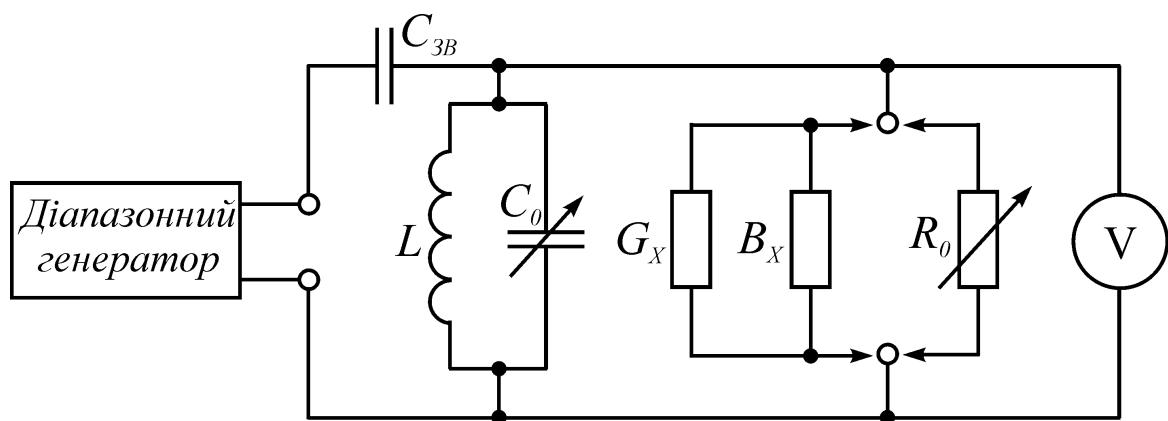


Рисунок 1.1 – Схема для вимірювання повної провідності

Вимірювання проводять таким чином. Встановивши задану частоту генератора f , підключають досліджуване коло та настроюють схему в резонанс зміною ємності робочого конденсатора. При резонансі проводять відлік значення ємності C_{01} та показання вольтметра. Далі замість досліджуваного кола включають робочий резистор R_0 та знову настроюють схему в резонанс зміною ємності робочого конденсатора. Змінюючи опір робочого резистора, досягають попереднього показання вольтметра та проводять відлік значень C_{02} та R_0 . Частота генератора при цих операціях має бути сталою.

Активна складова вимірюваної повної провідності

$$G_X = \frac{1}{R_0}. \quad (1.1)$$

Модуль та знак реактивної складової визначається співвідношенням, що виходять з схеми рис.1.1:

$$B_X = 2\pi f(C_{02} - C_{01}). \quad (1.2)$$

Якщо $C_{02} > C_{01}$, то реактивна складова має ємнісний характер, а еквівалентна ємність $C_X = C_{02} - C_{01}$. Якщо $C_{02} < C_{01}$, то реактивна складова має індуктивний характер. Еквівалентну індуктивність розраховують за формулою

$$L_X = \frac{1}{4\pi^2 f^2 (C_{01} - C_{02})}.$$

Відзначимо, що результати вимірювань та розрахунків визначають параметри еквівалентної схеми досліджуваного кола (в даному випадку – паралельної схеми заміщень), однак не вказують на її конкретну структуру.

1.2 Мостовий метод

Для вимірювання параметрів резонансних контурів використовуються схеми, наведені на рис.1.2. На рис.1.2, а досліджуваний резонансний контур представлений у вигляді послідовного з'єднання активного R_X та реактивного X_X опорів. Розрахункові співвідношення для такої схеми виходять з рівняння рівноваги моста

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (1.3)$$

Для схеми рис.1.2, а опори плечів

$$\begin{cases} Z_1 = R_X \pm jX_X; & Z_2 = R_2, \\ Z_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}; & Z_4 = R_4. \end{cases} \quad (1.4)$$

У цих співвідношеннях індекси відповідають номерам плечей.

Підставивши співвідношення (1.4) до рівня рівноваги моста (1.3) та розділивши в отриманому рівнянні дійсну та уявну частини, приходимо до таких умов рівноваги схеми

$$R_4(R_X \pm jX_X) = R_2 \left(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \right),$$

$$R_X = \frac{R_2 R_3}{R_4}; \quad X_X = \frac{R_2}{\pm jR_4 j\omega C_3} = \frac{R_2}{\mp R_4 \omega C_3} = \mp \frac{R_2}{R_4 \omega C_3}. \quad (1.5)$$

Для мостової схеми, наведеної на рис.1.2, б, рівняння рівноваги запишеться у вигляді

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{Z_4}{Z_3}.$$

Враховуючи, що $\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_X} \pm \frac{1}{jX_X}$, $\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_3} + j\omega C_3$, отримаємо умови рівноваги

$$\frac{\frac{R_2}{\frac{1}{R_X} \pm \frac{1}{jX_X}}}{\frac{R_4}{R_3 + j\omega C_3}} \Rightarrow \frac{R_2}{R_3} + j\omega C_3 R_2 = \frac{R_4}{R_X} \mp j \frac{R_4}{X_X},$$

$$R_X = \frac{R_3 R_4}{R_2}; \quad X_X = \mp \frac{R_4}{\omega C_3 R_2}. \quad (1.6)$$

Схеми, наведені на рис. 1.2, а, б, врівноважують, почергово регулюючи опір та ємність робочих елементів R_3 та C_3 . Для розширення діапазону вимі-

рювань змінюють відношення $\frac{R_4}{R_2}$. При нульовому струмі через індикатор рівноваги (IP) проводять відлік значень R_3 , C_3 та $\frac{R_4}{R_2}$ (або $\frac{R_2}{R_4}$) за шкалами відповідних елементів та обчислюють параметри резонансного контуру. Якщо втрати в резонансному контурі малі, то використовують схему, наведену на рис.1.2, *а*. Для резонансних контурів з великими втратами використовують схему, наведену на рис.1.2, *б*, чутливість якої при збільшенні втрат в резонансному контурі збільшується.

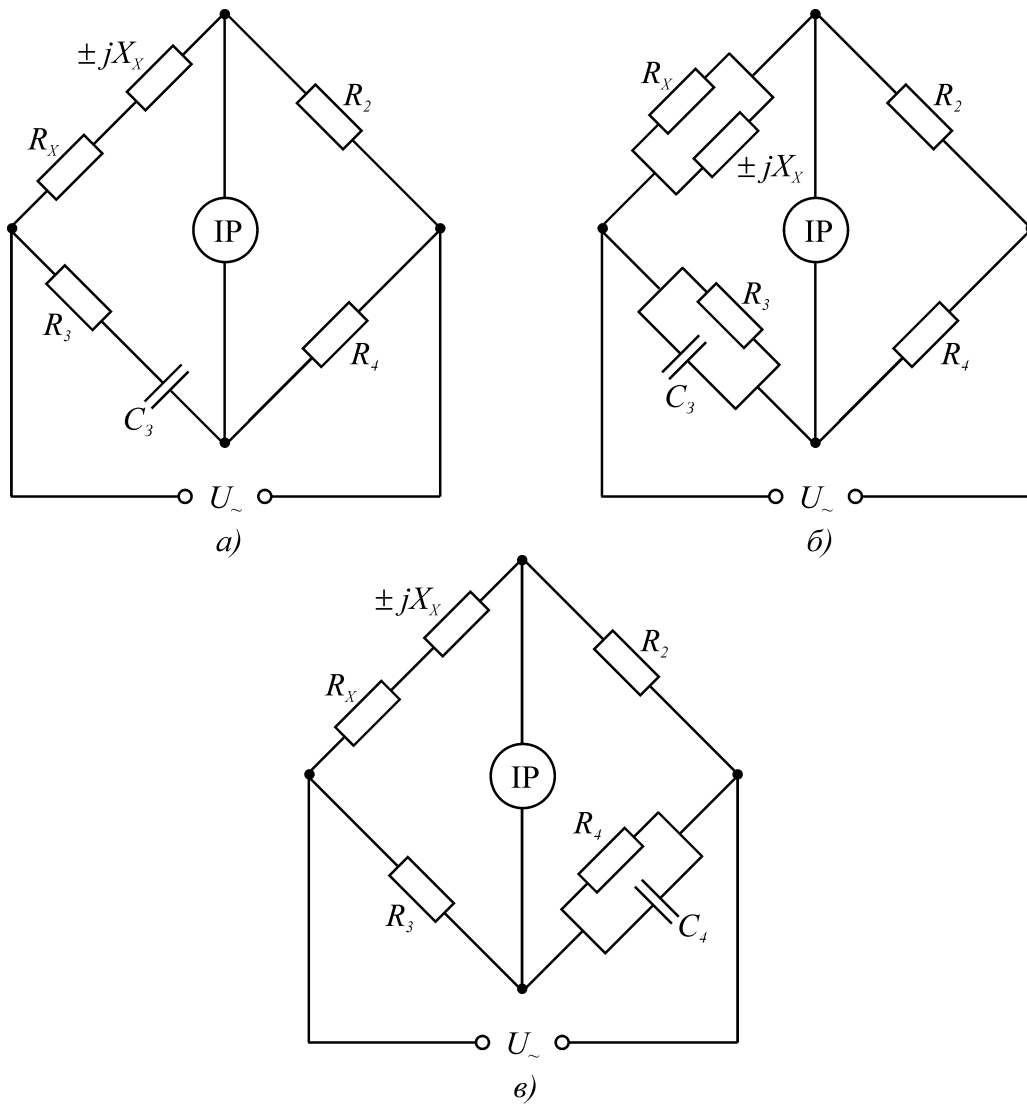


Рисунок 1.2 – Мостові схеми для вимірювання параметрів паралельних резонансних контурів

Для схеми рис.1.2, в рівняння рівноваги моста запишеться таким чином

$$R_X \pm jX_X = \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) R_2 R_3;$$

$$R_X = \frac{R_2 R_3}{R_4}; \quad X_X = \pm R_2 R_3 \omega C_4. \quad (1.7)$$

На практиці міст врівноважують регулюванням робочих параметрів R_4 та C_4 . Зміною добутку $R_2 R_3$ розширюють діапазон вимірювань. Відлік значень R_4 , C_4 та $R_2 R_3$ проводять за шкалами відповідних елементів при нульовому струмі через індикатор рівноваги.

Таку схему використовують для вимірювання низькодобротних резонансних контурів. При збільшенні добротності досліджуваного резонансного контуру збільшується кількість регулювань, необхідних для досягнення стану рівноваги моста.

Для високдобротних резонансних контурів кращі показники має схема з послідовним включенням елементів R_4 та C_4 .

На основі розглянутих схем будують універсальні мости струму. Як правило, такі мости працюють на декількох фіксованих частотах. Для переходу від одного режиму вимірювань до іншого переключають робочі елементи в плечах моста. Прикладом універсального моста може бути прилад Е7-11, який забезпечує вимірювання параметрів радіоелектронних кіл в широких межах.

1.3 Метод дискретної лічби

Метод дискретної лічби при вимірюванні параметрів елементів електрорадіокіл полягає в аналоговому перетворенні вимірюваного параметра в часовий інтервал з наступним його вимірюванням методом дискретної лічби.

Вимірювальне перетворення реалізується на основі як періодичного, так і коливального розряду конденсатора. Однак при вимірюванні параметрів резонансних контурів використовується коливальний розряд конденсатора, тому що перехідний процес в резонансному контурі має коливальний характер.

Коливальний розряд конденсатора використовується в перетворювачі електронно-лічильного вимірювача добротності резонансного контуру: вимірюється час, протягом якого амплітуда згасаючих коливань в резонансному контурі досягне опорного рівня, та підраховується кількість періодів вільних коливань за цей час. Структурна схема такого вимірювача добротності наведена на рис.1.3, а. До початку вимірювань електронний ключ $S1$ знаходиться в положенні 1. Конденсатор C досліджуваного резонансного контуру заряджений до напруги E . Початок вимірювання задається пристроєм керування: електронний ключ переводиться в положення 2, а тригер $D1$ переходить з стану логічного нуля до стану логічної одиниці. В результаті на вході часового селектора $D3$ з'являється напруга дозволу і починається коливальний розряд конденсатора через котушку індуктивності L

$$U_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t\omega_p}{2Q}} \cos(\omega_C t - \psi),$$

$$\text{де } \omega_C = \omega_p \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}; \quad \psi = \arctg \frac{1}{2Q}.$$

Затухаючі коливання з LC - контуру потрапляють на вхід пристрою порівняння після детектора $U1$ та на вхід 2 часового селектора після формування однополярних імпульсів однакової амплітуди тригером $D1$.

Якщо постійна напруга на вході 1 пристрою порівняння перевищує опорний рівень $U_{нор}$, що задається подільником $R1, R2$ та джерелом E , на лічильник $PT1$ подаються лічильні імпульси. Ці імпульси подаються протягом інтервалу τ_X , який можна визначити з співвідношення

$$\frac{U_{\text{пор}}}{E} = e^{-\frac{\tau_x \omega_p}{2Q}} \quad (1.8)$$

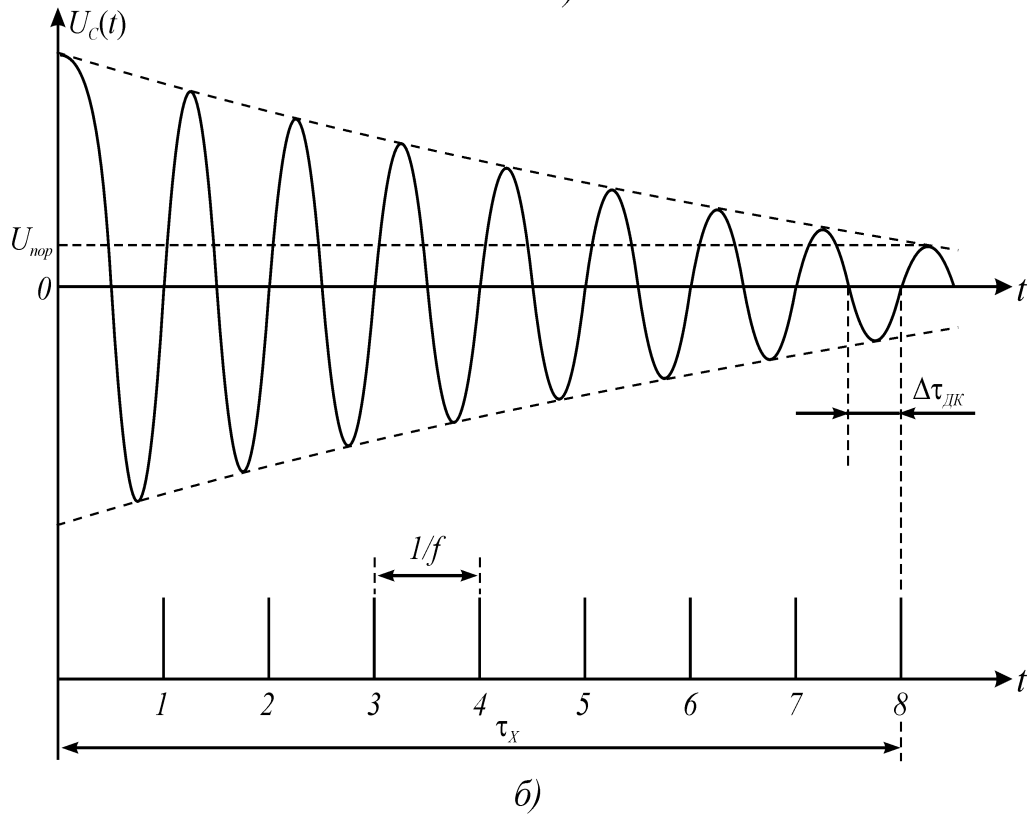
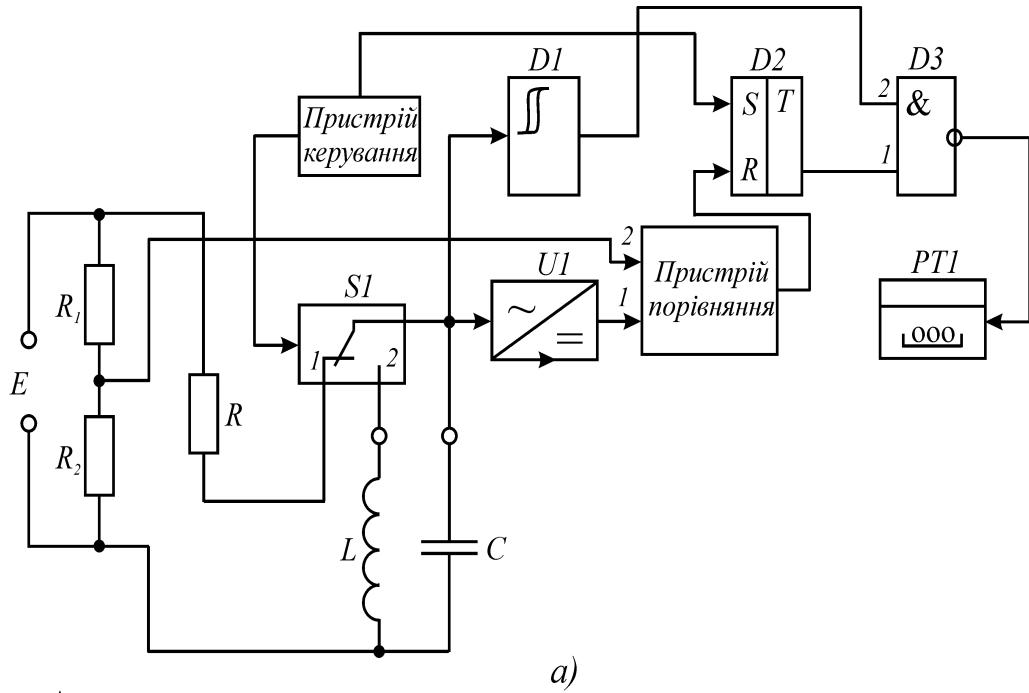


Рисунок 1.3 – Структурна схема вимірювача добротності (а)
та часові діаграми його роботи (б)

Коли $U_C = U_{нор}$, на виході пристрою порівняння з'являється інтервальний імпульс, який переводить тригер $D1$ до стану логічного нуля, і лічба завершується.

Розглянемо часову діаграму рис.1.3, б. Вимірювальний інтервал

$$\tau_X = \frac{N2\pi}{\omega_P} + \Delta\tau_{ДК}, \quad (1.9)$$

де $\Delta\tau_{ДК}$ – похибка дискретності, рівномірно розділена на інтервалі від 0 до $\frac{2\pi}{\omega_P}$. Знехтувавши $\Delta\tau_{ДК}$ та підставивши (1.9) до (1.8), отримаємо

$$\frac{E}{U_{нор}} = e^{\frac{N\pi}{Q}}. \quad (1.10)$$

Якщо $\frac{E}{U_{нор}} = e^\pi$, то рівняння (1.10) буде справедливим при $N = Q$. Та-

ким чином, якщо $U_{нор} = E \cdot e^{-\pi}$, то кількість лічильних імпульсів буде дорівнювати добротності. Похибка вимірювань обумовлена нестабільністю опорного рівня, похибкою дискретності, а також шунтувальною дією кіл формування на досліджуваний контур.

1.4 Фазовий метод

При вимірюванні параметрів резонансних контурів, таких як резонансна частота, добротність, характеристичний опір, смуга пропускання і т.і., виникають значні труднощі. Проведений в п.1.1 ÷ 1.3 аналіз методів вимірювання основних параметрів резонансних контурів за величиною добротності показав, що відомі методи (резонансні, мостові і т.і.) мають значну похибку і не дозволяють в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання. Тому постає задача розробки нових методів вимірювання параметрів резонансних контурів.

Для реалізації фазового методу вимірювання параметрів резонансних контурів необхідно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами – на зразковому елементі та власне резонансному контурі.

Проаналізуємо наявність взаємозв'язку між основними параметрами паралельних резонансних контурів та фазовим зсувом на зразковому елементі та паралельному резонансному контурі.

Для розв'язання поставленої задачі пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (рис.1.4), до складу якого входять зразковий резистор R_0 та власне паралельний резонансний контур, де L , C та $r_K = r_L + r_C$ – відповідно індуктивність, ємність та активний опір паралельного резонансного контуру. Проаналізувавши еквівалентну схему вимірювального перетворювача (рис.1.4), знайдемо комплексні напруги \dot{U}_1 та \dot{U}_2

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_{BX} R_0}{R_0 + \dot{Z}_K} = \frac{U_{BX} R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + \rho Q)^2 + R_0^2 Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{BX} + \operatorname{arctg} Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) - \operatorname{arctg} \frac{R_0 Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q} \right\}}; \quad (1.11)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_{BX} \dot{Z}_K}{R_0 + \dot{Z}_K} = \frac{U_{BX} \rho Q}{\sqrt{(R_0 + \rho Q)^2 + R_0^2 Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{BX} - \operatorname{arctg} \frac{R_0 Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q} \right\}}, \quad (1.12)$$

де $\dot{Z}_K = \frac{\rho Q}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$ – комплексний опір паралельного контуру;

$\dot{U}_{BX} = U_{BX} e^{j\varphi_{BX}}$ – вхідна напруга вимірювального перетворювача в комплексній формі.

Фазовий зсув між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 дорівнює

$$\varphi_1 = \arg\left\{\dot{U}_1\right\} - \arg\left\{\dot{U}_2\right\} = \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) = \arctg Q \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega}. \quad (1.13)$$

З співвідношення (1.13) виходить, що для знаходження добротності вимірювання необхідно проводити на двох частотах, при цьому частоти ω_1 та ω_2 мають знаходитись поблизу резонансної частоти ω_0 для забезпечення ви-

конання умови $-70^\circ \leq \varphi \leq 70^\circ$. Тоді $\operatorname{tg} \varphi_{1.1} = Q \frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega_1}$ та $\operatorname{tg} \varphi_{1.2} = Q \frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega_2}$,

де $\varphi_{1.1}$ та $\varphi_{1.2}$ – відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на частотах ω_1 та ω_2 . Розв'язавши сумісно два останніх рівняння, отримаємо

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}}}, \quad (1.14)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \quad (1.15)$$

Таким чином, для знаходження резонансної частоти ω_0 та добротності Q паралельного резонансного контуру необхідно виміряти значення частот

ω_1 та ω_2 , що знаходяться поблизу резонансної частоти ω_0 , а також значення фазового зсуву між напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на цих частотах.

Далі за співвідношеннями (1.14) та (1.15) можна обчислити значення смуги пропускання $2\Delta\omega$ та коефіцієнт згасання α

$$\alpha = \frac{r}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})}, \quad (1.16)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}}. \quad (1.17)$$

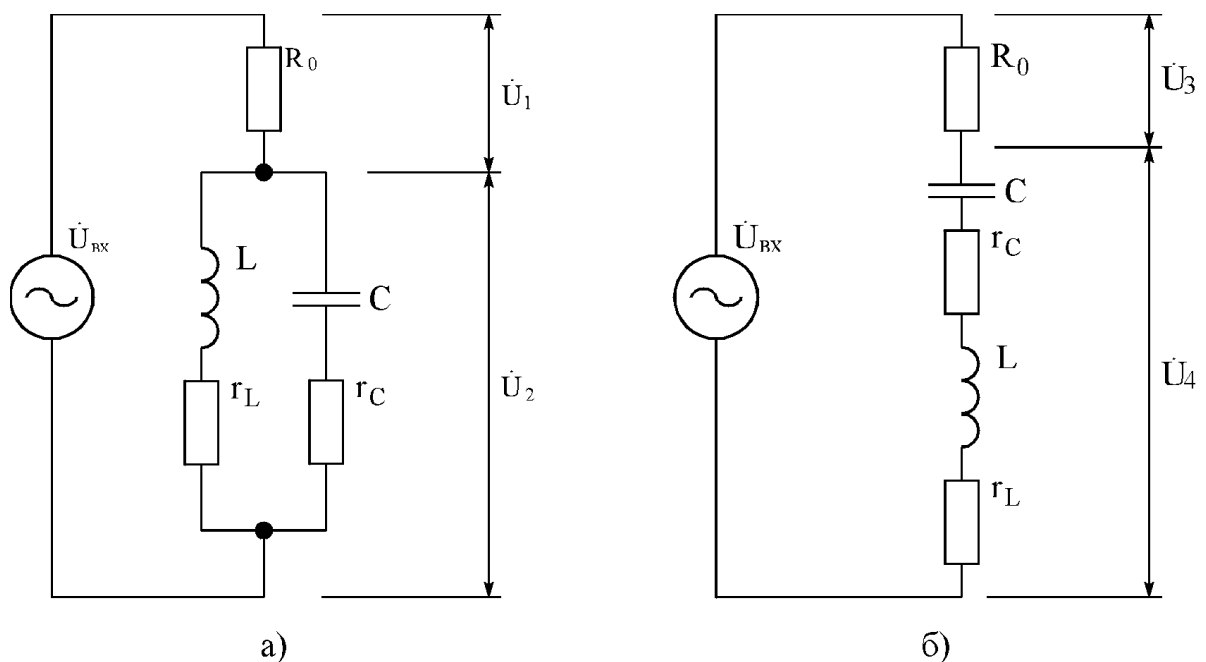


Рисунок 1.4 – Еквівалентна схема вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів паралельних (а) та послідовних (б) резонансних контурів

Однак за допомогою фазового методу вимірювання неможливо виміряти такі параметри, як ємність, індуктивність, характеристичний опір і т.і.

1.5 Амплітудно-фазовий метод

Для реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів резонансних контурів необхідно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами – на деякому зразковому елементі та власне паралельному резонансному контуру, а також вимірювання відношення амплітуд цих напруг.

В цьому випадку також використовується вимірювальний перетворювач (рис. 1.4, а), вихідні напруги якого визначаються співвідношеннями (1.11) та (1.12). Фазовий зсув між цими напругами визначається співвідношенням (1.13), а відношення амплітуд комплексних напруг – співвідношенням

$$A_1 = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} = \frac{\rho Q}{R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}. \quad (1.18)$$

Для того, щоб виміряти такі параметри паралельного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.і., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг \dot{U}_1 та \dot{U}_2 . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті ω_1 , який буде дорівнювати

$$A_{1.1} = \frac{\rho Q}{R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2}} = \frac{\rho Q}{R_0 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{1.1}}} = \frac{\rho Q}{R_0 \sec \varphi_{1.1}} = \frac{\rho Q \cos \varphi_{1.1}}{R_0}. \quad (1.19)$$

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо характеристичний опір ρ , індуктивність L , ємність C , активний опір r_K та еквівалентний резонансний опір R_{EP} паралельного резонансного контуру

$$\rho = \frac{A_{1.1}R_0}{Q \cos \phi_{1.1}} = \frac{A_{1.1}R_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\cos \phi_{1.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \phi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \phi_{1.2})(\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{1.2})}}, \quad (1.20)$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_{1.1}R_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \phi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \phi_{1.2}) \cos \phi_{1.1}}, \quad (1.21)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{(\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{1.2}) \cos \phi_{1.1}}{A_{1.1}R_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}, \quad (1.22)$$

$$r_k = \frac{A_{1.1}R_0}{Q^2 \cos \phi_{1.1}} = \frac{A_{1.1}R_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \phi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \phi_{1.2})(\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{1.2}) \cos \phi_{1.1}}, \quad (1.23)$$

$$R_{EP} = \rho Q = \frac{A_{1.1}R_0}{\cos \phi_{1.1}}. \quad (1.24)$$

Таким чином, знайти основні параметри паралельного резонансного контуру можна, вимірявши фазові зсуви ϕ_1 та ϕ_2 між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на частотах ω_1 і ω_2 та значення цих частот (при цьому значення фазових зсувів на цих частотах за модулем не мають бути більшими 70°), та відношення амплітуд комплексних напруг на частоті, наприклад, ω_1 , тобто A_{11} .

Таким чином, в результаті проведеного аналізу еквівалентної схеми вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів (рис. 1.4, а) отримаємо співвідношення (1.14) ÷ (1.17) та (1.20) ÷ (1.24), за якими можна розрахувати параметри таких контурів.

Аналогічно розглянемо методику вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів. В цьому випадку пропонується використувати вимірювальний перетворювач (рис.1.4, б), до складу якого, як і в попередньому випадку, входять зразковий резистор R_0 та власне послідовний

резонансний контур. Проаналізувавши еквівалентну схему вимірювального перетворювача (рис.1.4, б), знайдемо комплексні напруги \dot{U}_3 та \dot{U}_4

$$\dot{U}_3 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}} R_0}{R_0 + \dot{Z}_{\text{К2}}} = \frac{U_{\text{вх}} R_0}{\sqrt{(R_0 + r_{\text{К}})^2 + \rho^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{\text{вх}} - \arctg \frac{\rho \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + r_{\text{К}}} \right\}}; \quad (1.25)$$

$$\dot{U}_4 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}} \dot{Z}_{\text{К2}}}{R_0 + \dot{Z}_{\text{К2}}} = \frac{U_{\text{вх}} r_{\text{К}} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + r_{\text{К}})^2 + \rho^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{\text{вх}} + \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) - \arctg \frac{\rho \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + r_{\text{К}}} \right\}},$$

де $\dot{Z}_{\text{К2}} = r_{\text{К}} \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]$ – комплексний опір послідовного резонансного контуру.

Фазовий зсув між комплексними напругами \dot{U}_4 та \dot{U}_3 дорівнює

$$\varphi_2 = \arg\{\dot{U}_4\} - \arg\{\dot{U}_3\} = \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \arctg Q \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega}, \quad (1.27)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$A_2 = \frac{|\dot{U}_4|}{|\dot{U}_3|} = \frac{r_{\text{К}}}{R_0} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}. \quad (1.28)$$

Проаналізувавши співвідношення (1.27), можна зробити висновок, що воно повністю аналогічне співвідношенню (1.13), тобто резонансна частота ω_0 та добротність Q послідовного резонансного контуру визначаються такими самими співвідношеннями, що і для паралельного резонансного контуру (формули (1.13) та (1.14)). Однак в формулах (1.13) та (1.14) позначення $\phi_{1.1}$ та $\phi_{1.2}$ потрібно замінити на $\phi_{2.1}$ та $\phi_{2.2}$, де $\phi_{2.1}$ та $\phi_{2.2}$ – відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами \dot{U}_4 та \dot{U}_3 на частотах ω_1 та ω_2 .

Для того, щоб виміряти такі параметри послідовного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.і., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг \dot{U}_4 та \dot{U}_3 . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті ω_1 , який буде дорівнювати

$$A_{2.1} = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2} = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \phi_{2.1}} = \frac{r_K}{R_0} \sec \phi_{2.1} = \frac{r_K}{R_0 \cos \phi_{2.1}}. \quad (1.29)$$

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо активний опір r_K , характеристичний опір ρ , еквівалентний резонансний опір R_{EP} , індуктивність L , ємність C , коефіцієнт затування α і смугу пропускання $2\Delta\omega$ послідовного резонансного контуру

$$r_K = A_{2.1} R_0 \cos \phi_{2.1}, \quad (1.30)$$

$$\rho = r_K Q = \frac{A_{2.1} R_0 \cos \phi_{2.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.2}) (\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}, \quad (1.31)$$

$$R_{EP} = r_K = A_{2.1} R_0 \cos \phi_{2.1}, \quad (1.32)$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_{2.1} R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.2}) \cos \phi_{2.1}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}, \quad (1.33)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{A_{2.1} R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.2}) \cos \phi_{2.1}}, \quad (1.34)$$

$$\alpha = \frac{r_K}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.2})}, \quad (1.35)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.2}}. \quad (1.36)$$

Порівнявши співвідношення (1.16) і (1.17) та (1.35) і (1.36), можна зробити висновок, що коефіцієнт затухання та смуга пропускання для послідовних і паралельних резонансних контурів визначаються однаково. Це пояснюється тим, що послідовні та паралельні резонансні контури описуються однаковими фазочастотними характеристиками.

1.6 Аналіз точності амплітудно-фазового методу вимірювання

Аналізуючи співвідношення, за якими визначаються основні параметри паралельних резонансних контурів за допомогою еквівалентної схеми вимірювального перетворювача (рис.1.4), можна зробити висновок, що точність таких вимірювань залежить від чотирьох факторів: точності зразкового резистора R_0 , точності задавання або вимірювання циклічної частоти генератора вхідного сигналу, точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача, а також точності вимірювання відношення амплітуд вихідних сигналів вимірювального перетворювача.

На сучасній прецизійній елементній базі забезпечення необхідної точності опору R_0 є можливим, тому що існують прецизійні резистори, точність яких складає 0,01% та вище. Тому деяка неточність прецизійного еталонного активного опору R_0 фактично не приводить до виникнення похибки при вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів.

Інший параметр, який впливає на точність вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів – циклічна частота ω вхідної напруги вимірювального перетворювача. Враховуючи, що $\omega = 2\pi f$, частоту f можна виміряти, перетворивши її у часовий інтервал, вимірювання якого здійснюється з дуже високою точністю (для сучасних частотомірів відносна похибка вимірювання не перевищує 0,005%). Отже, точність в даному випадку забезпечується.

Основною проблемою, з точки зору забезпечення точності вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів, є забезпечення точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача та відношення амплітуд цих сигналів.

Проаналізуємо точність вимірювання резонансної частоти та смуги пропускання за співвідношеннями (1.14) та (1.17). Для цих випадків середньоквадратичні відносні похибки вимірювання визначаються такими виразами

$$\begin{aligned} \delta_{\omega_0} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi}\right)^2}}{\omega_0} = \\ &= \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2) \sqrt{\sin^2 2\varphi_1 + \sin^2 2\varphi_2}}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_{\varphi}, \end{aligned} \quad (1.37)$$

$$\delta_{\Delta\omega} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial 2\Delta\omega}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial 2\Delta\omega}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi}\right)^2}}{2\Delta\omega} = \frac{\sqrt{\omega_1^2 \cos^4 \varphi_2 + \omega_2^2 \cos^4 \varphi_1}}{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_{\varphi}, \quad (1.38)$$

де σ_{φ} – середньоквадратичне відхилення середньоквадратичної похибки вимірювання кута фазового зсуву електронним фазометром.

На основі розробленого вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів в роботі необхідно розробити структурну схему амплітудно-фазового вимірювача.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЧА ТА ЇЇ ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК

2.1 Розробка структурної схеми амплітудно – фазового вимірювача параметрів резонансних контурів

Проведений в розділі 1 аналіз методів вимірювання основних параметрів резонансних контурів за величиною добротності показав, що відомі методи (резонансні, мостові і т.і.) мають значну похибку і не дозволяють в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання. Фазовий метод вимірювання (див. п.1.4) не дає можливості виміряти такі параметри резонансного контуру, як ємність, індуктивність, характеристичний опір і т.і.

Таким чином, необхідно підвищити точність вимірювання параметрів резонансного контуру шляхом роздільного вимірювання фазового зсуву між напругою на резонансному контурі та напругою на фазовому опорі, а також відношення амплітуд цих напруг.

Поставлена задача досягається при використанні вимірювального перетворювача, еквівалентна схема якого наведена на рис.1.4. При такій побудові вимірювального перетворювача основні параметри паралельного резонансного контуру визначаються такими співвідношеннями:

– резонансна частота

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2)}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2}},$$

– добротність

$$Q = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

– коефіцієнт затухання

$$\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)},$$

– смуга пропускання

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2},$$

– характеристичний опір

$$\rho = \frac{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\cos \varphi_1 \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}},$$

– індуктивність

$$L = \frac{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1},$$

– ємність

$$C = \frac{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)},$$

– активний опір витрат

$$r_K = \frac{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1},$$

– еквівалентний резонансний опір контуру

$$R_{EP} = \rho Q = \frac{A_1 R_0}{\cos \varphi_1},$$

де ω_1 та ω_2 – частоти, на яких проводяться вимірювання;

φ_1 та φ_2 – кути фазового зсуву між напругами на паралельному резонансному контурі та зразковому опорі на частотах ω_1 та ω_2 ;

A_1 – відношення амплітуд напруг на частоті ω_1 ;

R_0 – опір зразкового резистора.

Для послідовного резонансного контуру резонансна частота, добротність, коефіцієнт затухання та смуга пропускання визначаються такими самими співвідношеннями, а інші параметри таким чином

$$r_K = A_{2,1} R_0 \cos \phi_{2,1},$$

$$\rho = r_K Q = \frac{A_{2.1} R_0 \cos \phi_{2.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.2}) (\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$R_{EP} = r_K = A_{2.1} R_0 \cos \phi_{2.1},$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_{2.1} R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.2}) \cos \phi_{2.1}}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{A_{2.1} R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \phi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \phi_{2.2}) \cos \phi_{2.1}}.$$

На основі розробленого вимірювального перетворювача для вимірювання параметрів резонансних контурів розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача, наведену на рис. 2.1, в якій використовується запропонований метод вимірювання.

Амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів складається з генератора змінної частоти 1, вимірювального перетворювача (ВП) 2, цифрового частотоміра 3, цифрового фазометра 4, цифрового вимірювача відношення амплітуд 5 і пристрою обчислення та керування (ПОК) 6.

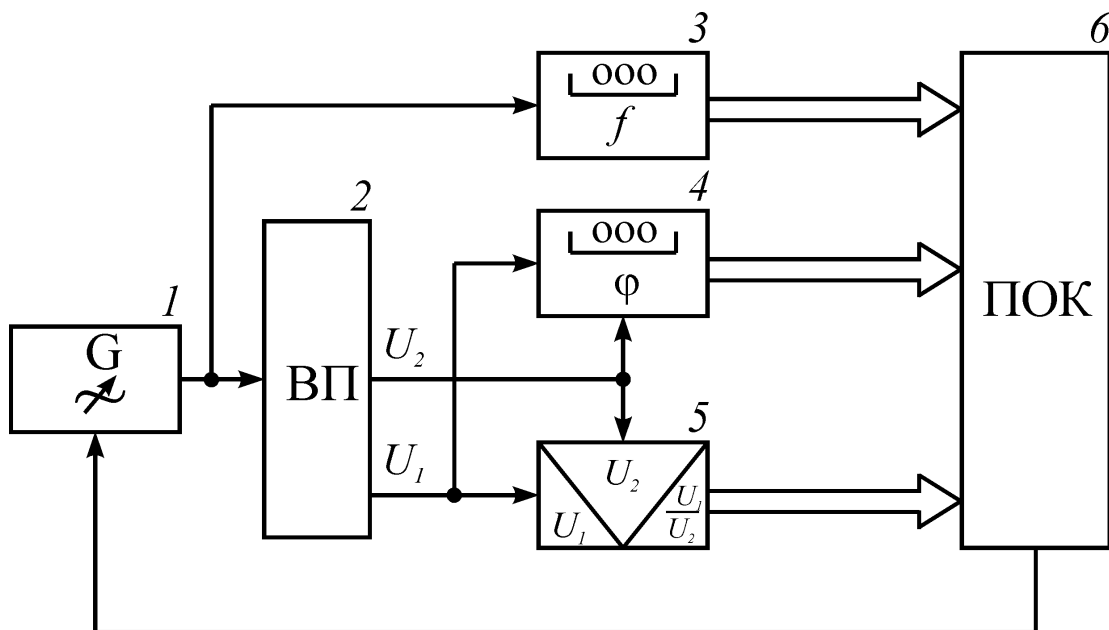


Рисунок 2.1 – Структурна схема амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів

Працює вимірювач таким чином. Генератор змінної частоти 1 виробляє гармонічний сигнал з частотою f_1 (для забезпечення виконання умови $-70^\circ \leq \varphi_{1(2)} \leq 70^\circ$), який потрапляє на вхід вимірювального перетворювача 2. Виходи вимірювального перетворювача підключені до входів цифрового фазометра 4 та цифрового вимірювача відношення амплітуд 5, а вихід генератора змінної частоти підключений до входу цифрового частотоміра 2. Цифровий частотомір вимірює частоту f_1 гармонічного сигналу генератора змінної частоти 1, цифровий фазометр – кут фазового зсуву між напругами U_1 та U_2 (або U_4 та U_3) $\varphi_{1,1}$ (або $\varphi_{2,1}$), а цифровий вимірювач відношення амплітуд – відношення амплітуд цих напруг $A_{1,1}$ (або $A_{2,1}$). Після цього відбувається перестроювання генератора змінної частоти 1 (за сигналом від ПОК 6) і на частоті f_2 цифровий фазометр 4 вимірює кут фазового зсуву $\varphi_{1,2}$ (або $\varphi_{2,2}$) між напругами U_1 та U_2 (або U_4 та U_3), а цифровий частотомір 3 – частоту f_2 гармонічного сигналу генератора змінної частоти 1. Результат вимірювання відношення амплітуд разом з результатами вимірювання частоти та кута фазового зсуву потрапляють на ПОК 6, де і відбувається обчислення результатів вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів. У випадку невиконання умови $-70^\circ \leq \varphi_{1(2)} \leq 70^\circ$ ПОК 6 перестроює генератор змінної частоти 1 для забезпечення її виконання.

2.2 Попередній розрахунок структурної схеми вимірювача параметрів резонансних контурів

Розроблена в п. 2.1 структурна схема амплітудно – фазового вимірювача параметрів резонансних контурів складається з таких основних функціональних вузлів: діапазонного генератора синусоїдальних коливань, вимірювального перетворювача, цифрового фазометра, цифрового вимірювача

відношення амплітуд, пристрою обчислення та керування, а також джерела живлення.

Проведемо попередній розрахунок основних функціональних вузлів структурної схеми вимірювача параметрів резонансних контурів.

2.2.1 Попередній розрахунок функціонального широкодіапазонного генератора гармонічних коливань

На сучасному етапі технічного розвитку багато що з імпоротної елементної бази перестало бути дефіцитом. Тому пропонується діапазонний генератор гармонічних коливань реалізувати на основі мікросхеми MAX 038, призначеної для генерації сигналів різної форми, тому що вона потребує мінімальної кількості навісних елементів.

Частота генерації мікросхеми визначається ємністю конденсатора (від 20 пФ до сотень мікрофард), підключеного до входу COSC, та величиною струму (від 2 до 750 мкА) на вході PIN, тому діапазон генерованих частот лежить від часток герца до 10...20 МГц (рис.2.2). Крім того, частоту можна змінювати в межах $\pm 70\%$ при подачі на вхід FADJ напруги $\pm 2,4$ В. При цьому шпаруватість імпульсів не змінюється. Подачею на вхід DADJ напруги $\pm 2,3$ В можна змінювати шпаруватість від 10 до 1.1, при цьому частота не змінюється.

Вихідний підсилювач мікросхеми забезпечує стабільну амплітуду сигналів різної форми (1 В) при значенні струму навантаження до ± 20 мА.

Таким чином, використовуючи частину мікросхеми MAX 038, на її основі можна реалізувати генератор гармонічних коливань (рис.2.2).

Весь частотний діапазон такого генератора розбито на 4 піддіапазони, в кожному з яких коефіцієнт перекриття за частотою дорівнює 10: “1...10 кГц”, “10...100 кГц”, “0,1...1 МГц” та “1...10 МГц”. Це дозволяє використовувати одну шкалу. Частота в середині піддіапазону плавно змінюється резистором R3, включеним між джерелом опорної напруги REF та входом управління PIN. Вибір піддіапазону реалізується перемикачем SA1, за допомогою якого

на вхід COSC підключається один з конденсаторів C4...C7. За допомогою резистора R7 амплітуду вихідного сигналу генератора (XS1) плавно регулюють від 0 до 1 В. На резисторах R10...R13 зібраний ступінчастий атенюатор, з якого знімають послаблений сигнал з амплітудою 1 мВ, 10 мВ, 100 мВ та 1 В.

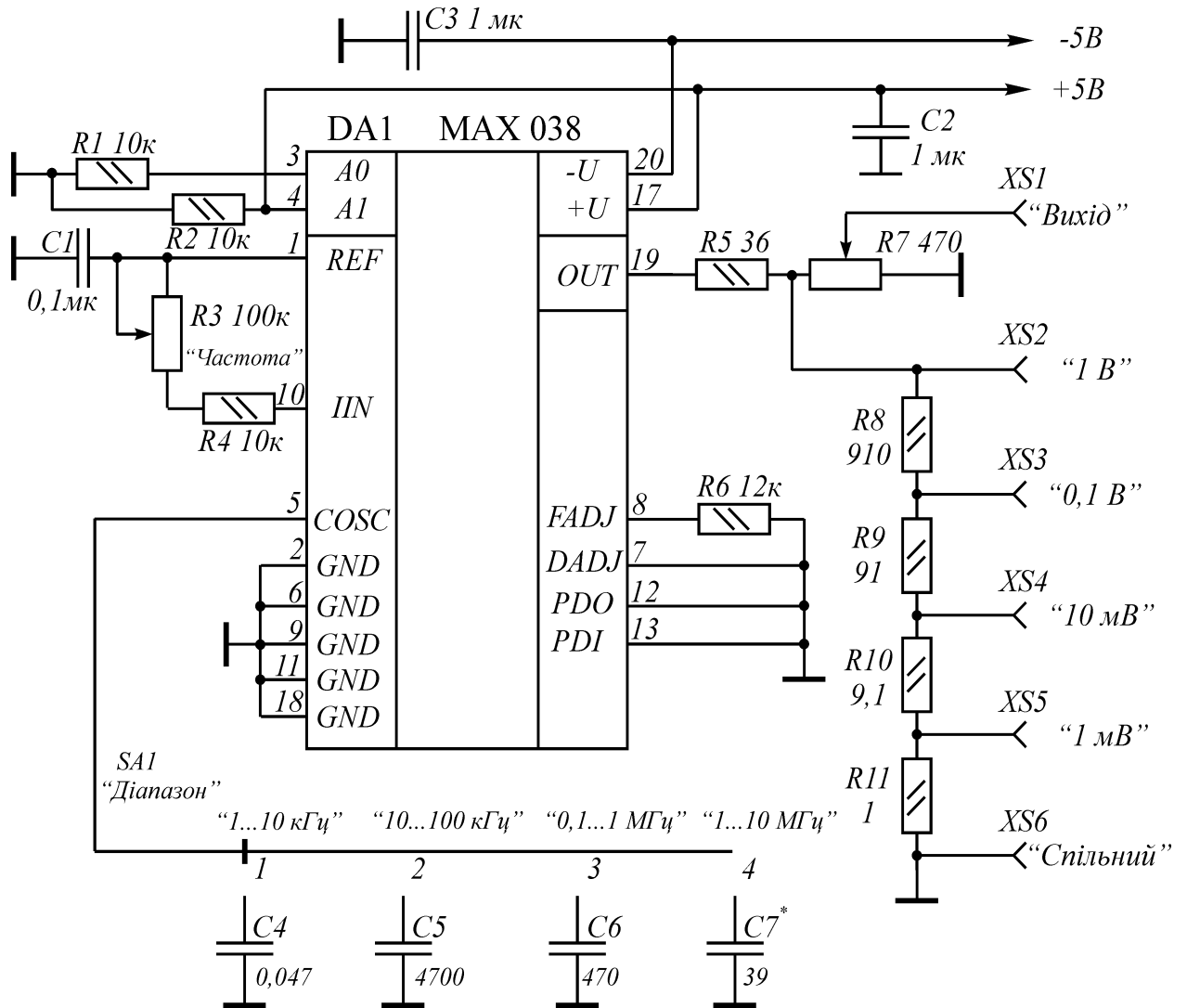


Рисунок 2.2 – Принципова схема генератора гармонічних коливань на мікросхемі MAX 038

Вихідний сигнал синусоїдальної форми має порівняно невеликий коефіцієнт гармонік, але для того, щоб його зменшити, необхідно скористатися схемою симетрування, наведеною на рис.2.3. Живлення генератора реалізо-

вано від двополярного стабілізованого джерела живлення. При цьому споживаний струм в колі $+5\text{ В}$ дорівнює $35\dots40\text{ мА}$, а в колі -5 В – $40\dots45\text{ мА}$.

В генераторі пропонується використовувати змінні резистори СП, СПО або СП4, інші – СП2; конденсатори С1, С2 та С3 – КМ5 або К73 – 9; полярні конденсатори повинні мати малі струми втрат (К52 – 1), а конденсатори С6 та С7 – з малим ТКЄ (КМ – 5, К73 – 9, МБМ, КЛС). Перемикач SA1 – типу ПГ2 або П2К.

Настроювання генератора зводиться до підбору ємності конденсаторів С4÷С7. Для цього необхідно підібрати один з конденсаторів, наприклад С5, та відградувати для нього шкалу, а потім уточнити ємність інших конденсаторів за відповідністю частот піддіапазонів цієї шкали.

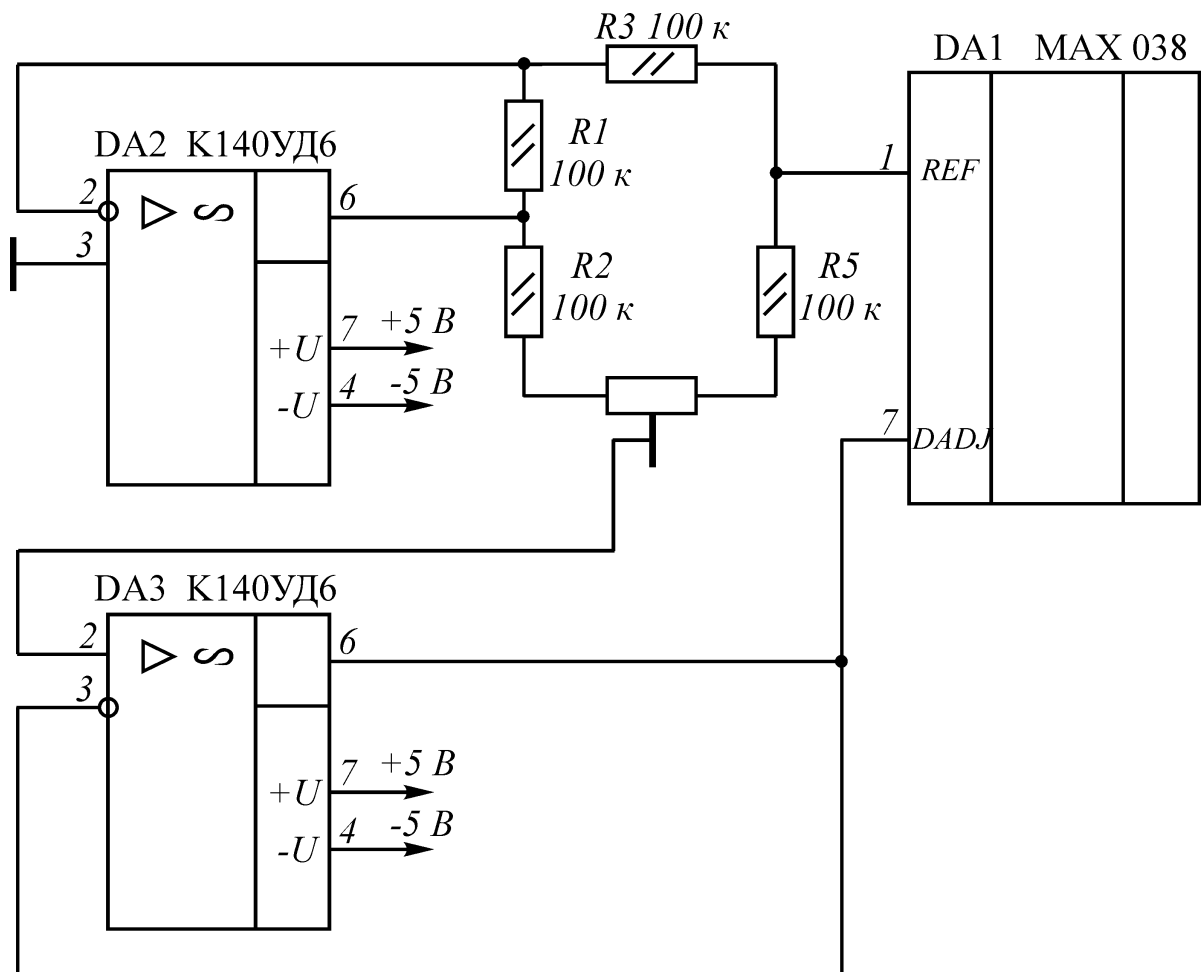


Рисунок 2.3 – Схема симетрування мікросхеми MAX 038 для зменшення коефіцієнта гармонік вихідного сигналу

Основні метрологічні характеристики розробленого генератора:

– діапазон робочих частот, кГц	1...10000
– діапазон вихідної напруги (ефективне значення), В	0,001...1
– коефіцієнт нелінійних спотворень:	
на частоті 100 кГц	0.12%
на краях діапазону	$\leq 0.25\%$
– опір навантаження, Ом	100

2.2.2 Попередній розрахунок вимірювального перетворювача

Вимірювальний перетворювач при амплітудно-фазовому методі вимірювання був проаналізований та розроблений в п.2.5. Для спрощення побудови електричної принципової схеми вихідну напругу генератора змінної частоти подамо на вимірювальний перетворювач через розділовий трансформатор (рис.2.4).

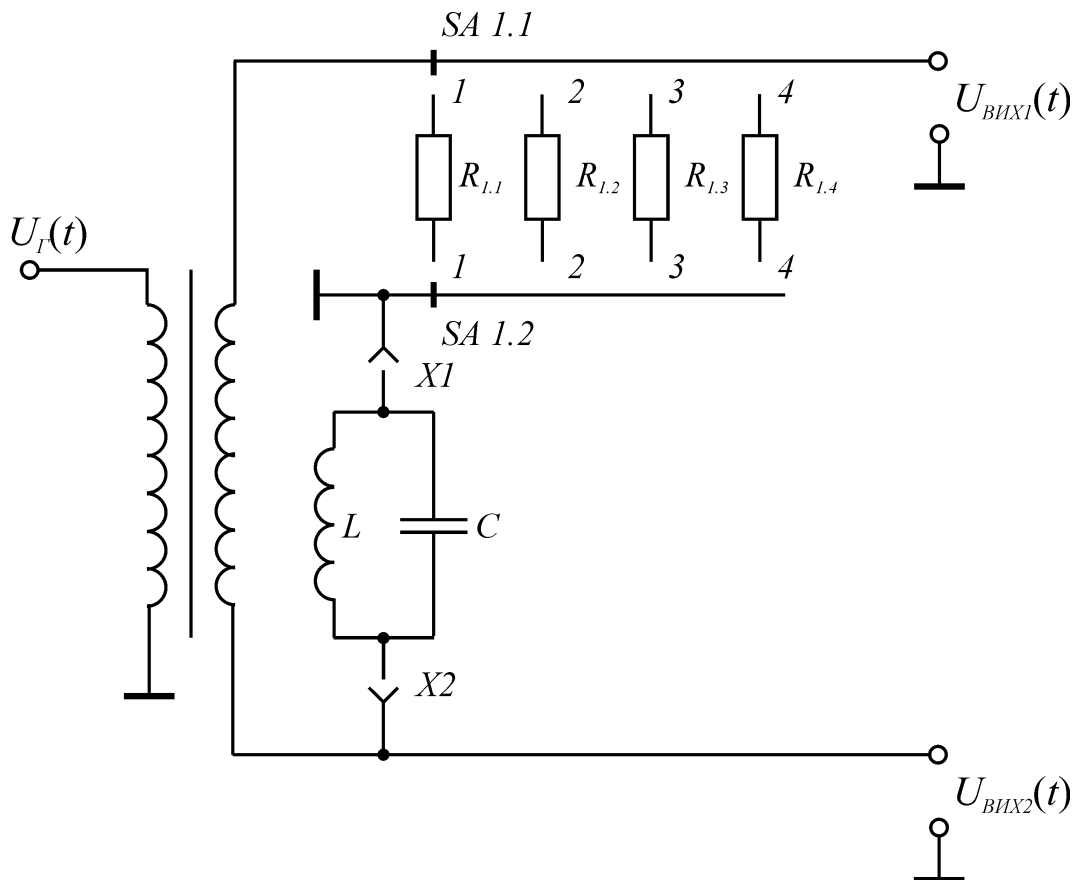


Рисунок 2.4 – Вимірювальний перетворювач для вимірювання параметрів паралельних резонансних контурів

Коефіцієнт трансформації розділового трансформатора має приблизно дорівнювати 1 для більш ефективної передачі вихідної напруги генератора змінної частоти до входу вимірювального перетворювача.

Досліджуваний паралельний резонансний контур, параметри якого необхідно виміряти, підключається до роз'ємів X1 та X2. Для зменшення похибки при вимірюванні необхідно підібрати значення зразкового опору R1 (перемикач SA1). Значення зразкового опору підбирають при настроюванні схеми. Вихідні напруги вимірювального перетворювача $U_{\text{ВИХ1}}(t)$ (на зразковому опорі) та $U_{\text{ВИХ2}}(t)$ (на паралельному резонансному контурі) через узгоджувальні пристрої (емітерні повторювачі) подаються далі на входи вимірювача фазового зсуву та вимірювача амплітуд.

2.2.3 Попередній розрахунок вимірювача відношення амплітуд

Вимірювач відношення амплітуд амплітудно-фазового вимірювача є пристроєм, який проводить вимірювання відношення амплітуд двох гармонічних напруг (на послідовно з'єднаних резонансному контурі та на зразковому опорі) з наступним перетворенням результату вимірювання в цифровий код.

Функціонально вимірювач відношення амплітуд амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів складається з задавального генератора, блоку синхронного випрямлення та АЦП.

Задавальний генератор вимірювача відношення амплітуд (рис.2.5) виконаний на елементах DD1.1 та DD1.2 ІМС К561ЛА7. Він працює на частоті 1 МГц, яка задається резистором R1 та конденсатором C1.

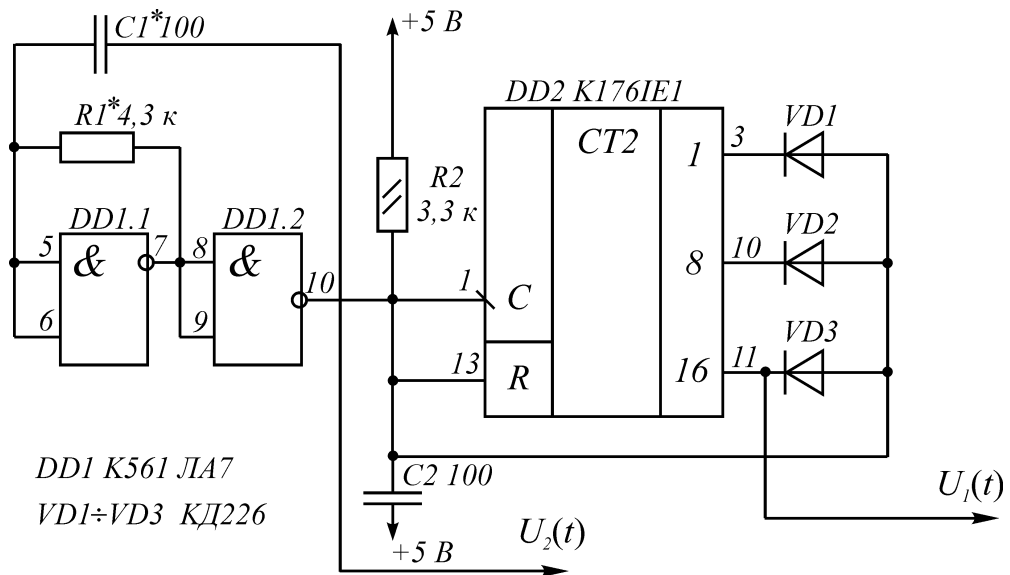


Рисунок 2.5 – Задавальний генератор вимірювача відношення амплітуд

Вихідні напруги вимірювального перетворювача $U_{\text{ВИХ1}}(t)$ та $U_{\text{ВИХ2}}$ (див. рис.2.4) через буферні операційні підсилювачі DA1 та DA2 КР544УД2 подаються на синхронні випрямлячі, реалізовані на ключах DD2.1 та DD2.2 і DD2.3 та DD2.4, а також конденсаторах C1 та C2 і C3 та C4 (рис.2.6). Керування ключів відбувається вихідними імпульсами лічильника DD1 K561IE8, при цьому ключі відкриваються на 1/10 періоду вихідного сигналу операційних підсилювачів. При цьому ключі DD2.2 та DD2.4 відкриваються при позитивній півхвилі вихідної напруги операційних підсилювачів, а ключі DD2.1 та DD2.3 – при негативній півхвилі вихідної напруги. Під час розімкненого стану ключів значення імпульсних напруг запам'ятовуються на конденсаторах C1÷C4 та подаються на вимірювальні входи АЦП. На тактовий вхід 14 лічильника DD1 K561IE8 (рис.2.6) подається імпульсна напруга $U_2(t)$ з виходу 10 мікросхеми DD1.2 K561LA7 (рис.2.5) з частотою 1 МГц.

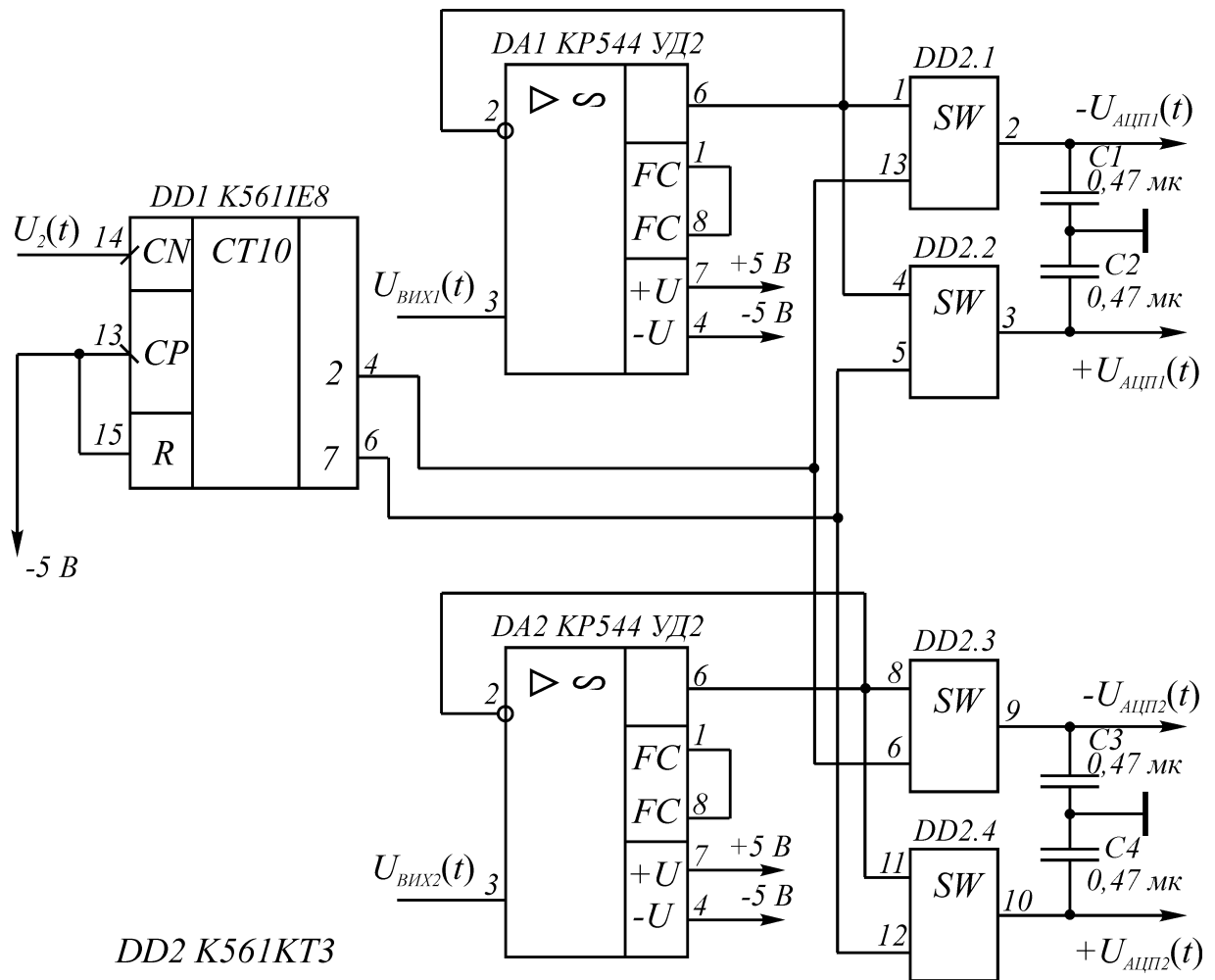


Рисунок 2.6 – Блок синхронного випрямлення вимірювача відношення амплітуд

При вимірюванні параметрів резонансних контурів систематична похибка вимірювання, яка виникає через те, що послідовно з досліджуваним резонансним контуром включений зразковий резистор, буде дуже малою, оскільки в момент відкривання ключів DD2.1 ÷ DD2.4 процес встановлення величини струму через досліджуваний резонансний контур повністю закінчений.

Максимальні значення напруги на конденсаторах C1 ÷ C4, які відповідають максимальним значенням кожного діапазону, складають величину +150 мВ та -150 мВ, а повна напруга, що подається на диференціальні входи АЦП, дорівнює 300 мВ. Двопівперодний характер випрямлення забез-

печує незмінність вихідної напруги випрямляча при зміщенні нуля операційних підсилювачів DA1 та DA2 (рис.2.6).

Включення мікросхеми DD1 К1107ПВ2 (рис.2.7), яка є аналого-цифровим перетворювачем, має деякі особливості. Опорна напруга для такого включення

визначається напругою $U_{\text{ВИХ 1}}(t)$, що знімається зі зразкового резистора вимірювального перетворювача.

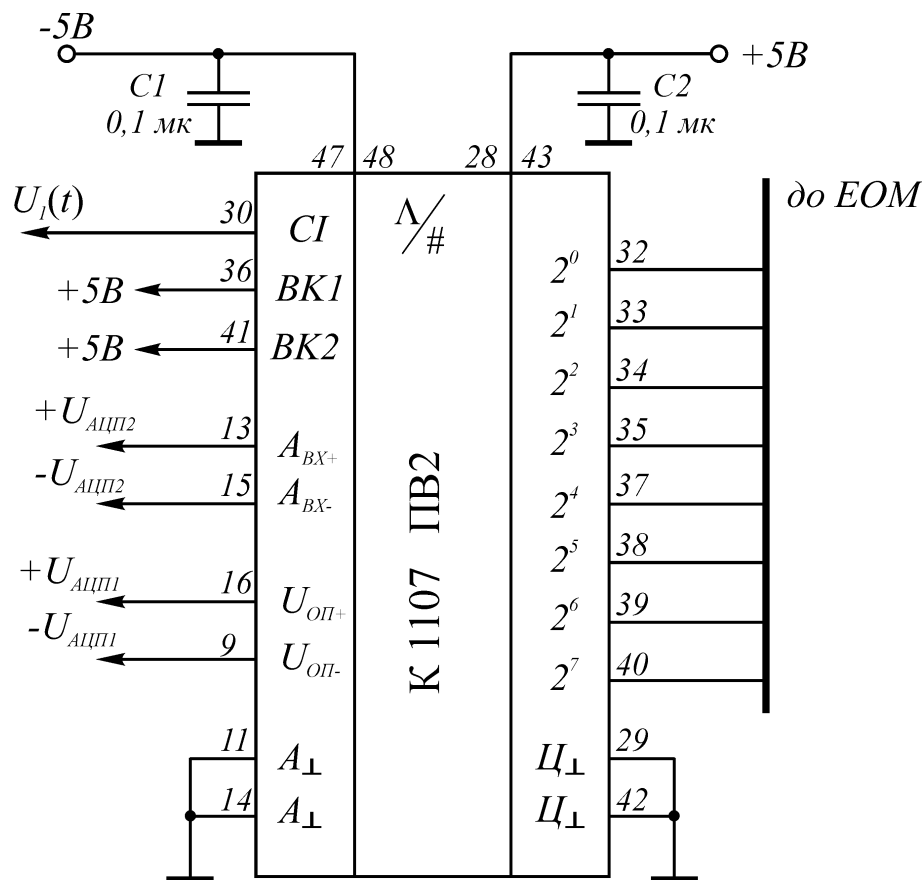


Рисунок 2.7 – Аналого – цифровий перетворювач вимірювача відношення амплітуд

Нестабільність напруги джерела живлення вимірювального перетворювача (вихідної напруги генератора гармонічних коливань) не відіграє суттєвої ролі, оскільки вихідні напруги синхронних випрямлячів пропорційні вихідній напрузі генератора гармонічних коливань, а АЦП вимірює їх відношення.

Тактову частоту роботи АЦП виберемо рівною 40 кГц. Тоді тривалість інтервалу інтегрування вхідної напруги, яка дорівнює 4000 періодів, складає 100 мс. В цей інтервал вкладається ціле число періодів напруги на виході операційних підсилювачів DA1 та DA2 (рис. 2.6) або частоти мережі, що викликає вплив неповного згладжування пульсацій на конденсаторах C1÷C4 блоку синхронного випрямлення та мережевих наводок на стабільність показань.

Імпульси з частотою 40 кГц отримують з сигналу з частотою 1 МГц при діленні на 25 за допомогою мікросхеми DD2 K561IE1 (рис.2.5) та елементу збігу на діодах VD1÷VD3, резисторі R2 та конденсаторі C2.

Тип вихідного коду АЦП задається кодовою комбінацією на виводах 36 та 41. При цьому для двійкового прямого коду кодова комбінація складає 11. При підключенні мікросхеми необхідно передбачити розділення цифрової та аналогової "землі" з підключенням їх тільки до однієї точки – клеми джерела живлення.

У вимірювачі відношення амплітуд амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів можна використовувати резистори C2-29 потужністю 0,125 Вт. Конденсатор C1 (рис.2.5) слід підібрати з ТКЄ не гірше M75. Вихідні конденсатори блоку синхронного випрямлення C1÷C4 (рис.2.6) типу КМ-6Б, а конденсатори C1 та C2 (рис.2.7) мають бути з хорошим діелектриком (K73-17 або K73-11).

2.2.4 Попередній розрахунок вимірювача кута фазового зсуву

Вимірювач кута фазового зсуву амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів є пристроєм, який проводить вимірювання кута фазового зсуву між двома гармонічними напругами (на послідовно з'єднаних резонансному контурі та на зразковому резисторі) з наступним перетворенням результату вимірювання в цифровий код.

Функціонально вимірювач кута фазового зсуву амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів складається з двох підсилюва-

чів – обмежувачів (ПО), подільників частоти (ПЧ), генератора прямокутних імпульсів (ГПІ) та фазового детектора (ФД).

Підсилювач-обмежувач вимірювача кута фазового зсуву (рис.2.8) призначений для перетворення гармонічної напруги вихідного сигналу вимірювального перетворювача в напругу прямокутної форми, яка в подальшому використовується безпосередньо для вимірювання кута фазового зсуву та параметрів досліджуваного резонансного контуру.

Підсилювач – обмежувач має відповідати таким вимогам:

- висока точність перетворення;
- малий час затримки сигналу.

Виходячи з сформульованих вимог до ПО, будемо використовувати компаратор – пристрій для перетворення аналогового сигналу в прямокутний. Такий пристрій складається з операційного підсилювача на вході та порогового елемента на виході.

Вибираємо інтегральний компаратор типу К597СА1. Цей компаратор характеризується високою чутливістю $U_{ВХ.МІН} = 3$ мВ, а час затримки складає $t_3 = 6$ нс. Крім того, при включенні компаратора за схемою рис.2.8 час затримки зменшується приблизно в 2,5 рази.

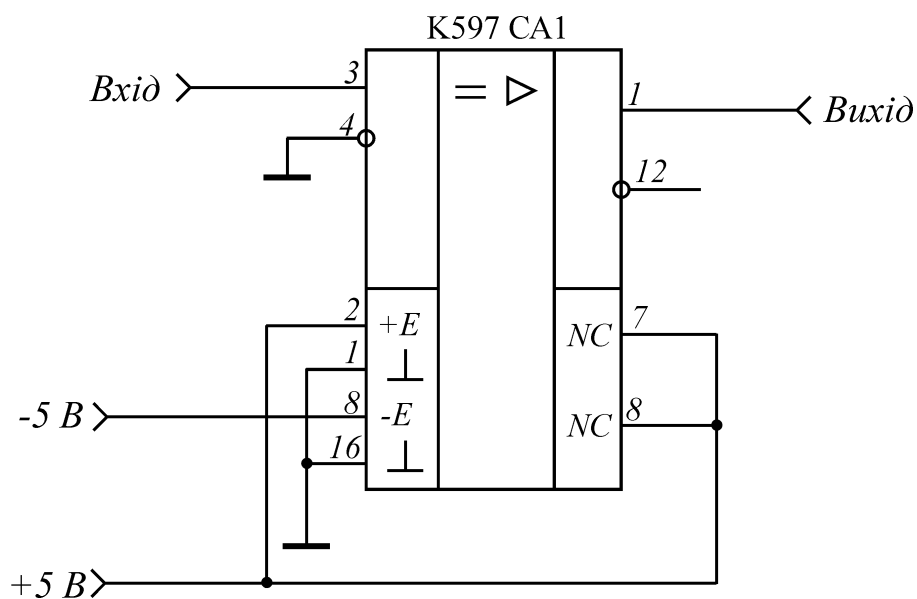


Рисунок 2.8 – Схема включення компаратора К597СА1

Загальна похибка вимірювання такого компаратора при амплітуді вхідного сигналу 1 В буде дорівнювати

$$\delta = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1} \cdot 100\% = 0.3\% .$$

Таким чином, використання в якості підсилювача – обмежувача компаратора дає можливість отримати точне перетворення гармонічного сигналу в прямокутний, що значно зменшує сумарну похибку вимірювання параметрів резонансного контуру.

При збільшенні амплітуди вхідного сигналу ПО похибка перетворення буде зменшуватись. Для роботи приладу в імпульсному режимі необхідний генератор прямокутних імпульсів. Для високостабільної роботи генератора необхідно використовувати кварцову стабілізацію частоти, що надає можливість отримувати більш точні результати вимірювання параметрів резонансного контуру.

Генератор реалізуємо за допомогою трьох елементів І-НЕ, що входять до складу ІМС К561ЛА7. Схема кварцового генератора наведена на рис.2.9.

Схема кварцового генератора має додаткові елементи: два резистори з опором 470 Ом та конденсатор ємністю 10 нФ. Конденсатор використовується для розділення рівнів, а резистори забезпечують зворотний зв'язок за постійним струмом.

Для отримання високої точності вимірювання параметрів резонансних контурів приймаємо частоту імпульсів заповнення 10 МГц. Для отримання стабільної частоти лічильних імпульсів 1 МГц використовуємо стандартний подільник частоти на 10 на основі ІМС К531Е6. Схема включення такої ІМС наведена на рис.2.10.

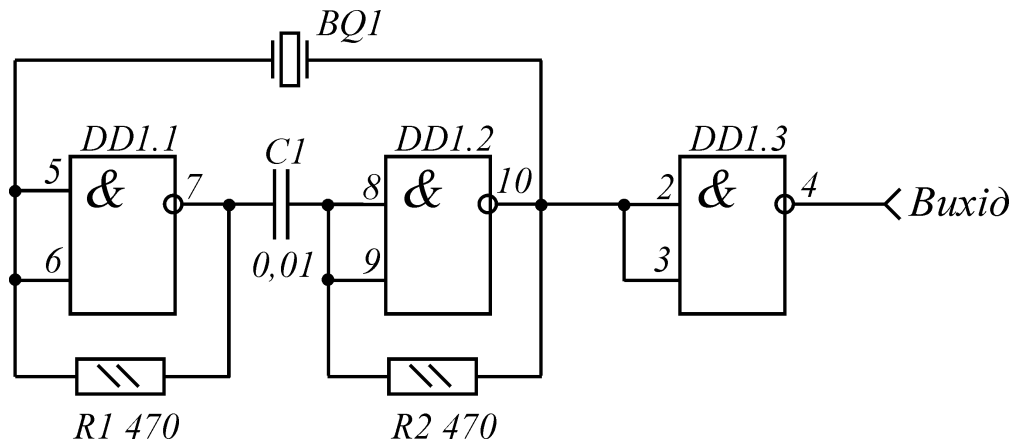


Рисунок 2.9 – Схема включення кварцового генератора на ІМС К561ЛА7

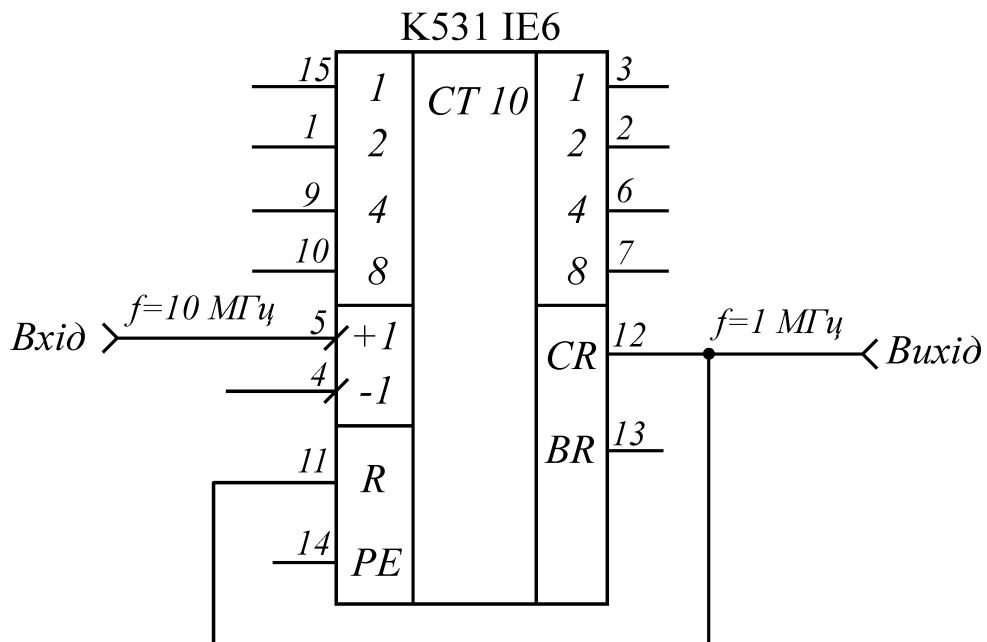


Рисунок 2.10 – Схема включення подільника частоти на ІМС К531ІЕ6

Однак виміряти фазовий зсув між імпульсами з частотою 10 МГц, використовуючи імпульси заповнення з частотою 1 МГц, з необхідною точністю неможливо. Тому для зменшення похибки дискретизації розділимо частоту кожного з вихідних сигналів компараторів у 1000 разів (в результаті отримаємо сигнали з частотою 10 кГц).

Реалізувати таке ділення частоти імпульсів можна за допомогою ІМС К555ІЕ8, які є програмованими подільниками частоти з коефіцієнтами від 2 до 63. Вихідну частоту кожного з подільників частоти можна за співвідношенням

$$f_{\text{вих}} = \frac{f_{\text{вх}}}{64} \cdot (E_5 \cdot 2^5 + E_4 \cdot 2^4 + E_3 \cdot 2^3 + E_2 \cdot 2^2 + E_1 \cdot 2^1 + E_0 \cdot 2^0).$$

Таким чином, для отримання коефіцієнта ділення 1000 необхідно використовувати два послідовно включених подільника частоти з коефіцієнтами ділення, наприклад, 40 та 25. Схеми включення таких подільників частоти наведені на рис.2.11 та рис.2.12.

Для визначення кута фазового зсуву між вихідними напругами вимірювального перетворювача необхідно виміряти час перекриття між вихідними сигналами подільників частоти на 1000, який заповнюється лічильними імпульсами з частотою 1 МГц. Логічний елемент, що виконує потрібну операцію – “Виключне АБО”. Працює елемент “Виключне АБО” таким чином. При однакових рівнях сигналів на обох входах вихідний рівень низький, тобто дорівнює логічному нулю, а при різних – високий, тобто дорівнює логічній одиниці. В даному випадку сигнал високого рівня і буде визначати різницю фаз між вхідними гармонічними сигналами.

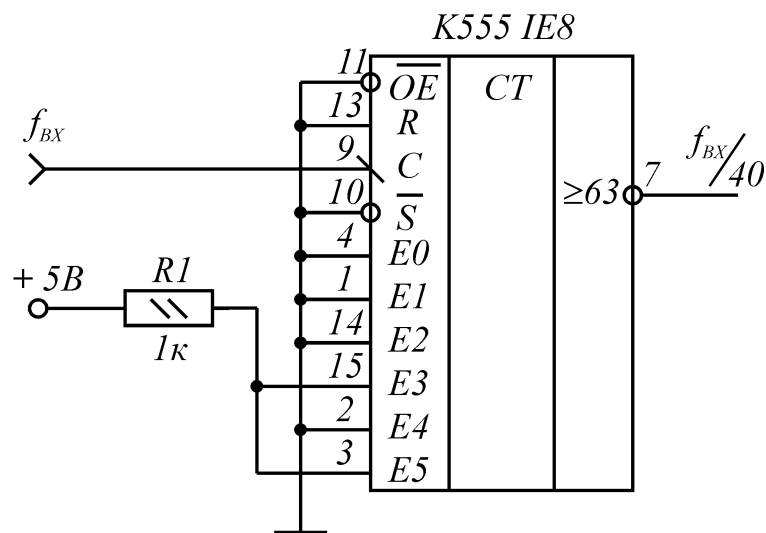


Рисунок 2.11 – Подільник частоти на 40 на основі ІМС К555ІЕ8

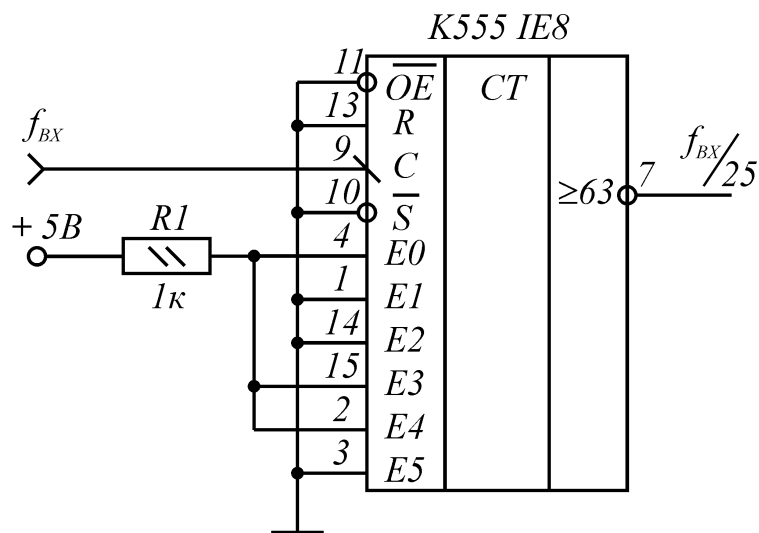


Рисунок 2.12 – Подільник частоти на 25 на основі ІМС K555IE8

Для вимірювання часу перекриття використовуються імпульси заповнення від кварцового генератора з частотою 1 МГц. За допомогою логічного елемента І виділяємо ту кількість імпульсів, яка відповідає вимірному значенню кута фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача. Електрична схема фазового детектора наведена на рис.2.13.

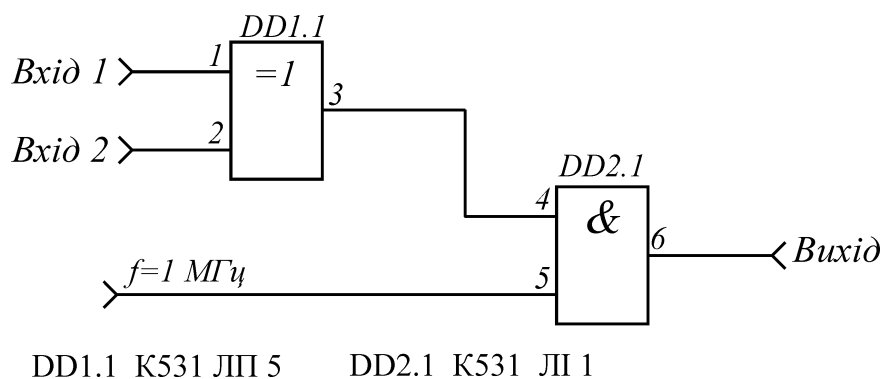


Рисунок 2.13 – Схема включення фазового детектора

Для підрахунку кількості лічильних імпульсів, що відповідає значенню кута фазового зсуву, використовується десятковий лічильник на ІМС K561 IE8. Схема включення такого лічильника наведена на рис.2.14.

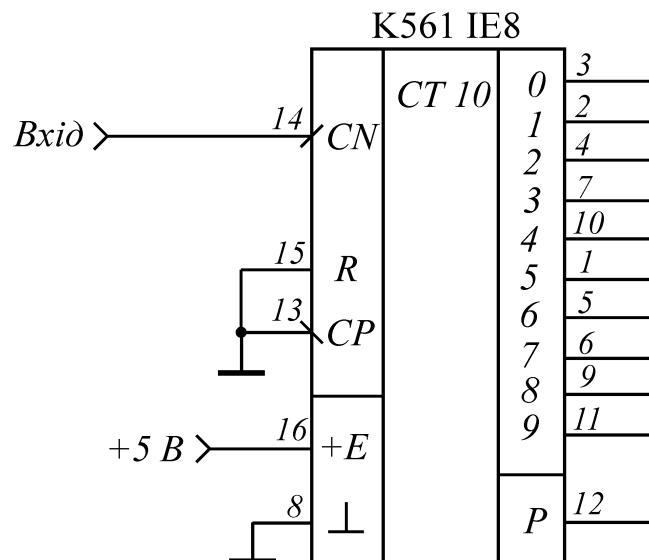


Рисунок 2.14 – Схема включення десяткового лічильника K561 IE8

Таким чином, на виході лічильника в цифровій формі буде закладена інформація про виміряне значення кута фазового зсуву.

2.2.5 Попередній розрахунок джерела живлення

Для живлення вимірювача потрібний блок вторинного електроживлення. Представимо кількість і тип ІМС та транзисторів, які використовуються для реалізації пристрою, а також наведемо споживаний струм кожного активного елементу. Результати занесемо в таблицю 2.1.

Розрахуємо загальний споживаний струм. Він дорівнює сумі споживаних струмів всіх мікросхем та активних елементів (при $U_{\text{ж}} = +5 \text{ B}$)

$$I_{\text{ЗАГ}} = 45 \cdot 1 + 2.8 \cdot 2 + 7 \cdot 2 + 88 \cdot 1 + 0.02 \cdot 2 + 14.4 \cdot 2 + 11.6 \cdot 1 + 250 \cdot 1 + 20 \cdot 2 + 88 \cdot 1 + 6.8 \cdot 1 + 9 \cdot 1 + 16.4 \cdot 4 + 3.64 \cdot 2 = 659.72 \text{ мА.}$$

Потрібно також врахувати, що з врахуванням коефіцієнта запасу $K_3 = 1.1 \div 2$

$$I_{\text{ЗАГ}} = K_3 I_{\text{ЗАГ}} = 1.1 \times 659.72 = 726 \text{ мА.}$$

Таким чином, джерело живлення необхідно розраховувати для номінального споживаного струму 0.7 А та максимального споживаного струму 1А.

Таблиця 2.1 – Активні елементи вимірювача параметрів резонансних контурів та їх споживаний струм

Мікросхема або активний елемент	Кількість	Споживаний струм однієї ІМС або активного елемента, мА
MAX 038	1	45
K140УД6	2	2,8
KP544УД2	2	7
K176IE1	1	88
K561IE8	2	0,02
K561JA7	2	14,4
K561KT3	1	11,6
K1107PB2	1	250
K597CA1	2	20
K531IE6	1	88
K531LP5	1	6,8
K531LP1	1	9
K555IE8	4	12,6
KT368A	2	3,64

2.3 Розробка уточненої структурної схеми вимірювача параметрів резонансних контурів

На основі проведених попередніх розрахунків уточнимо структурну схему амплітудно-фазового вимірювача резонансних контурів. Основними елементами структурної схеми є (рис. 2.15):

- діапазонний генератор з схемою симетрування;
- узгоджувальний трансформатор;
- вимірювальний перетворювач з буферними каскадами (емітерними повторювачами);

- вимірювач відношення амплітуд, який складається з двох блоків синхронного випрямлення, задавального генератора та АЦП;
- вимірювач кута фазового зсуву, який складається з двох компараторів, генератора лічильних імпульсів, двох подільників частоти на 40, двох подільників частоти на 25, подільника частоти на 10, фазового детектора та лічильника імпульсів;
- джерело живлення;
- пристрій обчислення та керування (його функцію виконує ЕОМ).

Схемотехніка основних елементів структурної схеми розглянута в попередньому параграфі.

Таким чином, в результаті проведених розрахунків розроблена уточнена структурна схема амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів.

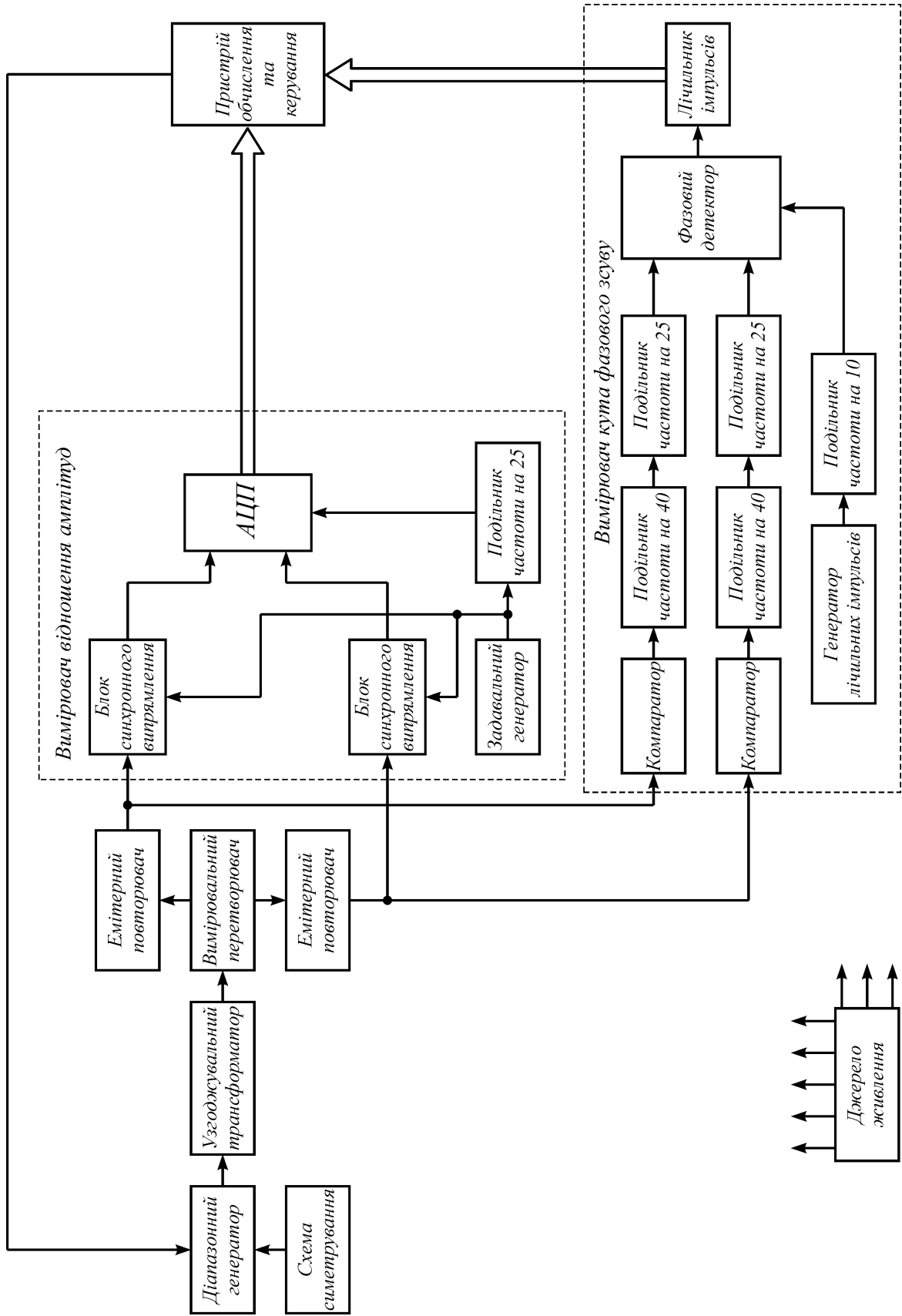


Рисунок 2.15 – Уточнена структурна схема амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів

3 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК КАСКАДІВ АМПЛІТУДНО – ФАЗОВОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ

3.1 Електричний розрахунок емітерного повторювача

Розрахуємо емітерний повторювач (рис.3.1) з такими вихідними даними:

- коефіцієнт підсилення емітерного повторювача за потужністю $K_P = 50$;
- частотні повторення емітерного повторювача в області низьких $M_H = 0,1$ дБ та високих $M_B = 0,1$ дБ частот;
- нижня $F_H = 1$ кГц та верхня $F_B = 10$ МГц частоти робочого діапазону;
- вхідний опір наступного каскаду за змінним струмом $R_{BX.наст} = 800$ Ом;
- вхідна ємність наступного каскаду $C_{BX.наст} = 40$ пФ;
- напруга живлення емітерного повторювача $E_{Ж} = 5$ В.

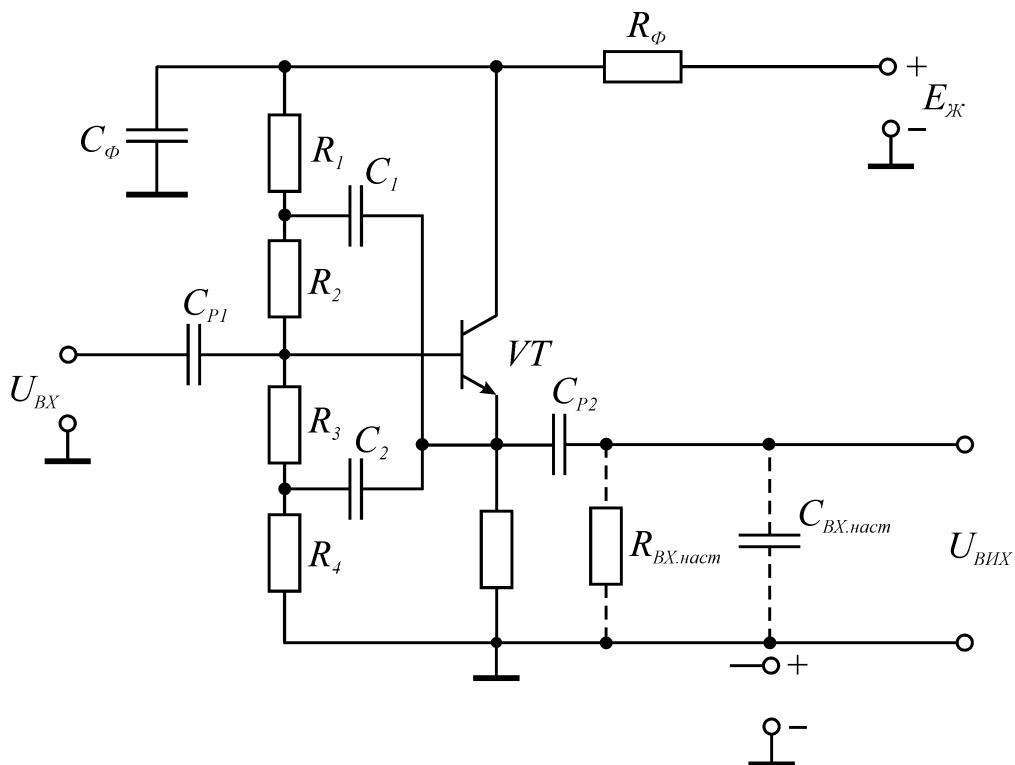


Рисунок 3.1 – Електрична схема емітерного повторювача

Враховуючи, що верхня частота робочого діапазону частот дорівнює $F_B = 10$ МГц, в якості підсилювального елемента емітерного повторювача вибираємо недорогий та досить поширений кремнієвий транзистор КТ368А з такими параметрами [15]:

- статичний коефіцієнт передачі струму в схемі з спільним емітером $h_{21E.min} = 50$, $h_{21E.max} = 300$;
- максимальний постійний струм колектора $I_{K.max} = 30$ мА;
- максимальна постійна напруга база-емітер $U_{BE.max} = 4$ В;
- максимальна постійна напруга колектор-емітер $U_{KE.max} = 15$ В;
- максимальна постійна розсіювана потужність колектора $P_{K.max} = 225$ мВт;
- максимальна ємність емітерного переходу $C_{E.max} = 3$ пФ;
- максимальна ємність колекторного переходу $C_{K.max} = 1,7$ пФ;
- гранична частота транзистора $f_{zp} = 900$ МГц;
- температура навколишнього середовища $T_{HC} = -60^{\circ} \dots + 125^{\circ}$.

Статичні характеристики транзистора КТ368А наведені на рис.3.2.

Спочатку проведемо розрахунок підсилювального каскаду на постійному струмі.

Будемо вважати, що спад напруги на резисторі фільтра та потенціал на емітері відповідно дорівнюють

$$U_{R\Phi} = 0,1E_{Ж},$$

$$U_{R\Phi} = 0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ В},$$

$$U_E = 0,3E_{Ж},$$

$$U_E = 0,3 \cdot 5 = 1,5 \text{ В}.$$

Тоді

$$U_{KE} = E_{Ж} - U_{R\Phi} - U_E,$$

$$U_{KE} = 5 - 0,5 - 1,5 = 3 \text{ В},$$

що забезпечує зменшення рівня шумів.

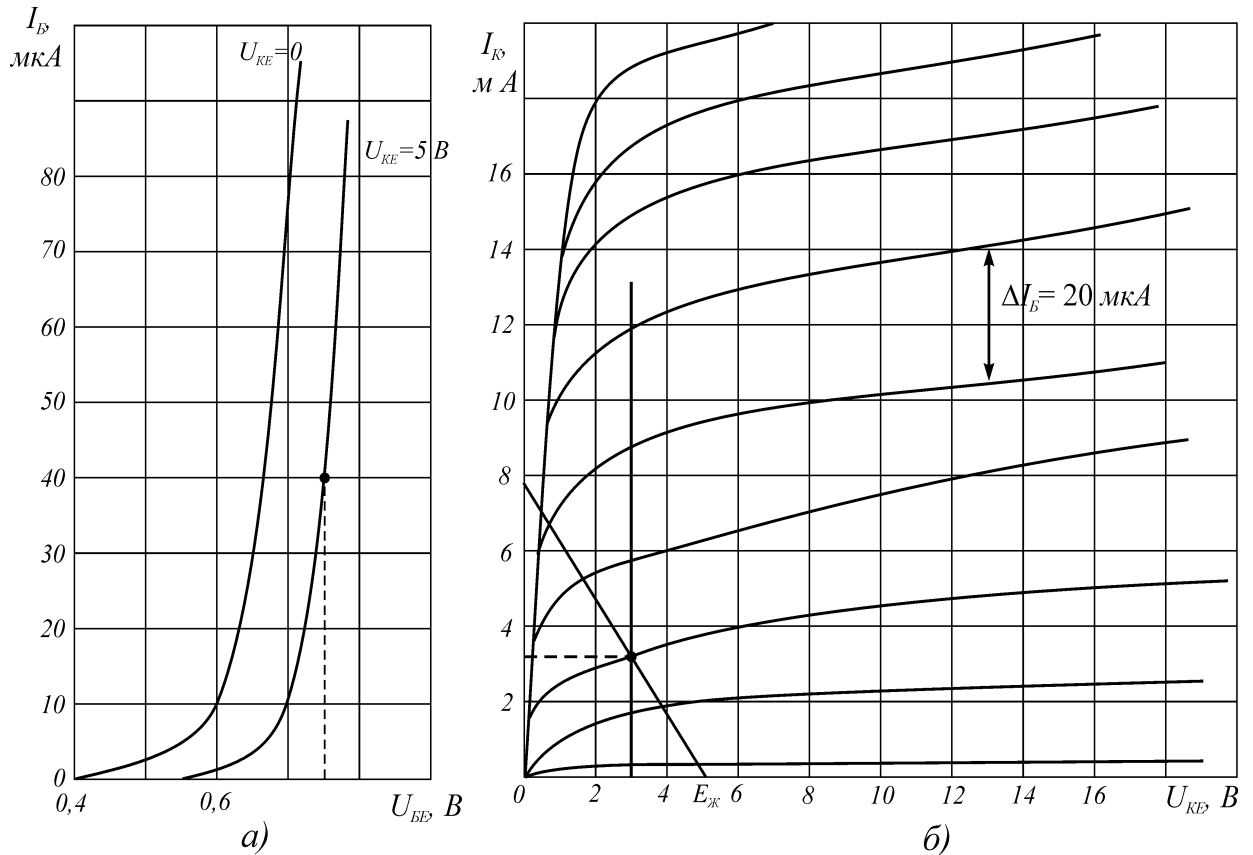


Рисунок 3.2 – Вхідна (а) та вихідна (б) статичні характеристики біполярного транзистора КТ368А

Виберемо струм бази $I_B = 40$ мкА та на вихідній статичній характеристиці транзистора побудуємо динамічну характеристику за постійним струмом. Робоча точка транзистора за постійним струмом може знаходитись тільки на динамічній характеристиці.

Визначимо параметри транзистора в робочій точці

$$I_K = 3,2 \text{ мА}, \quad U_{BE} = 0,76 \text{ В}, \quad I_E = I_K + I_B = 3,2 + 0,04 = 3,24 \text{ мА},$$

$$h_{21E} = \frac{I_K}{I_B} = \frac{3,2}{0,04} = 80.$$

Розрахуємо значення резистора R_H

$$R_H = \frac{U_E}{I_E},$$

$$R_H = \frac{1,5}{3,24 \cdot 10^{-3}} = 463 \text{ Ом.}$$

Визначимо опір базового подільника та його тип. Враховуючи, що необхідною є жорстка температурна стабілізація режиму емітерного повторювача за постійним струмом (тобто $I_{нод} \gg I_B$), а базовий подільник високоомним реалізувати неможливо, використовується компенсація впливу його на вхідний опір емітерного повторювача за допомогою позитивного зворотного зв'язку, який заводиться з виходу на кожний з опорів нижнього та верхнього плечей базового подільника через ємності C_1 та C_2 (рис.3.1).

Для цього випадку виберемо $I_{нод} = 10I_B = 0,4 \text{ мА}$, тоді

$$R_{B1} = R_1 + R_2 = \frac{E_{Ж} - U_{R\Phi} - U_E}{I_{нод} + I_B},$$

$$R_{B1} = \frac{5 - 0,5 - 0,76 - 1,5}{(0,4 + 0,04) \cdot 10^{-3}} = 5,09 \text{ кОм,}$$

$$R_{B2} = R_3 + R_4 = \frac{U_{BE} + U_E}{I_{нод}},$$

$$R_{B2} = \frac{0,76 + 1,5}{0,4 \cdot 10^{-3}} = 5,65 \text{ кОм.}$$

Виберемо величини резисторів R_1 , R_2 , R_3 та R_4

$$R_2 = (0,3 \dots 0,5)R_{B1} = 0,5 \cdot 5090 = 2,545 \text{ кОм,}$$

$$R_1 = R_{B1} - R_2 = 5,09 - 2,545 = 2,545 \text{ кОм,}$$

$$R_4 = (0,3 \dots 0,5)R_{B2} = 0,5 \cdot R_{B2} = 0,5 \cdot 5650 = 2,825 \text{ кОм,}$$

$$R_3 = R_{B2} - R_4 = 5,65 - 2,825 = 2,825 \text{ кОм.}$$

Ємності конденсаторів C_1 та C_2 розраховуємо за умови їх малого опору у порівнянні до відповідних резисторів на нижній частоті робочого діапазону

$$C_1 \geq \frac{1}{0,2\pi F_H R_2},$$

$$C_1 \geq \frac{1}{0,2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 2545} = 0,625 \text{ мкФ,}$$

$$C_2 \geq \frac{1}{0,2\pi F_H R_3},$$

$$C_2 \geq \frac{1}{0,2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 2825} = 0,563 \text{ мкФ.}$$

Розраховуємо опір резистора R_Φ

$$R_\Phi = \frac{U_{R_\Phi}}{I_K + I_{нод} + I_B} = \frac{U_{R_\Phi}}{I_E + I_{нод}},$$

$$R_\Phi = \frac{0,5}{(3,24 + 0,4) \cdot 10^{-3}} = 137,4 \text{ Ом.}$$

За вхідною та вихідною характеристиками транзистора визначаємо вхідний та вихідний опір транзистора за схемою спільний емітер, а також його крутизну

$$R_{BX.CE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B},$$

$$R_{BX.CE} = \frac{0,03}{30 \cdot 10^{-6}} = 1000 \text{ Ом,}$$

$$R_{ВИХ.CE} = \frac{\Delta U_{KE}}{\Delta I_K},$$

$$R_{ВИХ.CE} = \frac{2}{0,4 \cdot 10^{-3}} = 5 \text{ кОм,}$$

$$S_0 = \frac{h_{21E} \Delta I_B}{\Delta U_{BE}},$$

$$S_0 = \frac{80 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{0,03} = 80 \text{ мА/В.}$$

На цьому розрахунок підсилювального каскаду на постійному струмі можна вважати закінченим та переходити до розрахунків на змінному струмі.

Опір навантаження емітерного повторювача для змінного струму

$$R_{\Sigma} = \frac{R_H \cdot R_{BX.наст}}{R_H + R_{BX.наст}},$$

$$R_{\Sigma} = \frac{463 \cdot 800}{463 + 800} = 293,3 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт передачі емітерного повторювача за напругою

$$K_H = \frac{S_0 R_{\Sigma}}{1 + S_0 R_{\Sigma}},$$

$$K_H = \frac{0,08 \cdot 293,3}{1 + 0,08 \cdot 293,3} = 0,959.$$

Визначимо вхідний та вихідний опори транзистора за схемою емітерного повторювача

$$R_{BX.ЕП} = R_{BX.СЕ} (1 + S_0 R_{\Sigma}),$$

$$R_{BX.ЕП} = 1000 \cdot (1 + 0,08 \cdot 293,3) = 24,464 \text{ кОм,}$$

$$R_{ВИХ.ЕП} = \frac{R_{ВИХ.СЕ}}{1 + S_0 R_{\Sigma}},$$

$$R_{ВИХ.ЕП} = \frac{1000}{1 + 0,08 \cdot 293,3} = 204,4 \text{ Ом.}$$

Далі визначимо вхідний та вихідний опори емітерного повторювача:

$$R_{BX.EП.екв} = R_{BX.EП} \left\| \left[R_1 + \frac{R_2}{1-K_U} \right] \right\| \left\| \left[R_4 + \frac{R_3}{1-K_U} \right] \right\| = \frac{1}{\frac{1}{R_{BX.EП}} + \frac{1}{R_1 + \frac{R_2}{1-K_U}} + \frac{1}{R_4 + \frac{R_3}{1-K_U}}}$$

$$R_{BX.EП.екв} = \frac{1}{\frac{1}{24646} + \frac{1}{2545 + \frac{2545}{1-0,959}} + \frac{1}{2825 + \frac{2825}{1-0,959}}} = 14,226 \text{ кОм};$$

$$R_{ВИХ.EП.екв} = \frac{1}{S_0} \parallel R_{\Sigma} \parallel R_{ВИХ.EП} = \frac{1}{S_0 + \frac{1}{R_{\Sigma}} + \frac{1}{R_{ВИХ.EП}}};$$

$$R_{ВИХ.EП.екв} = \frac{1}{0,08 + \frac{1}{293,3} + \frac{1}{204,4}} = 11,325 \text{ Ом.}$$

В результаті проведених розрахунків визначимо коефіцієнти підсилення емітерного повторювача за струмом та потужністю

$$K_I = \frac{R_{BX.EП.екв}}{R_{ВИХ.EП.екв}} K_U,$$

$$K_I = \frac{14226}{11,325} \cdot 0,959 = 120,4,$$

$$K_{P.роз} = K_U K_I,$$

$$K_{P.роз} = 0,959 \cdot 120,4 = 115,5.$$

Розраховане значення коефіцієнта підсилення потужності більше необхідного $K_P = 50$.

Розраховуємо ємність розв'язувального фільтра

$$C_{\Phi} \geq \frac{1}{0,2\pi F_H R_{\Phi}},$$

$$C_{\Phi} \geq \frac{1}{0,2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 137,4} = 11,6 \text{ мкФ.}$$

Визначимо ємності розділових конденсаторів C_{P1} та C_{P2} за умови, що частотні спотворення на нижній частоті робочого діапазону $F_H = 1$ кГц не перевищують $M_H = 0,1$ дБ. Будемо вважати, що розділові конденсатори вносять однакові частотні спотворення, тобто $M_{H1} = M_{H2} = 0,05$ дБ = 1,005773. Тоді

$$C_{P1} \geq \frac{1}{2\pi F_H R_{BX.EП.екв} \sqrt{M_{H1}^2 - 1}},$$

$$C_{P1} \geq \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 14226 \cdot \sqrt{1,005773^2 - 1}} = 0,1 \text{ мкФ},$$

$$C_{P2} \geq \frac{1}{2\pi F_H (R_H + R_{BX.наст}) \sqrt{M_{H2}^2 - 1}},$$

$$C_{P2} \geq \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot (463 + 800) \sqrt{1,005773^2 - 1}} = 1,17 \text{ мкФ}.$$

Розрахуємо частотні спотворення в області високих частот за формулою

$$M_{B.EП} = \sqrt{1 + m_{EП}^2} \sqrt{1 + \omega_B^2 \tau_{B.EП}^2},$$

де $m = \frac{F_B}{f_{зр}} = \frac{10 \cdot 10^6}{900 \cdot 10^6} = 0,011,$

$$m_{EП} = \frac{m}{1 + S_0 R_\Sigma} = \frac{0,011}{1 + 0,08 \cdot 293,3} = 4,5 \cdot 10^{-4},$$

$C_M = (10 \dots 20)$ пФ – ємність монтажу;

$$C_0 = C_{ВНХ} + C_M = C_K (1 + h_{21E}) + C_{BX.наст} + C_M =$$

$$= 1,7 \cdot 10^{-12} (1 + 80) + 40 \cdot 10^{-12} + 15 \cdot 10^{-12} = 192,7 \text{ пФ},$$

$$\tau_{B.EП} = \frac{C_0 R_\Sigma}{1 + S_0 R_\Sigma} = \frac{192,7 \cdot 10^{-12} \cdot 293,3}{1 + 0,08 \cdot 293,3} = 2,31 \text{ нс}.$$

Тоді

$$M_{B.ЕП} = \sqrt{1 + m_{ЕП}^2} \sqrt{1 + \omega_B^2 \tau_{B.ЕП}^2},$$

$$M_{B.ЕП} = \sqrt{1 + (4,5 \cdot 10^{-4})^2} \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot 3,14 \cdot 10^7 \cdot 2,331 \cdot 10^{-9})^2} = 1,01 \text{ або } 0,09 \text{ дБ},$$

що менше необхідного значення частотних спотворень $M_B = 0,1$ дБ.

Величина вхідної ємності емітерного повторювача

$$C_{ВХ.ЕП} = C_{КБ} = 1,7 \text{ пФ}.$$

В результаті проведених розрахунків вибираємо:

резистор R_1	C2 – 23 – 0,125	2,7 кОм $\pm 10\%$,
резистор R_2	C2 – 23 – 0,125	2,4 кОм $\pm 10\%$,
резистор R_3	C2 – 23 – 0,125	2,7 кОм $\pm 10\%$,
резистор R_4	C2 – 23 – 0,125	3 кОм $\pm 10\%$,
резистор R_Φ	C2 – 23 – 0,125	130 Ом $\pm 10\%$,
резистор R_H	C2 – 23 – 0,125	470 Ом $\pm 10\%$,
конденсатор C_1	K77 – 1 63 В	0,82 мкФ $\pm 5\%$,
конденсатор C_2	K77 – 1 63 В	0,82 мкФ $\pm 5\%$,
конденсатор C_{P1}	K77 – 1 63 В	0,22 мкФ $\pm 5\%$,
конденсатор C_{P2}	K77 – 1 63 В	1,5 мкФ $\pm 5\%$,
конденсатор C_Φ	K77 – 1 63 В	15 мкФ $\pm 5\%$.

Таким чином, в результаті проведеного електричного розрахунку емітерного повторювача розраховано та вибрано номінали всіх елементів принципової схеми.

3.2 Електричний розрахунок двопівперіодного випрямляча

Розрахуємо двопівперіодний випрямляч з індуктивним фільтром (рис.3.3) з такими вихідними даними:

- номінальна напруга мережі $U_M = 220$ В;
- кількість фаз мережі $m = 2$;

- частота мережі $f_M = 50$ Гц;
- максимальне значення випрямленої напруги $U_0 = 7,8$ В;
- максимальне значення випрямленого струму $I_0 = 1$ А.

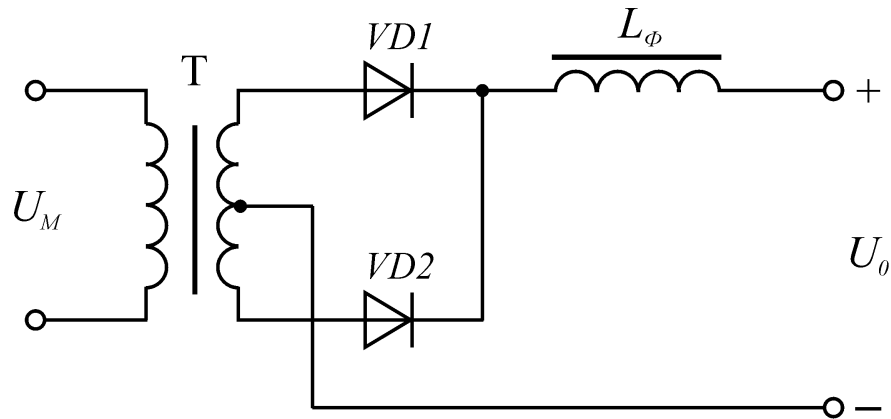


Рисунок 3.3 – Двопівперіодний випрямляч з індуктивним фільтром

Для вибору типу діодів визначимо:

- середнє значення прямого струму

$$I_{np.cер} = 0,5I_0,$$

$$I_{np.cер} = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ А};$$

- імпульсний прямий струм

$$I_{np.i} = I_0 = 1 \text{ А},$$

- амплітуду зворотної напруги

$$U_{зв} = 1,2\pi U_0,$$

$$U_{зв} = 1,2 \cdot 3,14 \cdot 7,8 = 29,4 \text{ В}.$$

На основі проведених розрахунків вибираємо діоди КД204Б з такими параметрами

$$I_{np.cер} = 0,6 \text{ А}, \quad I_{np.i} = 1,2 \text{ А}, \quad U_{зв} = 200 \text{ В}.$$

Опір обмотки трансформатора, приведений до фази вторинної обмотки, визначимо за наближеною формулою

$$r_T = k_\Gamma \frac{U_0}{I_0 f_M B_M} \sqrt[4]{\frac{S f_M B_M}{U_0 I_0}},$$

де: $k_\Gamma = 7$ – коефіцієнт, що залежить від схеми випрямляча;

S – кількість стержнів трансформатора, що несуть обмотки;

B_M – магнітна індукція в магнітопроводі трансформатора.

Для трансформаторів стержньового типу $S = 2$, $B_M = 1,6$ Тл. Тоді

$$r_T = 7 \frac{7,8}{1 \cdot 50 \cdot 1,6} \sqrt[4]{\frac{2 \cdot 50 \cdot 1,6}{7,8 \cdot 1}} = 1,45 \text{ Ом.}$$

Якщо трансформатор має додаткові обмотки, то опір

$$r'_T = 0,5 r_T \left(1 + \frac{P_2}{P_\Gamma} \right) = 0,5 r_T \left(1 + \frac{1,57 P_0}{1,34 P_0} \right) = 1,085 r_T = 1,58 \text{ Ом,}$$

де P_2 та P_Γ – відповідно потужність вторинної обмотки та габаритна потужність трансформатора.

Індуктивність розсіювання обмоток трансформатора, приведена до фази вторинної обмотки, визначають за наближеною формулою

$$L_S = k_L \frac{S U_0}{I_0 f_M B_M} \sqrt[4]{\frac{U_0 I_0}{S f_M B_M}},$$

$$L_S = 4,3 \cdot 10^{-3} \frac{2 \cdot 7,8}{1 \cdot 50 \cdot 1,6} \sqrt[4]{\frac{7,8 \cdot 1}{5 \cdot 50 \cdot 1,6}} = 0,394 \text{ мГн,}$$

де $k_L = 4,3 \cdot 10^{-3}$ – коефіцієнт, що залежить від схеми випрямляча.

Спад напруги на активному ΔU_r та реактивному ΔU_x опорах трансформатора визначаються такими співвідношеннями

$$\Delta U_r = I_0 r_T,$$

$$\Delta U_r = 1 \cdot 1,45 = 1,45 \text{ В},$$

$$\Delta U_X = 2I_0 f_M L_S,$$

$$\Delta U_X = 2 \cdot 1 \cdot 50 \cdot 0,394 \cdot 10^{-3} = 0,0394 \text{ В}.$$

Спад напруги на діодах випрямляча схеми $U_{np.cx} = U_{np} = 1,4 \text{ В}$.

Орієнтовне значення спаду напруги на дроселі ΔU_L в залежності від випрямленої потужності вибирають в межах $(0,14 \div 0,2)U_0$, тоді

$$U_L = (0,14 \div 0,2)U_0,$$

$$U_L = 0,16 \cdot 7,8 = 1,248 \text{ В}.$$

Випрямлена напруга при холостому ході визначається співвідношенням

$$U_{0X} = U_0 + \Delta U_r + \Delta U_X + U_{np.cx} + \Delta U_L,$$

$$U_{0X} = 7,8 + 1,45 + 0,0394 + 1,4 + 1,248 = 11,94 \text{ В}.$$

Уточнюємо амплітуду зворотної напруги на діоді

$$U_{зв} = 3,14U_{0X},$$

$$U_{зв} = 3,14 \cdot 11,94 = 37,5 \text{ В}.$$

Таким чином, розрахована напруга є меншою максимально припустимої зворотної напруги діода (220 В), тобто діод вибрано вірно.

Фазну ЕРС вторинної обмотки трансформатора визначимо за формулою

$$E_2 = 1,11 \cdot U_{0X},$$

$$E_2 = 1,1 \cdot 11,94 = 13,25 \text{ В}.$$

Визначимо миттєве значення струму через діод

$$I_2 = I_{д.нр} = 0,71I_0$$

$$I_2 = 0,71 \cdot 1 = 0,71 \text{ А.}$$

Далі визначимо мінімальне припустиме значення індуктивності дроселя фільтра за формулою

$$L_{\Phi.\min} = \frac{2U_{0X}}{(m^2 - 1)\pi f_M I_0},$$

$$L_{\Phi.\min} = \frac{2 \cdot 11,94}{(2^2 - 1) \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1} = 25,3 \text{ мГн.}$$

Зовнішня характеристика випрямляча (рис.3.4) є прямою лінією та будується за двома точками

$$1) U_0 = U_{0X} = 11,94 \text{ В; } I_0 = 0,$$

$$2) U_0 = 7,8 \text{ В; } I_0 = 1 \text{ А.}$$

Потужність, що виділяється на діоді, визначається співвідношенням

$$P_{np.cer} = 0,5 I_{np.cer} U_{np.cer} \left(1 + \frac{U_{np}}{U_{np.cer}} \right),$$

$$P_{np.cer} = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 1,4 \left(1 + \frac{0,5}{1,4} \right) = 0,57 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора визначається співвідношенням

$$n \approx \frac{E_2}{U_M},$$

$$n \approx \frac{13,25}{220} = 0,06.$$

Миттєве значення струму первинної обмотки

$$I_1 = n I_0,$$

$$I_1 = 0,06 \cdot 1 = 0,06 \text{ А.}$$

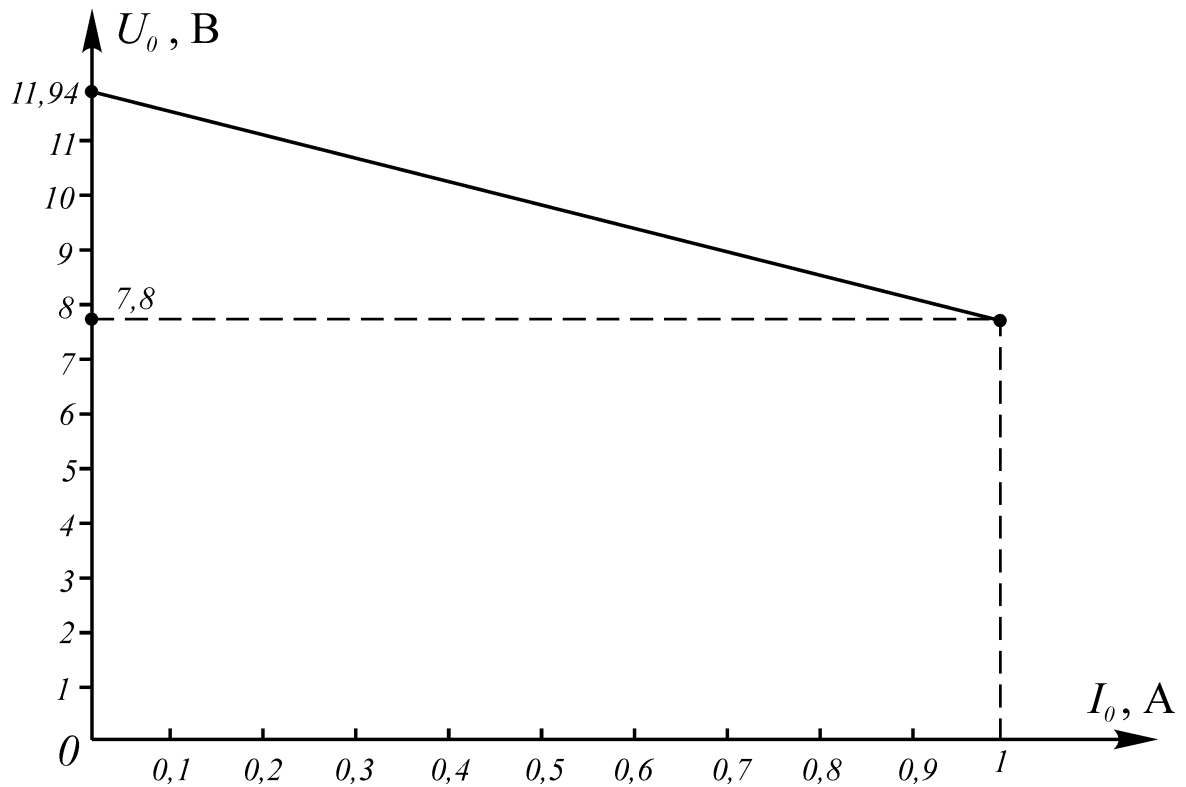


Рисунок 3.4 – Зовнішня характеристика випрямляча

Значення габаритної потужності двообмоточного трансформатора визначають за співвідношенням

$$P_{\Gamma} = 1,34P_0 = 1,34U_0I_0,$$

$$P_{\Gamma} = 1,34 \cdot 7,8 \cdot 1 = 10,452 \text{ Вт.}$$

Значення коефіцієнта пульсації випрямленої напруги за першою гармонікою $k_{\Pi O_1}$ на вході згладжувального LC – фільтра (до дроселя) дорівнює 67%.

3.3 Електричний розрахунок згладжувального фільтра

Розрахуємо Γ – подібний згладжувальний LC – фільтр (рис.3.5) з такими вихідними даними:

- коефіцієнт пульсацій на вході $k_{\Pi.BX} = 67\%$;
- амплітуда пульсації вихідної напруги $U_{\Pi.BIX} = 0,2 \text{ В}$;

- максимальне значення випрямленої напруги $U_0 = 7,8$ В;
- максимальне значення випрямленого струму $I_0 = 1$ А.

Спочатку визначимо еквівалентний опір навантаження

$$R_H = \frac{U_0}{I_0};$$

$$R_H = \frac{7,8}{1} = 7,8 \text{ Ом.}$$

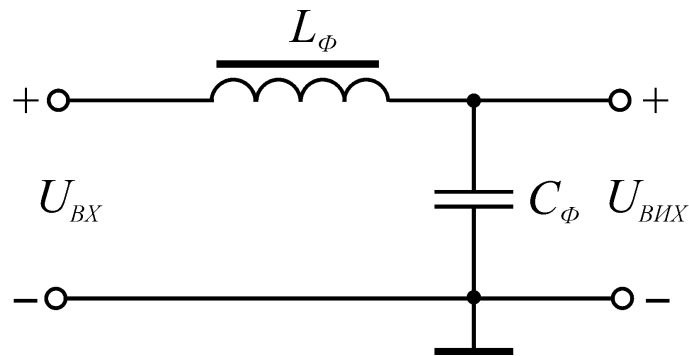


Рисунок 3.5 – Г – подібний згладжувальний LC – фільтр

Далі визначимо коефіцієнт пульсацій вихідної напруги

$$k_{П.ВИХ} = \frac{U_{П.ВИХ}}{U_0},$$

$$k_{П.ВИХ} = \frac{0,2}{7,8} = 0,0256 = 2,56\% .$$

В цьому випадку коефіцієнт згладжування фільтра

$$q = \frac{k_{П.ВХ}}{k_{П.ВИХ}},$$

$$q = \frac{67}{2,56} = 26,2.$$

Після цього визначимо значення добутку $L_\phi C_\phi$ для Г – подібного фільтра за формулою

$$L_{\Phi} C_{\Phi} = \frac{2,5 \cdot 10^4 (26,2 + 1)}{2^2 \cdot 50^2} = 68.$$

Ємність фільтра виберемо за умови забезпечення згладжувальної дії фільтра

$$C_{\Phi} \gg \frac{1}{2\pi f_M m R_H},$$

$$C_{\Phi} \gg \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 7,8} = 204 \text{ мкФ.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо

$$C_{\Phi} \text{ К50-16 16В 680 мкФ } - 20\% + 80\%.$$

Знаходимо індуктивність дроселя фільтра L_{Φ}

$$L_{\Phi} = \frac{L_{\Phi} C_{\Phi}}{C_{\Phi}},$$

$$L_{\Phi} = \frac{68}{680} = 0,1 \text{ Гн.}$$

Для подальших розрахунків приймаємо електричний дросель Д45-0,3-1,1, який має такі параметри:

- індуктивність при номінальному струмі 0,3 Гн;
- номінальний струм намагнічування 1,1 А;
- максимальне значення змінної напруги 6 В.

Знайдемо індуктивний опір дроселя фільтра

$$X_{L_{\Phi}} = m \omega_M L_{\Phi} = 2\pi m f_M L_{\Phi};$$

$$X_{L_{\Phi}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 0,3 = 188,5 \text{ Ом.}$$

Тому що виконується необхідна умова $X_{L_{\Phi}} \gg R_H$, тобто $188,5 \text{ Ом} \gg \gg 7,8 \text{ Ом}$, то розрахунок згладжувального фільтра LC – типу проведено вірно.

4 МОДЕЛЮВАННЯ КАСКАДІВ ПРИСТРОЮ НА ЕОМ

В якості досліджуваної схеми вибираємо схему емітерного повторювача (рис.4.1), електричний розрахунок якої було проведено в розділі 4. Використаємо для експериментальних досліджень програму моделювання фірми Interactive Image Technologies Ltd. – Electronics Workbench Version 5.0c.

На вхід емітерного повторювача подається синусоїдальний сигнал частотою 5 МГц, напруга живлення повторювача 5 В. Коефіцієнт передачі емітерного повторювача за напругою складає за електричними розрахунками $K_U = 0,959$, що наочно можна побачити з осцилограми (рис.4.1) – вхідний і вихідний сигнали практично збігаються, де канал А – вхідний сигнал, а канал В – вихідний сигнал; ціна поділки для вхідного сигналу – 100 мВ, для вихідного – 200 мВ.

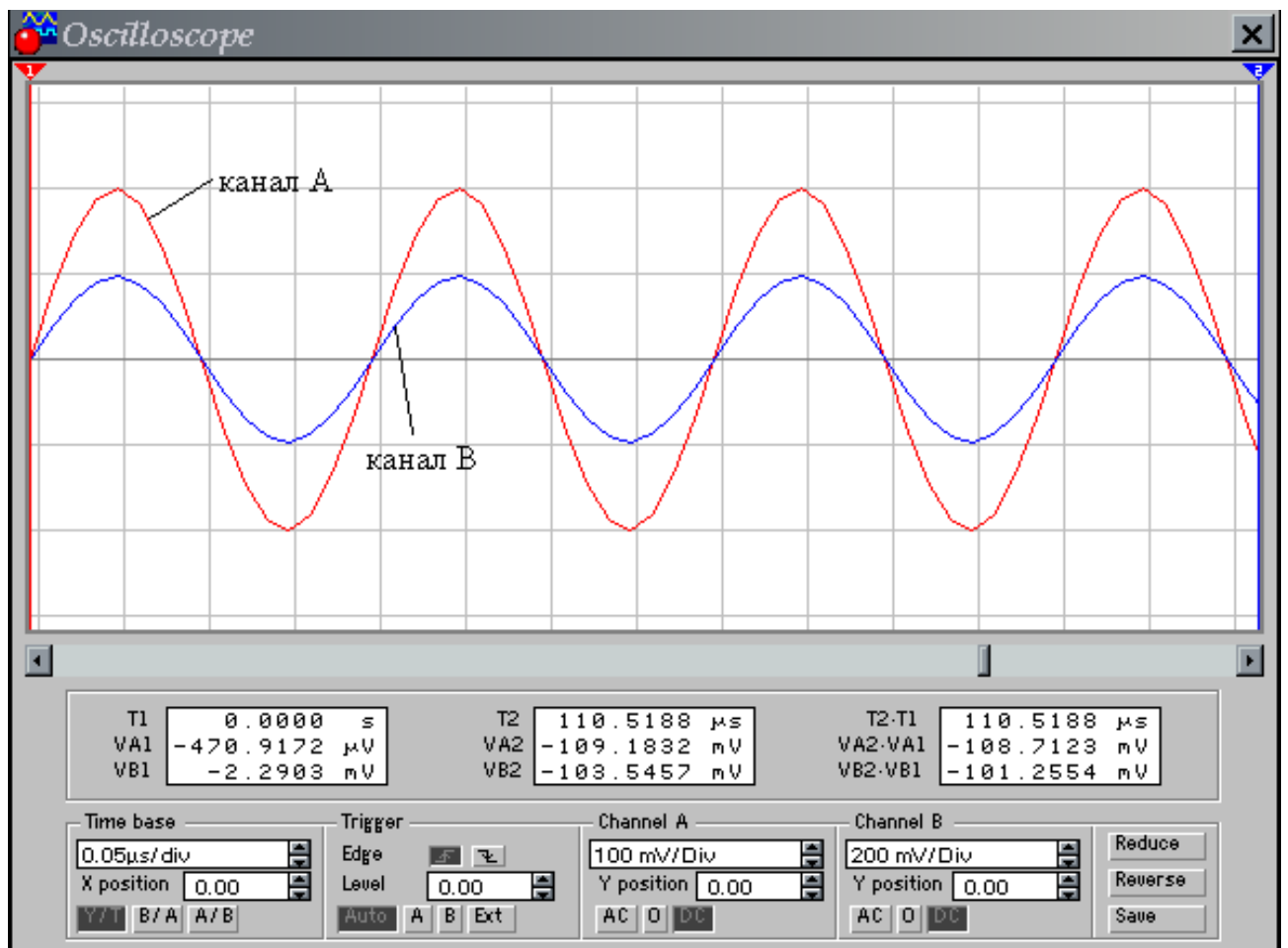
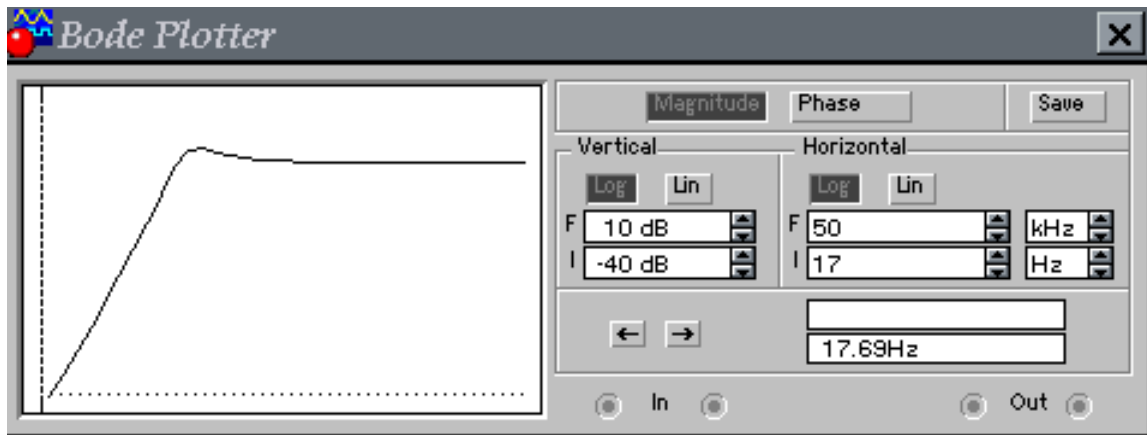


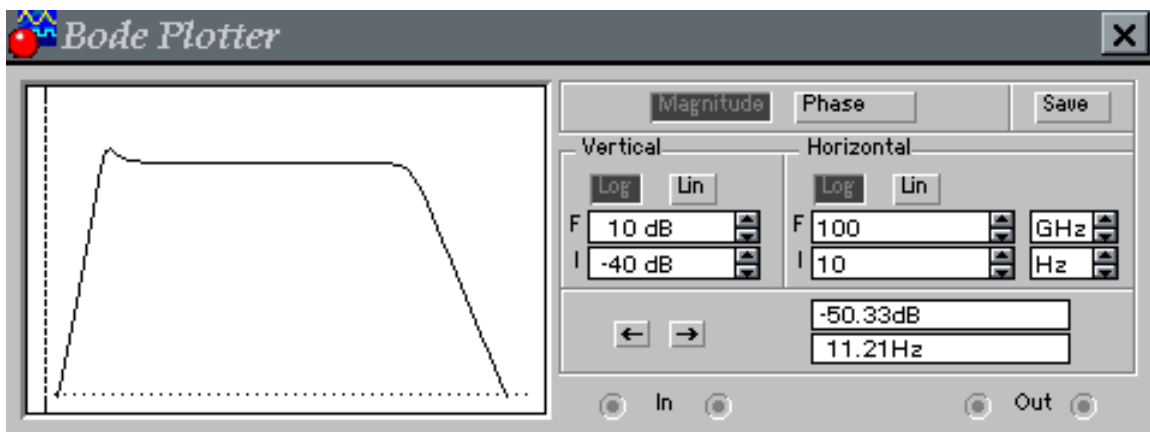
Рисунок 4.1 – Осцилографічне зображення вхідної та вихідної напруг емітерного повторювача

Наступним етапом досліджень будуть амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики емітерного повторювача.

Розглянемо спочатку загальну картину характеристик. Амплітудно-частотна характеристика схеми зображена на рис.4.2.



а)



б)

Рисунок 4.2 – АЧХ емітерного повторювача: а) – часткове зображення характеристики; б) – повне зображення АЧХ

Фазочастотна характеристика зображена на рис.4.3.

Проведемо більш докладне дослідження схеми емітерного повторювача для розробленого в дипломному проекті амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів в діапазоні, близькому до робочих частот повторювача від 5 кГц до 20 МГц. Сумісне зображення АЧХ та ФЧХ в заданому діапазоні частот показано на рис.4.4.

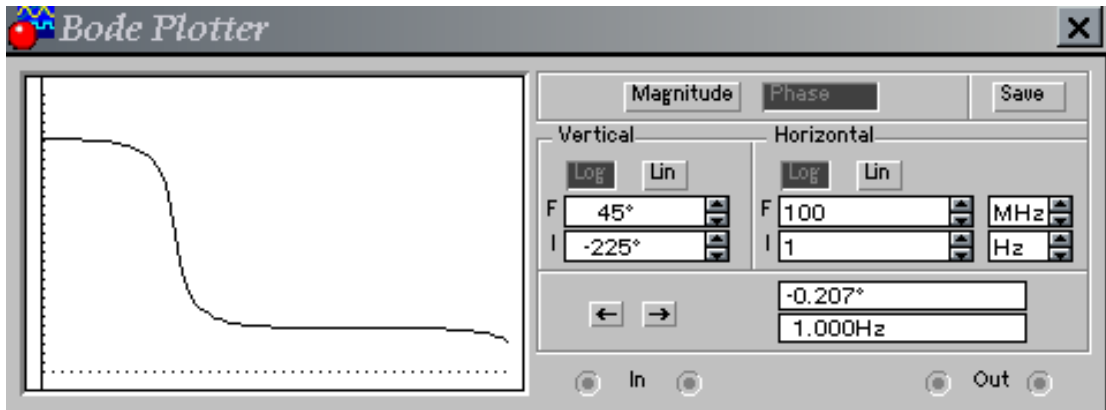


Рисунок 4.3 – ФЧХ емітерного повторювача

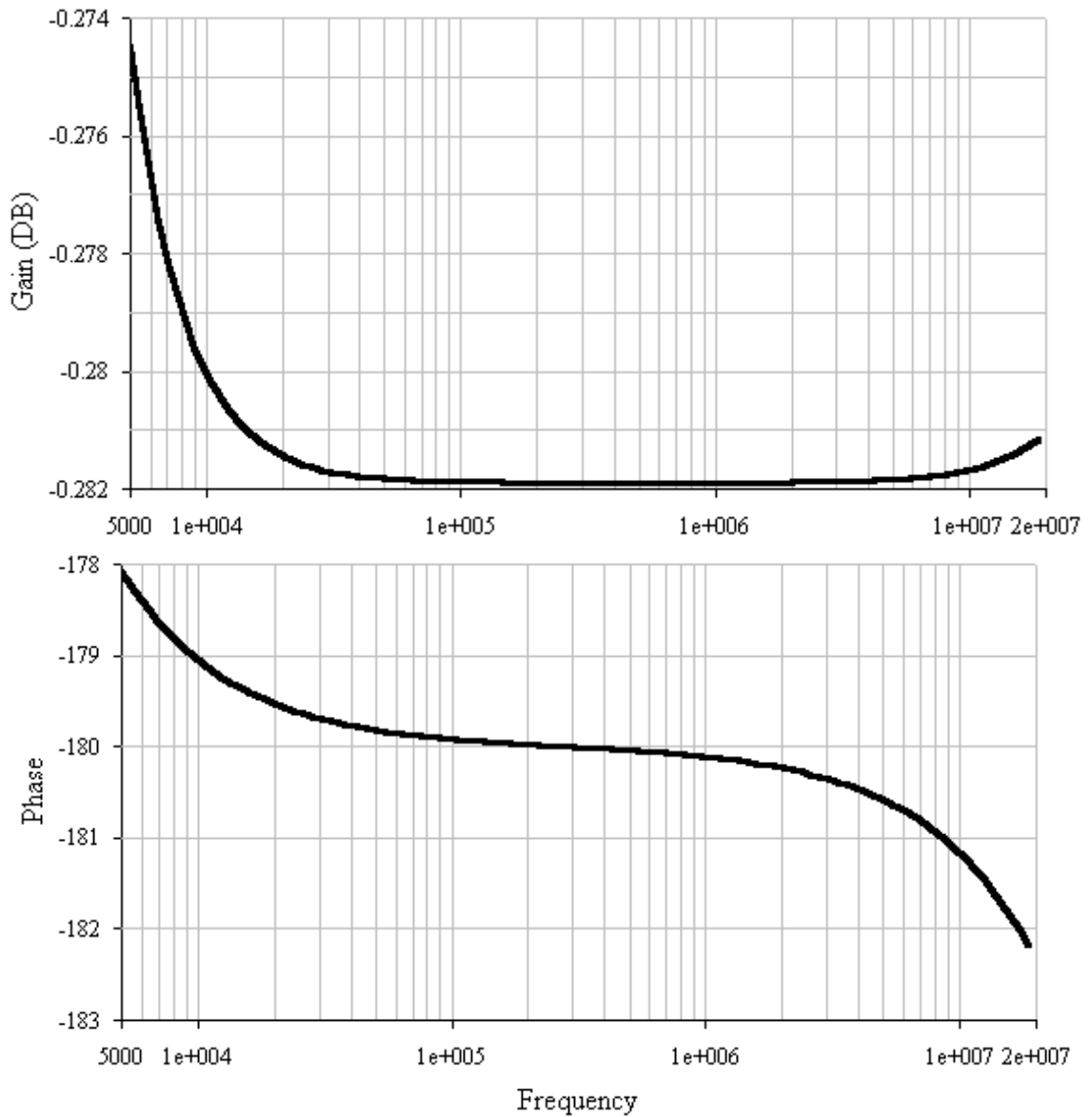


Рисунок 4.4 – Зображення АЧХ та ФЧХ емітерного повторювача

В результаті проведених експериментальних досліджень схеми емітерного повторювача для проектованого амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів за допомогою програми моделювання фірми Interactive Image Technologies Ltd. – Electronics Workbench Version 5.0c було встановлено, що електричний розрахунок емітерного повторювача проведено вірно і номінали та типи всіх елементів принципової схеми емітерного повторювача вибрано вірно.

5 КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ ВИМІРЮВАЧА

5.1 Конструктивний розрахунок трансформатора

Розрахуємо конструктивні параметри броньового трансформатора за такими вихідними даними, отриманими при електричних розрахунках:

- напруга первинної обмотки $U_1 = 220$ В;
- напруга вторинної обмотки $U_2 = 220$ В;
- струм навантаження $I_2 = 0,7$ А;
- частота струму мережі $f = 50$ Гц.

Розрахунок трансформатора проведемо у такому порядку.

1. Розрахункова потужність вторинної обмотки

$$P_2 = U_2 I_2 = 220 \cdot 0,7 = 154 \text{ ВА.}$$

2. Тому що частота струму мережі $f = 50$ Гц, з довідника [17, табл.1.1] вибираємо стрічковий магнітопровід з сталі Е330 товщиною 0,35 мм.

3. За графіками [17, рис.1.7] за величиною розрахункової потужності $P_2 = 154$ ВА визначаємо величини ККД трансформатора $\eta = 0,75$, максимального значення магнітної індукції для сталі Е330 $B_m = 1,2$ Тл та густини струму в обмотці $j = 4,9$ А/мм².

Величини коефіцієнтів заповнення міддю вікна осердя K_M та сталлю площі поперечного перерізу стержня магнітопровода K_C визначаємо за таблицями [17, табл.1.6 та табл.1.7]:

- при $f = 50$ Гц та $P_2 = (10...30)$ ВА $K_M = 0,22...0,28$ (приймаємо $K_M = 0,23$);
- при товщині листа стрічкового магнітопровода (0,35...0,5) мм $K_C = 0,95...0,97$ (приймаємо $K_C = 0,95$).

За вибраними даними визначаємо добуток площі поперечного перерізу стержня магнітопровода та площі вікна:

$$S_C S_0 = \frac{1 + \eta}{\eta} \cdot \frac{100 P_2}{4,44 f B_m j K_M K_C},$$

$$S_C S_0 = \frac{1 + 0,75}{0,75} \cdot \frac{100 \cdot 8,4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 4,9 \cdot 0,23 \cdot 0,95} = 6,87 \text{ см}^4.$$

Враховуючи, що трансформатор має мати мінімальну вагу, визначаємо значення параметра a магнітопровода (рис.6.1)

$$a = 0,8^4 \sqrt{S_C S_0} = 0,8^4 \sqrt{6,87} = 1,3 \text{ см.}$$

4. За довідниковими даними [17, додаток 1.2] вибираємо магнітопровод марки ШЛ12×16 з розмірами $a = 12$ мм, $b = 16$ мм, $h = 30$ мм, $H = 42$ мм, $c = 12$ мм, $C = 48$ мм та такими параметрами:

- активна площа поперечного перерізу магнітопровода $S_{Ca} = 1,68 \text{ см}^2$;
- середня довжина магнітної силової лінії $l_C = 10,2$ см;
- добуток $S_C S_0 = 6,9 \text{ см}^4$;
- активний об'єм магнітопровода $V_{ca} = 17,1 \text{ см}^3$;
- вага магнітопровода $m_{cm} = 130$ гр;
- орієнтовна потужність трансформатора на частоті 50 Гц $\Sigma P = 10$ ВА.

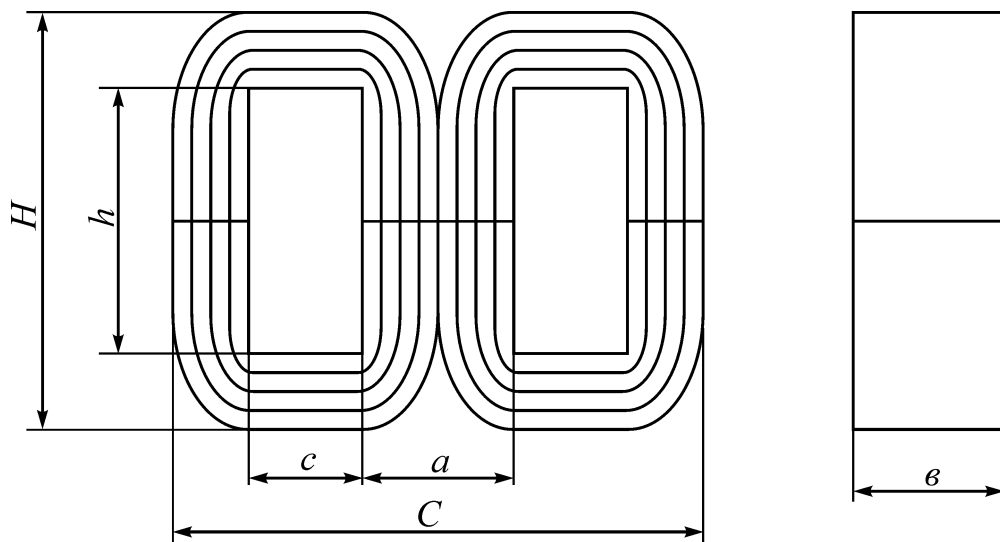


Рисунок 5.1 – Конструкція типового броньового стрічкового магнітопровода

5. За графіками [17, рис. 1.8 та 1.9] визначаємо величину питомих втрат для сталі E330 товщиною 0,35 мм на частоті 50 Гц $\rho_{cm} = 2,7$ Вт/кг та величину питомої намагнічувальної потужності $q_c = 23$ ВАр/кг. За отриманими даними втрати в сталі

$$P_{cm} = \rho_{cm} m_{cm},$$

$$P_{cm} = 2,7 \cdot 0,13 = 0,351 \text{ Вт.}$$

6. Визначаємо струм холостого ходу та його складові:

- активна складова струму холостого ходу, виражена в процентах від номінального струму

$$i_A = \frac{P_{cm}}{P_2} \cdot 100\%,$$

$$i_A = \frac{0,351}{8,4} \cdot 100\% = 4,18\% ;$$

- реактивна складова струму холостого ходу, виражена в процентах від номінального струму

$$i_X = \frac{Q_c}{P_2} \cdot 100\% = \frac{q_c m_{cm}}{P_2} \cdot 100\% ,$$

$$i_X = \frac{23 \cdot 0,13}{8,4} \cdot 100\% = 35,6\% ;$$

- струм холостого ходу, виражений в процентах від номінального

$$i_0 = \sqrt{i_A^2 + i_X^2} ,$$

$$i_0 = \sqrt{4,18^2 + 35,6^2} = 35,8\% .$$

Номінальне значення струму первинної обмотки

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} .$$

Тому що в більшості випадків навантаження трансформаторів малої потужності активне, то величина $\cos\varphi_1$ залежить в основному від величини струму холостого ходу. Для частоти 50 Гц коефіцієнт потужності можна прийняти $\cos\varphi_1 = 0,9 \dots 0,95$ (чим більше потужність трансформатора, тим більше $\cos\varphi_1$).

Тоді

$$I_1 = \frac{8,4}{220 \cdot 0,75 \cdot 0,91} = 0,056 \text{ А.}$$

На основі проведених розрахунків можна знайти абсолютне струму холостого ходу

$$I_0 = \frac{i_0}{100} \cdot I_1,$$

$$I_0 = \frac{35,8}{100} \cdot 0,056 = 0,02 \text{ А.}$$

7. Визначимо площі поперечних перерізів проводів обмоток

$$q_1' = \frac{I_1}{j},$$

$$q_1' = \frac{0,056}{4,9} = 0,011 \text{ мм}^2,$$

$$q_2' = \frac{I_2}{j},$$

$$q_2' = \frac{0,7}{4,9} = 0,143 \text{ мм}^2.$$

Вибираємо провід марки ПЕВ – 1 [17, додаток 2] з такими параметрами:

- площа поперечного перерізу $q_1 = 0,01131 \text{ мм}^2$; $q_2 = 0,1521 \text{ мм}^2$;
- діаметр проводу без ізоляції $d_1 = 0,12 \text{ мм}$; $d_2 = 0,44 \text{ мм}$;
- діаметр проводу з ізоляцією $d_{1\text{із}} = 0,145 \text{ мм}$; $d_{2\text{із}} = 0,48 \text{ мм}$;

– вага 1 м проводу $m_1 = 0,101$ гр.; $m_2 = 1,35$ гр.

Визначимо дійсну густину струму в обмотках

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1},$$

$$j_1 = \frac{0,056}{0,01131} = 4,952 \text{ А/мм}^2,$$

$$j_2 = \frac{I_2}{q_2},$$

$$j_2 = \frac{0,7}{0,1521} = 4,6 \text{ А/мм}^2.$$

Середня густина струму в обмотках трансформатора

$$j = \sqrt{j_1 j_2}.$$

$$j = \sqrt{4,952 \cdot 4,6} = 4,78 \text{ А/мм}^2.$$

8. За графіками [17, рис.1.10] визначаємо орієнтовні значення процентного падіння напруги в первинній ΔU_1 та вторинній ΔU_2 обмотках на частоті 50 Гц при потужності 8,4 ВА: $\Delta U_1 = 15\%$, $\Delta U_2 = 20\%$.

Визначимо е.р.с. обмоток навантаженого трансформатора з врахуванням спад напруг в обмотках

$$E_1 = U_1 \left(1 - \frac{\Delta U_1}{100} \right),$$

$$E_1 = 220 \left(1 - \frac{15}{100} \right) = 187 \text{ В},$$

$$E_2 = U_2 \left(1 + \frac{\Delta U_2}{100} \right),$$

$$E_2 = 12 \left(1 + \frac{20}{100} \right) = 14,4 \text{ В}.$$

Кількість витків обмоток

$$W_1 = \frac{10^4 E_1}{4,44 f B_m S_{ca}},$$

$$W_1 = \frac{10^4 \cdot 187}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 1,68} = 4178,$$

$$W_2 = \frac{10^4 E_2}{4,44 f B_m S_{ca}} = \frac{W_1 E_2}{E_1},$$

$$W_2 = \frac{4178 \cdot 187}{178} = 322.$$

9. Конструктивний розрахунок обмоток.

Висота обмотки

$$h_{об} = h - 2\delta_3 - (1...2),$$

$$h_{об} = 30 - 2 \cdot 1 - 1 = 27 \text{ мм},$$

де $\delta_3 = (0,5...1)$ мм – зазор між каркасом та магнітопроводом в один бік.

Кількість витків в одному шарі обмотки

$$N_1 = \frac{h_{об}}{K_y d_{1\text{із}}} - 1,$$

$$N_1 = \frac{27}{1,1 \cdot 0,145} - 1 = 168,$$

$$N_2 = \frac{h_{об}}{K_y d_{2\text{із}}} - 1,$$

$$N_2 = \frac{27}{1,1 \cdot 0,48} - 1 = 50,$$

де $K_y = (1,1...1,15)$ – коефіцієнт, який враховує нерівномірність обмотки.

Кількість стрічок поточної обмотки

$$M_1 = \frac{W_1}{N_1},$$

$$M_1 = \frac{4178}{168} = 24,86 \approx 25,$$

$$M_2 = \frac{W_2}{N_2},$$

$$M_2 = \frac{322}{50} = 6,44 \approx 7.$$

Радіальний розмір (товщина) кожної обмотки

$$\delta_1 = 1,2M_1d_{1i3},$$

$$\delta_1 = 1,2 \cdot 25 \cdot 0,145 = 4,35 \text{ мм},$$

$$\delta_2 = 1,2M_2d_{2i3},$$

$$\delta_2 = 1,2 \cdot 7 \cdot 0,48 = 4,03 \text{ мм},$$

де множник 1,2 враховує наявність ізоляції між шарами.

Радіальний розмір всіх обмоток

$$\delta_p = \delta_1 + \delta_2 + \delta_0,$$

$$\delta_p = 4,35 + 4,03 + 0,3 = 8,68 \text{ мм},$$

де $\delta_0 = (0,2...0,3)$ мм – товщина міжобмоточної ізоляції:

Вільний проміжок у вікні магнітопровода

$$\delta_c = c - \delta_3 - \delta_K - \delta_p,$$

$$\delta_c = 12 - 1 - 2 - 8,68 = 0,32 \text{ мм},$$

де $\delta_K = (1,5...2,5)$ мм – товщина каркаса.

10. Визначення сумарних втрат в проводах обмоток.

Середня довжина витка обмоток

$$l_1 = 2[a + b + \pi(\delta_3 + \delta_K + 0,5\delta_1)],$$

$$l_1 = 2[0,012 + 0,016 + 3,14(0,001 + 0,002 + 0,5 \cdot 0,00435)] = 0,0885 \text{ м},$$

$$l_2 = 2[a + b + \pi(\delta_3 + \delta_k + \delta_1 + 0,5\delta_2 + \delta_0)],$$

$$l_2 = 2[0,012 + 0,016 + 3,14(0,001 + 0,002 + 0,00435 + 0,5 \cdot 0,00403 + 0,0003)] = 0,117 \text{ м.}$$

Вага міді кожної обмотки

$$m_{M1} = W_1 m_1 l_1,$$

$$m_{M1} = 4178 \cdot 0,000101 \cdot 0,0885 = 0,0373 \text{ кг,}$$

$$m_{M2} = W_2 m_2 l_2,$$

$$m_{M2} = 322 \cdot 0,00135 \cdot 0,117 = 0,0509 \text{ кг.}$$

Втрати в міді кожної обмотки при температурі проводу (100...105) °C

$$P_{M1} = 2,7 j_2^2 m_{M1},$$

$$P_{M1} = 2,7 \cdot 4,952^2 \cdot 0,0373 = 2,469 \text{ Вт,}$$

$$P_{M2} = 2,7 j_2^2 m_{M2},$$

$$P_{M2} = 2,7 \cdot 4,6^2 \cdot 0,0509 = 2,908 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати в міді всіх обмоток

$$P_M = P_{M1} + P_{M2},$$

$$P_M = 2,469 + 2,908 = 5,377 \text{ Вт.}$$

11. ККД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{cm} + P_M},$$

$$\eta = \frac{8,4}{8,4 + 0,351 + 5,377} = 0,6.$$

12. Активні опори обмоток трансформатора

$$r_1 = \rho \frac{l_1 W_1}{q_1},$$

$$r_1 = 0,0235 \frac{0,0885 \cdot 4178}{0,01131} = 768,3 \text{ Ом},$$

$$r_2 = \rho \frac{l_2 W_2}{q_2},$$

$$r_2 = 0,0235 \frac{0,117 \cdot 322}{0,1521} = 5,82 \text{ Ом},$$

де $\rho = 0,0235 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – питомий опір мідного проводу при температурі 105°C.

Повний активний опір двообмоточного трансформатора, приведений до первинної обмотки

$$r_{mp} = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2,$$

$$r_{mp} = 768,3 + 5,82 \left(\frac{4178}{322} \right)^2 = 1748 \text{ Ом}.$$

13. Активна складова напруги короткого замикання, виражена в процентах

$$U_A = \frac{I_1 r_{mp}}{U_1} \cdot 100\%,$$

$$U_A = \frac{0,056 \cdot 1748}{220} \cdot 100\% = 44,5\%.$$

Реактивна складова напруги короткого замикання, виражена в процентах

$$U_X = \frac{180(AW)_{cep} \cdot l}{\nu B_m S_{ca} h_{об} \cdot 100} \delta',$$

$$U_X = \frac{180 \cdot 335,4 \cdot 0,10275}{1 \cdot 1,2 \cdot 1,68 \cdot 27 \cdot 100} \cdot 3,09 = 3,52\%,$$

де

$$(AW)_{\text{сер}} = \sqrt{\frac{(I_1 W_1 + I_2 W_2)^2}{2} + (I_0 W_1)^2} = \sqrt{\frac{(0,056 \cdot 4178 + 0,7 \cdot 322)^2}{2} + (0,02 \cdot 4178)^2} =$$

$$= 335,4 \text{ А} - \text{середнє значення ампер-витків (намагнічувальної сили);}$$

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} = \frac{0,0885 + 0,117}{2} = 0,10275 \text{ м} - \text{середня довжина всіх обмоток тра-}$$

нсформатора;

ν – кількість стержнів обмотки (для броньового трансформатора $\nu = 1$);

$$\delta' = \delta_0 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} = 0,3 + \frac{4,35 + 4,03}{3} = 3,09 \text{ мм} - \text{розрахунковий зазор для ма-}$$

гнітного потоку розсіювання.

Напряга короткого замикання, виражена в процентах

$$U_{K3} = \sqrt{U_A^2 + U_X^2},$$

$$U_{K3} = \sqrt{44,5^2 + 3,52^2} = 44,64\% .$$

При часто активному навантаженні зміна вторинної напруги при зміні навантаження від нуля до номінального значення дорівнює активній складовій напруги короткого замикання, тобто $\Delta U \approx U_A = 44,5\%$.

14. Температура перегріву обмоток відносно навколишнього середовища

$$\Delta T = \frac{P_{\text{ст}} + P_M}{\alpha_T S_{\text{охол}} \cdot 10^4},$$

$$\Delta T = \frac{0,351 + 5,377}{1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0077 \cdot 10^4} = 57,2^\circ \text{С},$$

де

$$S_K = 2h_{\text{об}}[a + \pi(c - 0,004)] = 2 \cdot 0,027[0,012 + 3,14 \cdot (0,012 - 0,004)] = 0,002 \text{ м}^2$$

– поверхня охолодження обмотки броньового трансформатора;

$$S_C = 2[(C + H)b + (C + h)a + hb] = 2[(0,048 + 0,042) \cdot 0,016 + (0,048 + 0,03) \cdot 0,012 +$$

$+ 0,03 \cdot 0,016] = 0,0057 \text{ м}^2$ – поверхня охолодження осердя броньового трансформатора;

$S_{\text{ОХОЛ}} = S_K + S_C = 0,002 + 0,0057 = 0,0077 \text{ м}^2$ – загальна поверхня охолодження броньового трансформатора;

$\alpha_T = (1,1 \dots 1,3) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$ – коефіцієнт тепловіддачі трансформатора,

який залежить як від потужності трансформатора, так і від частоти струму мережі.

В трансформаторі використовується обмоточний провід марки ПЕВ–1, ізоляція якого за теплостійкістю відноситься до класу А, тобто максимальна робоча температура обмоток не має бути більше $+105^\circ\text{C}$. Тому розрахований трансформатор може працювати при максимальній температурі навколишнього середовища $t_{\text{сеп.макс}} = t_{\text{нр.макс}} - \Delta T = 105 - 57,2 = 47,8^\circ\text{C}$.

5.2 Розрахунок надійності пристрою

Надійністю називають властивість пристрою виконувати задані функції, які визначаються безвідмовністю до роботи та ремонтпридатністю. Під безвідмовністю роботи розуміють властивість неперервно зберігати працездатність в заданих умовах ситуації протягом заданого інтервалу часу (наробки).

Відмови ділять на раптові та поступові. Раптові виникають в результаті миттєвої зміни параметрів пристрою. Поступові відмови характеризуються поступовою зміною параметрів.

Під ймовірністю безвідмовної роботи елемента $P(t)$ або системи $P_C(t)$ розуміють ймовірність того, що в межах заданої наробки T при визначених умовах експлуатації не виникне жодної відмови

$$P(t) = P(T \geq t),$$

де T – час від початку роботи до першої відмови.

Ймовірність відмови пристрою $q(t)$ – ймовірність того, що відмова при визначених умовах експлуатації виникне через час, що не перевищує заданої наробки, тобто

$$q(t) = Q(T < t).$$

Якщо функцію $q(t)$ можна диференціювати, то густина розподілу наробки пристрою до відмови

$$\omega(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – умовна густина ймовірності виникнення відмов. При цьому середня наробка на відмову

$$T_{сер} = \int_0^{\infty} t \omega(t) dt.$$

Таким чином, співвідношення для $P(t)$ набуде вигляду

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda_0 t}.$$

При експоненційному законі надійності наробка на відмову

$$T_0 = T_{сер} = \frac{1}{\lambda_0}.$$

При визначенні надійності системи через відомі показники надійності її елементів вводять два припущення:

- відмови елементів статистично незалежні;
- відмова будь-якого елемента приводить до відмови системи.

Таку систему в теорії надійності називають послідовною.

При цьому можна використовувати теорему множення ймовірностей

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

де $P_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елементу;

n – кількість комплектувальних елементів.

Поєднавши останні співвідношення, отримаємо

$$P_C = e^{-t \sum_{j=1}^m \lambda_{0j} N_j},$$

де λ_{0j} – інтенсивність відмов j -ої групи;

N_j – кількість елементів j -ої групи;

m – кількість рівнонадійних елементів (груп).

За такою формулою виконується наближений розрахунок надійності.

При уточненому розрахунку враховують вплив умов експлуатації, температури, електричного режиму. Розрахунок проводять з врахуванням коефіцієнтів α_j , при цьому

$$\lambda_j = \lambda_{0j} \alpha_j.$$

Значення поправочного коефіцієнту α_j в залежності від температури та коефіцієнта навантаження наведені в довідниковій літературі.

Для розрахунків приймемо такі коефіцієнти навантаження:

- для резисторів $K_H \leq 0,6$;
- для конденсаторів $K_H \leq 0,7$;
- для інтегральних мікросхем $K_H = 0,5$;
- для напівпровідникових діодів $K_H \leq 0,7$;
- для транзисторів $K_H \leq 0,7$;
- для поточних виробів $K_H \leq 0,8$.

Значення інтенсивності відмов, а також коефіцієнти, що враховують умови експлуатації, вибираємо з відповідної довідникової літератури.

Номерам груп відповідають:

1 – резистори С2-29 – 0,125 Вт;

2 – резистори С2-29 – 0,5 Вт;

3 – резистори С2-29 – 1 Вт;

4 – резистори СП;

5 – конденсатори керамічні;

6 – конденсатори електроліти-

чні;

7 – кварцовий резонатор;

8 – випрямні діоди;

9 – стабілітрони;

10 – дроселі;

11 – трансформатори;

12 – інтегральні мікросхеми;

13 – транзистори малопотужні;

14 – транзистори потужні;

15 – пайка;

16 – друкована плата.

Результати розрахунку надійності наведені на рис. 5.2. При цьому наробка проектного пристрою на відмову складає 3728,63 год.

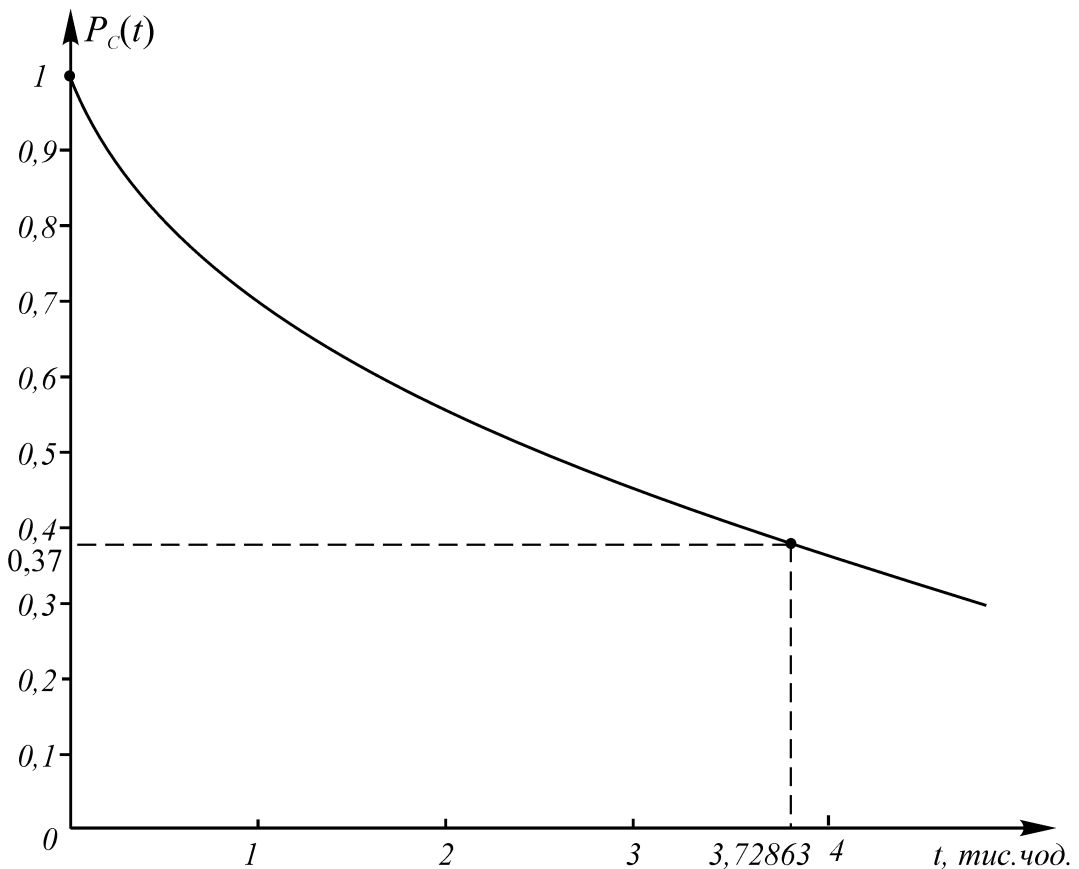


Рисунок 5.1 – Крива зменшення надійності проектного пристрою з часом

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Таблиця 1.1 Основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки

Показники	Одиниця виміру	Аналог	Засіб, що проектується	Відношення параметрів
Зведена похибка вимірювання	%	3	2	1,5
Максимальна робоча частота	МГц	1	10	10
Час вимірювання	мс	2	1	2
Маса	кг	9	> 5	1,8
Час напрацювання на відмову	години	3000	5000	1,667
Експлуатаційні витрати	грн.	120,00	120,00	1
Ціна	грн.	7460,00	4700,00	0,63

6.1 Оцінка наукового, технічного та економічного рівня НДДКР

Проаналізуємо рівень науково-дослідної роботи яка пов'язана з дослідженням амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів. Виходячи з відповідних вимог НТП, доцільно орієнтуватися на час проведення НДДКР - 3 роки (+1), при чому технічні показники результатів плануються на рівні кращих світових зразків (0); наявність можливості отримання авторських свідоцтв на винахід - впевненість в отриманні авторських свідоцтв (+2); а строк окупності витрат 3-4 роки (+2).

В таблиці 6.2 наведено критерії та бальна оцінка для визначення наукового та технічного рівня науково-дослідної роботи

Таблиця 6.2 – Критерії та бальна оцінка для визначення наукового, технічного та економічного рівня науково-дослідної роботи

Критерії оцінки	Шкала критеріїв	Індекс оцінки
Час, необхідний для проведення НДР	2 роки і менше	+2
	3 роки	+1
	4 роки	0
	5-6 років	-1
	7 років і більше	-2
Технічні показники результатів розробки	Вище рівня кращих світових зразків	+2
	На рівні кращих світових зразків	0
	Нижче рівня кращих світових зразків	-2
Можливості отримання авторських свідоцтв на винахід	Впевненість в отриманні авторських свідоцтв	+2
	Часткові можливості	0
	Можливості немає	-1
Строк окупності витрат	2 роки і менше	+3
	3-4 роки	+2
	5 років	0
	6-7 років	-1
	8 років і більше	-2

В таблиці 6.3 наведено можливі результати оцінки теми НДДКР.

Таблиця 6.3 – Можливі результати оцінки теми НДДКР

Сума індексів	Оцінка теми
Позитивна(+)	Розробка є досить перспективною
Задовільна(0)	Розробка перспективна
Негативна(-)	Розробка не перспективна

Проаналізувавши дані таблиць 6.2 та 6.3, та підрахувавши загальну суму балів (+1+0+2+2=+5), робимо висновок, що дана науково-дослідна робота з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів є досить перспективною.

6.1.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу результатів НДДКР. В результаті оцінювання можна зробити висновки щодо напрямів (особливостей) організації подальшого впровадження результатів з врахуванням встановленого рейтингу.

Рекомендується здійснювати оцінювання комерційного потенціалу розробки за 12-ма критеріями, наведеними в таблиці 6.4. [28]

Таблиця 6.4 - Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри- терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів

5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне значне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні дорогі та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві

11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки зведемо до таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 - Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	експерт		
	1	2	3
	Бали, виставлені експер-		
1. Технічна здійсненність концепції	4	3	4
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	3	4
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	4	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	3	4	3
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	3	2
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	4	2
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	3	2	4
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	3
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	4	5	4
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	0	0	0
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	2	3	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	3	3	3
Сума балів	36	38	36
Середньоарифметична сума балів <u>СБ</u>	<u>36,7</u>		

За даними таблиці 1.4 зробимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу дослідження. При цьому доцільно користуватися рекомендаціями, наведеними в таблиці 6.6. [28]

Таблиця 6.6 - Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ , розрахована на основі виснов-	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 - 10	Низький
11 - 20	Нижче середнього
21 - 30	Середній
31 - 40	Вище середнього
41 - 48	Високий

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 36,7 бала, що, згідно таблиці 1.5, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

6.1.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості

В процесі дослідження необхідно розглянути основні технічні показники, пристрою, що може бути спроектований в результаті проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [30]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (6.1)$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом і при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки. Відносні значення β_i для різних випадків розраховують за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (6.2)$$

де I_{ni} та I_{na} – чисельні значення конкретного i -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}. \quad (6.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та майбутньої розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Порівняння основних параметрів пристрою що проектується та аналога

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Зведена похибка вимірювання	%	3	2	1,5	0,1

Продовження таблиці 6.7 – Порівняння основних параметрів пристрою що проектується та аналога

Максимальна робоча частота	МГц	1	10	10	0,2
Час вимірювання	мс	2	1	2	0,25
Маса	кг	9	> 5	1,8	0,3
Час напрацювання на відмову	години	3000	5000	1,667	0,15

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 1,5 \cdot 0,1 + 10 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,25 + 1,8 \cdot 0,3 + 1,667 \cdot 0,15 = 3,44.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, проєктований компонент переважає існуючі аналоги приблизно в 3,44 рази.

6.1.3 Прогнозування витрат на виконання НДДКР

Для детального обґрунтування доцільності проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів необхідно здійснити попередній розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи. Для визначення суми витрат на проведення НДДКР передбачено складання приблизного кошторису цих витрат [28].

Таблиця 6.7 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	10000,00	454,55	32	14545,45
2. Ст. науковий співробітник	9300,00	422,73	22	9300,00
3. Інженер-метролог	8600,00	390,91	12	4690,91
4. Інженер-конструктор радіоелектронних систем	8500,00	386,36	22	8500,00
5. Технік	6500,00	295,45	10	2954,55
Разом				39990,91

Витрати на основну заробітну плату працівників (Z_p), що здійснюють підготовку робочих місць необхідних для досліджень, підготовку та формування інформаційних пакетів, підготовку та монтаж обладнання та макетів для НДДКР складе в межах 2500,00 грн.

Додаткова заробітна плата дослідників складе приблизно 4000,00 грн.

Нарахування на заробітну плату дослідників складуть приблизно 9000,00 грн.

Таблиця 6.8 – Витрати на основні матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Папір офісний	уп.	111,00	5	555,00
Диск оптичний	шт.	12,00	3	36,00
Канцелярія КЦП-65Ум	уп.	240,00	5	1200,00
Тека пластикова ЕКО-15	шт	75,00	6	450,00
Картридж HP25AM	шт	625,00	2	1250,00
Носій інформації 32 Gb	шт	399,00	2	798,00
Склотекстоліт СТФ 2 – 1.5 ДЕСТ 102-78	кг	135,20	0,12	16,22
Припой ПОС-61 ДЕСТ 21931-86	кг	164,00	0,11	18,04
Флюс ФКСП ОСТ	кг	120,00	0,14	16,80
Клей	кг	116,00	0,005	0,58
Ізольований провідник	кг	17,20	0,1	1,72

Продовження таблиці 6.8 – Витрати на основні матеріали

Лак	кг	196,00	0,18	35,28
Провід монтажний	кг	164,00	0,1	16,40
Всього				4394,04

Таблиця 6.9 – Витрати на комплектуючі для формування компонентів для НДДКР

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Мікросхеми	2	25,00	50,00
Мікроконтролер	1	175,00	175,00
РКІ індикатор	1	222,00	222,00
Транзистори	6	24,50	147,00
Резистори	19	15,60	296,40
Конденсатори	11	18,70	205,70
Семистори	2	22,40	44,80
Діоди	5	28,40	142,00
Всього			1282,90

Амортизація обладнання.

Таблиця 6.10 - Величина амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	25000,00	5	2	833,33
Система метрологічного аналізу	22000,00	5	2	733,33
Програмне забезпечення	10000,00	3	2	555,56
Місце оператора спеціалізоване	7500,00	5	2	250,00
Оргтехніка	12000,00	4	2	500,00
Приміщення лабораторії	400000,00	25	2	2666,67
Всього				5538,89

Таблиця 6.11 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

Найменування обладнання	Кількість годин роботи обладнання, год.	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт використання потужності	Величина оплати
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	180	0,72	0,9	339,42
Система метрологічного аналізу	150	0,3	0,9	117,86
Місце оператора спеціалізоване	180	0,32	0,9	150,85
Офісна оргтехніка	150	0,65	0,9	255,35
Генератор сигналу	100	0,08	0,9	20,95
Генератор завад	100	0,08	0,9	20,95
Всього				905,39

Інші витрати складуть в межах 92000,00 грн.

Загальні витрати на проведення досліджень стосовно дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів:

$$B = \begin{matrix} 39990,91 & 2500,00 & 4000,00 & 9000,00 & 4394,04 & 1282,90 \\ 5538,89 & 905,39 & 92000,00 & & 159612,13 & (\text{грн.}). \end{matrix}$$

6.1 4 Доцільність науково-дослідної роботи

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у практичну діяльність, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня НДДКР розраховується за формулою [29]

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (6.4)$$

де I - коефіцієнт важливості роботи, $I = 2...5$;

n - коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок;

T_c - коефіцієнт складності роботи, $T_c = 1...3$;

R - коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$;

B – вартість НДР, (тис. грн.) $B=205,3$ тис. грн;

t - час дослідження роботи, років.

Підставляючи числові дані отримаємо

$$K_p = 2^3 * 3 * 3 / (159,6 * 2 / 12) = 2,71.$$

Оскільки $K_p > 1$, тому науково-дослідну роботу з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів можна вважати економічно доцільною з достатньо високим науковим, технічним та економічним рівнем.

Висновки

Згідно проведеного аналізу рівень комерційного потенціалу розробки становить 36,7 балів, що свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього). До того ж комплексний показник рівня НДДКР ($K_p > 1$) свідчить про те, що науково-дослідну роботу з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних конту-

рів можна вважати економічно доцільною з достатньо високим науковим, технічним та економічним рівнем. Також рівень якості проєктованого компоненту в порівнянні з аналогами вищий в 3,44 рази, що додатково свідчить про позитивні перспективи, як науково-дослідної роботи так і відповідного проєктного компоненту.

6.2 Розрахунок витрат на проведення НДДКР з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів

В техніко-економічному обґрунтуванні представленому в першому розділі даної магістерської кваліфікаційної роботи було приблизно обґрунтовано доцільність проведення НДДКР. Тому в даному розділі будуть проведені більш детальні розрахунки витрат на проведення НДДКР стосовно дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

Для економічного розрахунку проведення НДДКР потрібно скласти кошторис витрат, який передбачає розрахунок визначених основних статей витрат.

Основна заробітна плата дослідників та розробників, яка розраховується за формулою [28]

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (6.5)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн.;

T_p – число робочих днів в місяці, 22 дн;

t – число днів роботи розробника (дослідника).

Проведені розрахунки зводимо до таблиці.

Таблиця 6.12– Основна заробітна плата дослідників та розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	10000,00	454,55	32	14545,45
2. Ст. науковий співробітник	9300,00	422,73	22	9300,00
3. Інженер-метролог	8600,00	390,91	12	4690,91
4. Інженер-конструктор радіоелектронних систем	8500,00	386,36	22	8500,00
5. Технік	6500,00	295,45	10	2954,55
Разом				39990,91

Витрати на основну заробітну плату працівників (Z_p), що здійснюють підготовку робочих місць необхідних для дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, підготовку та формування баз даних, підготовку та монтаж обладнання, макетів, виготовлення дослідних зразків тощо, розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання даної роботи, за формулою [28]

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \cdot K_c, \quad (6.6)$$

де t_i - норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

n - число робіт по видах та розрядах;

K_c - коефіцієнт співвідношень, який установлений в даний час Генеральною тарифною угодою між Урядом України і профспілками, $K_c = 1,75$;

C_i - погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує відповідну роботу, грн./год.

C_i визначається за формулою [28]

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (6.7)$$

де, M_n – прожитковий мінімум працездатної особи, грн., $M_n = 2197,00$ грн.;

K_i - тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;

T_p - число робочих днів в місяці, $T_p = 22$ дн;

$T_{зм}$ - тривалість зміни, $T_{зм} = 8$ годин.

Проведені розрахунки винесемо до таблиці.

Таблиця 6.13 – Витрати на основну заробітну плату працівників

Найменування робіт	Трудо- міст- кість, нормо- годин	Розряд роботи	Тариф- ний кое- фіцієнт	Погодин- на тари- фна став- ка, грн.	Величина оплати, грн.
1. Встановлення допомі- жного обладнання	8,0	2	1,1	24,03	192,24
2. Інсталяція програмного забезпечення	8,0	4	1,35	29,49	235,93
3. Встановлення модулів дослідження резонансного контур	16,0	3	1,2	26,21	419,43
4. Монтаж імітаторів за- вад	4,5	4	1,35	29,49	132,71
5. Формування бази даних результатів вимірювань	50,0	3	1,2	26,21	1310,71
6. Підготовка приміщення лабораторії	16,0	2	1,1	24,03	384,48
Разом					2675,49

Додаткова заробітна плата розробників, дослідників та працівників, які приймали участь в дослідженнях та розробці НДДКР розраховується як 12% від основної заробітної плати розробників та працівників

$$Z_d = Z_o \cdot 12 / 100\% , \quad (6.8)$$

$$Z_d = (39990,91 + 2675,49) \cdot 12 / 100 \% = 5119,97 \text{ (грн.)}$$

Нарахування на заробітну плату дослідників та працівників.

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22% від суми основної та додаткової заробітної плати

$$H_3 = (Z_o + Z_d) \cdot 22\% / 100\% , \quad (6.9)$$

$$H_3 = (39990,91 + 2675,49 + 5119,97) \cdot 22\% / 100\% = 10513,00 \text{ (грн.)}$$

Витрати на матеріали на даному етапі проведення НДДКР пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних блоків і компонентів, тому дані витрати формуються на основі як офісних витратних матеріалів так і обмеженого переліку матеріалів.

Витрати на матеріали, що були використані при проведенні досліджень, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою [28]

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i , \quad (6.10)$$

де, - H_i - витрати матеріалу i -го найменування, кг;

C_i - вартість матеріалу i -го найменування, грн./кг.;

K_i - коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = 1,1$;

n - кількість видів матеріалів,

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 6.14.

Таблиця 6.14– Витрати на основні матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Папір офісний	уп.	111,00	5	555,00
Диск оптичний	шт.	12,00	3	36,00

Продовження таблиці 6.14– Витрати на основні матеріали

Канцелярія КЦП-65Ум	уп.	240,00	5	1200,00
Тека пластикова ЕКО-15	шт	75,00	6	450,00
Картридж HP25AM	шт	625,00	2	1250,00
Носій інформації 32 Gb	шт	399,00	2	798,00
Склотекстоліт СТФ 2 – 1.5 ДЕСТ 102-78	кг	135,20	0,12	16,22
Припой ПОС-61 ДЕСТ 21931-86	кг	164,00	0,11	18,04
Флюс ФКСП ОСТ	кг	120,00	0,14	16,80
Клей	кг	116,00	0,005	0,58
Ізольований провідник	кг	17,20	0,1	1,72
Лак	кг	196,00	0,18	35,28
Провід монтажний	кг	164,00	0,1	16,40
Всього				4394,04

З врахуванням транспортних витрат вартість матеріалів складе

$$M = 4394,04 * 1,1 = 4833,45 \text{ грн.}$$

Витрати на комплектуючі (основне обладнання, емулятори, моделі, комплектуючі макетів), що були використані при дослідженні амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, розраховуються за формулою

$$H = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (6.11)$$

де: H_i - кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i - покупна ціна комплектуючих i -го виду, грн.;

K_i - коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = 1,11$;

n - кількість видів матеріалів.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 6.15.

Таблиця 6.15– Витрати на комплектуючі для формування компонентів для НДДКР

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Мікросхеми	2	25,00	50,00
Мікроконтролер	1	175,00	175,00
РКІ індикатор	1	222,00	222,00
Транзистори	6	24,50	147,00
Резистори	19	15,60	296,40
Конденсатори	11	18,70	205,70
Семистори	2	22,40	44,80
Діоди	5	28,40	142,00
Всього			1282,90

Витрати на комплектуючі з урахуванням транспортних витрат складають

$$H = 1282,90 \cdot 1,11 = 1424,02 \text{ (грн.)}$$

Амортизація обладнання для проведення досліджень.

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_г} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (6.12)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, приміщень тощо, які використовувались для розробки нового технічного рішення, грн.;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, приміщень під час розробки, місяців;

$T_г$ – строк корисного використання обладнання, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці 6.16.

Таблиця 6.16 - Величина амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	25000,00	5	2	833,33
Система метрологічного аналізу	22000,00	5	2	733,33
Програмне забезпечення	10000,00	3	2	555,56
Місце оператора спеціалізоване	7500,00	5	2	250,00
Оргтехніка	12000,00	4	2	500,00
Приміщення лабораторії	400000,00	25	2	2666,67
Всього				5538,89

Витрати на силову електроенергію на проведення досліджень розраховують за формулою [28]

$$V_e = V \cdot P \cdot \Phi \cdot K_n, \quad (6.13)$$

де, V – вартість 1 кВт-години електроенергії, $V = 2,91$ грн./кВт – година;

P – встановлена потужність обладнання, кВт.;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. ;

K_n – коефіцієнт використання потужності.

Всі проведені розрахунки зведемо до таблиці 6.17.

Таблиця 6.17 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

Найменування обладнання	Кількість годин роботи обладнання, год.	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт використання потужності	Величина оплати
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	180	0,72	0,9	339,42

Продовження таблиці 6.17 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

Система метрологічного аналізу	150	0,3	0,9	117,86
Місце оператора спеціалізоване	180	0,32	0,9	150,85
Офісна оргтехніка	150	0,65	0,9	255,35
Генератор сигналу	100	0,08	0,9	20,95
Генератор завад	100	0,08	0,9	20,95
Всього				905,39

Інші витрати охоплюють: загальновиробничі витрати, адміністративні витрати, витрати на відрядження, матеріали, окремі непередбачені витрати, зв'язок, витрати на інтернет-послуги тощо.

Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників. Величина інших витрат складе

$$I = (39990,91 + 2675,49) \cdot 220\% / 100\% = 93866,07 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи.

Сума всіх попередніх статей витрат дає загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи

$$B = 39990,91 + 2675,49 + 5119,97 + 10513,00 + 4394,04 + 1424,02 + 5538,89 + 905,39 + 93866,07 = 164427,78 \text{ (грн.)}$$

6.2.1 Визначення коефіцієнта наукової значимості отриманих результатів науково-дослідної роботи

Коефіцієнт наукової значимості результатів проведеної НДР $K_{ЗН}$ можна підрахувати за формулою

$$K_{ЗН} = \frac{\sum_1^3 b_i \cdot d_i}{\sum_1^3 b_{\max} \cdot d_i}, \quad (6.14)$$

де b_i - значимість отриманих результатів: b_1 - ступінь наукової новизни, b_2 - рівень теоретичної обґрунтованості, b_3 - ступінь експериментальної перевірки результатів.

Бальна оцінка отриманих результатів наведена в таблиці .

Максимальне значення отриманих результатів можна прийняти в межах 7...10 балів;

d_i - питома вага кожної характеристики, значення якої наведено в таблиці;

3 – кількість характеристик, за якими була зроблена оцінка результатів науково-дослідної роботи.

Таблиця 6.18 – Показники для оцінювання наукової значимості результатів виконання НДР

Характеристики	Питома вага характеристик	Бальна оцінка характеристик		
		Ступінь новизни b_1	Рівень теоретичної обґрунтованості b_2	Ступінь експериментальної перевірки результатів b_3
		1	3...5	7...10
b_1	0,500	Часткове удосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо	Суттєве удосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо	Нові напрямки в розробці виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо. Створення принципово нової техніки
b_2	0,333	Позитивне рішення на основі зроблених узагальнень	Установлення залежностей, які використовувались в інших випадках	Відкриття нових шляхів рішення задачі
b_3	0,167	Експериментальна перевірка не робилась	Результати перевірялись на невеликій кількості даних	Результати перевірені на великій кількості даних

Підставляючи числові дані $d_1 = 0,5$, $d_2 = 0,333$, $d_3 = 0,167$, $b_1 = 3$, $b_2 = 7$, $b_3 = 7$, $b_{\max} = 10$ у вираз () оцінимо наукову значимість отриманих результатів

$$K_{3H} = \frac{b_1 \cdot 0,5 + b_2 \cdot 0,333 + b_3 \cdot 0,167}{10 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,333 + 10 \cdot 0,167} = 0,50$$

6.2.2 Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР

Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР можна розрахувати за формулою

$$V = \frac{k_{ТВІ} \cdot Z_i}{\sum_1^n k_{ТВІ} \cdot Z_i}, \quad (6.15)$$

де $k_{ТВІ}$ - коефіцієнт творчої участі кожного виконавця НДР, який оцінюється наступним чином: проведення досліджень – 3 бали, робоче проектування – 1,5 бали, освоєння – 1,0 балів.

Якщо виконавець приймав участь в декількох видах робіт, то береться сума відповідних балів;

Z_i - заробітна плата кожного виконавця НДР;

n - кількість всіх виконавців НДР.

Таблиця 6.19 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Коефіцієнт творчої участі
1. Керівник проекту	10000,00	3
2. Ст. науковий співробітник	9300,00	1,5
3. Інженер-метролог систем телефонії	8600,00	3
4. Дослідник (проектувальник)	8500,00	4,5
5. Технік	6500,00	1

Розраховуємо внесок дослідника

$$V = (4,5 \cdot 8500,00) / (3 \cdot 10000,00 + 1,5 \cdot 9300,00 + 3 \cdot 8600,00 + 1 \cdot 6500,00) = 0,50.$$

Висновки

Загалом запланована науково-дослідна робота з проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів вимагає грошового вкладення для виконання в межах 164427,78 грн.

Отримані результати досліджень мають високий рівень наукової значимості (в межах 0,50), що свідчить про доцільність проведення розробок та значимість науково-дослідної роботи з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення захисту працівників під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які справляють негативний вплив на здоров'я, життя та працездатність людини, гарантування належних умов праці є важливими завданнями охорони праці, як складової безпеки життєдіяльності.

У даному розділі наводиться розгляд небезпечних, шкідливих [31] і уражаючих для людини та оточуючого довкілля факторів, які утворюються під час проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів. Тут розглядаються, в тому числі, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів вібропоглинання, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

7.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

7.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

Згідно із [32] допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для теплого та холодного періодів року наведені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іа	21-25	18-26	75	≤0,1
Теплий		22-28	20-30	55 при 28°С	0,1-0,2

Для опромінення менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення – 100 Вт/м².

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони і підпадає під систематичний контроль з метою запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – ГДК шкідливих речовин [34]

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

При роботі з ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, які знаходяться у повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів мають відповідати [34] і приведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Число іонів в 1 см³ повітря приміщення під час роботи на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

З метою встановлення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату і складу повітря робочої зони запропоновано такі заходи:

- 1) у приміщенні має бути розміщена система кондиціонування для теплого і опалення для холодного періодів року;
- 2) застосування вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

7.1.2 Виробниче освітлення

З метою створення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях значні вимоги висуваються до кількісних та якісних параметрів освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, де проводиться робота з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, відповідно до [33] визначаємо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Приймаємо контраст об'єкта з фоном – середній, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд *в*.

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості для штучного освітлення приведені в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення та мінімальні освітленості для штучного освітлення

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	<i>в</i>	середній	середній	400	200	200	1,5	0,9

Оскільки приміщення розташоване у м. Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а світлові проєкти розташовані за азимутом 180° , то для таких умов КЕО визначатиметься за формулою [33,3 4]

$$e_N = e_H m_N [\%], \quad (7.1)$$

де e_H – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями одержимо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N, б} = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%);$$

$$e_{N, с} = 0,9 \cdot 0,85 = 0,77 (\%).$$

З метою встановлення нормативних значень показників освітлення передбачено такі заходи:

- 1) за недостатнього природного освітлення у світлу пору доби доповнення штучним завдяки використанню газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;
- 2) використання штучного освітлення в темну пору доби.

7.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого обладнання використовується устаткування, робота якого супроводжується шумом та вібрацією, необхідно передбачити захист від шуму та вібрації.

Визначено, що приміщення, в якому відбувається робота з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів може мати робочі місця із шумом та

вібрацією, що спричиняється вентиляторами блоку живлення ЕОМ та кулерами мікропроцесора, відеоадаптера.

Для запобігання травмуванню працюючих від дії шуму він підпадає під нормування. Основним документом з питань виробничого шуму, що діє в нашій країні, є [35], у відповідності з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в виробничих приміщеннях не повинні перевищувати значень, що приведені в таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Нормовані рівні шуму та еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку і еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 7.6 для локальної вібрації.

Таблиця 7.6 – Нормовані рівні вібрації [36]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц								Коректовані рівні віброприскорення, дБА
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
73	73	79	85	91	97	103	109	76

З метою забезпечення нормованих показників шуму та вібрації в приміщенні передбачено такі заходи:

- 1) вібропоглинання;
- 2) передбачено використовувати в приміщенні штори із щільної тканини.

Виконати розрахунок вібропоглинання з коефіцієнтом тертя $f_{mp} = 0,55$, якщо частота вібрації $\nu = 80$ Гц, амплітуда $x = 0,05$ мм.

Ефективність вібропоглинання визначається за формулою

$$\Delta L = L_1 - L_2 \text{ [дБ]}, \quad (7.2)$$

де L_1, L_2 – рівні віброприскорення без використання вібропоглинання та з використання вібропоглинання, відповідно, дБ.

Рівні віброприскорення визначається за формулою

$$L_i = 20 \lg \frac{a_i}{a_0} \text{ [дБ]}, \quad (7.3)$$

де a_i – віброприскорення, мм/с²;

a_0 – опорне значення віброприскорення ($a_0 = 0,3$ мм/с²), мм/с².

З метою визначення значень віброприскорень необхідно записати спрощене рівняння коливальної системи при гармонійному законі діючої сили

$$ma + f_{mp}mg = F \sin(2\pi vt), \quad (7.4)$$

де m – маса коливальної системи, кг;

f_{mp} – коефіцієнтом тертя;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

F – діюча сила, Н;

v – частота вібрації, Гц;

t – час, с.

З рівняння (7.4) для випадку без використання вібропоглинання ($f_{mp} = 0$) та з використання вібропоглинання ($f_{mp} > 0$) віброприскорення визначається за формулами

$$a_1 = \frac{F \sin(2\pi vt)}{m} \text{ [мм/с}^2\text{]}, \quad (7.5)$$

$$a_2 = \frac{F \sin(2\pi vt)}{m} - f_{mp}g = a_1 - f_{mp}g \text{ [мм/с}^2\text{]}. \quad (7.6)$$

Значення віброприскорення a_1 можна визначити за формулою

$$a_1 = 4\pi^2 v^2 x \text{ [мм/с}^2\text{]}, \quad (7.7)$$

де x – амплітуда коливань, мм.

Після підстановки відомих значень у формули (7.7, 7.6, 7.3, 7.3, 7.2), отримаємо

$$a_1 = 4 \cdot 3,14^2 \cdot 80^2 \cdot 0,05 = 12620,3 \text{ (мм/с}^2\text{)};$$

$$a_2 = 12620,3 - 0,55 \cdot 9800 = 7230,3 \text{ (мм/с}^2\text{)};$$

$$L_1 = 20 \lg \frac{12620,3}{0,3} = 191,99 \text{ (дБ)};$$

$$L_2 = 20 \lg \frac{7230,3}{0,3} = 165,95 \text{ (дБ)};$$

$$\Delta L = 191,99 - 165,95 = 26,04 \text{ (дБ)}.$$

Отже, ефективність вібропоглинання складає 26,04 дБ.

7.1.4 Виробничі випромінювання

Величина напруженості електромагнітного поля на робочих місцях з персональними ЕОМ не повинні перевищувати граничнодопустимі, які складають 20 кВ/м.

Експозиційна доза рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від екрана до корпусу монітора при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинні перевищувати $7,74 \cdot 10^{-12}$ Кл/кг, що відповідає потужності еквівалентної дози 0,1 мБер/год (100 мкР/год) у відповідності до [44].

Для гарантування захисту і досягнення нормованих рівнів випромінювань необхідно застосовувати приєкранні фільтри, локальні світлофільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

7.2 Промислова та пожежна безпека під час проведення дослідження

Сучасний етап розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень характеризується широким використанням на робочому місці ЕОМ. Велика кількість прикладних програм перетворює ЕОМ на основне знаряддя праці радіоінженера.

7.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Робочі місця з відеодисплейним терміналом повинні розташовуватись на відстані не менше як 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін – на відстані 1 м, між собою на віддалі не менше як 1,5 м. У випадку розміщення робочих місць потрібно виключити ймовірність прямого засвічування екрану джерелом природного освітлення. Робоче місце раціонально розміщати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно з лівого [37].

Поверхня екрана має розташовуватись на відстані 400-700 мм від очей працівника. Висота робочої поверхні столу при виконанні роботи сидячи має регулюватися у діапазоні 680-800 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше як 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм та на рівні витягнутої ноги не менше як 650 мм [38].

7.2.2 Електробезпека

Причинами ураження електричним струмом у цьому приміщенні можуть бути: робота під напругою при ремонтних роботах, несправність устаткування, випадковий дотик до струмоведучих частин або металевих частин, що опинилися під напругою. Згідно [39] це приміщення відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності значної (понад 75 %) вологості. Через це безпека

експлуатації електрообладнання повинна гарантуватись комплексом заходів, що передбачають застосування ізоляції струмоведучих частин, захисних блокувань, захисного заземлення тощо [40].

7.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [41] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, відноситься до категорії пожежної небезпеки Б. Це приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення [41]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
2	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	REI 15 M0	R 30 M0

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см.

В таблиці 7.8 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Таблиця 7.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [43]

Об'єм приміщення, тис. м ³	Категорія пожежної безпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, для щільності людського потоку в загаль- ному проході, осіб/м ²			Кількість людей на 1 м ширини евакуовиходу	Протипожежні розриви, м, для ступеня їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Площа поверху в межах пожежного відсіку, м ² , для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і біль- ше
до 15	Б	2	40	25	15	45	9	9	12	6	н.о.	–	–

Примітки: н.о. – не обмежується.

Вибираємо, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження, має бути обладнане двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [42].

7.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи стенду «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів» в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Дія радіації на матеріали та обладнання залежить в основному від виду випромінювання, дози опромінення, умов навколишнього середовища. Найбільш чутливе до дії іонізуючого випромінювання електронне обладнання. В начинні діагностичного стенду таким обладнанням є: блок живлення, тиристори, діоди. Через це в блоках стенду можливі замикання, а відповідно і загорання електропроводки. В результаті опромінення системи в регуляторах змінюється струм і коефіцієнти підсилення; в конденсаторах знижується напруга пробою і опір витoku, змінюється провідність і внутрішнє нагрівання. В ізоляційних і діелектричних матеріалах змінюються такі параметри як електрична та діелектрична провідність.

Дія електромагнітного імпульсу на обладнання діагностичного стенду може призвести до загорання чутливих електричних та електронних елементів, зокрема транзисторів, а також до серйозних порушень в цифрових і контрольних пристроях. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Саме тому є необхідність запобігання при дії цього фактору на електричне та електронне обладнання.

7.3.1 Дослідження стійкості роботи стенду «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів» в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій стійкості роботи стенда, що розробляється, приймається допустима доза $D_{дон}(P)$ або граничне значення рівня радіації $P_{гр}(P/200)$, при яких система буде нормально працювати.

Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{грi}$, для елементної бази діагностичного стенду, при яких виникають незворотні зміни. Отримані дані заносимо в таблицю 7.9.

Таблиця 7.9 – Граничні значення експозиційних доз елементів стенду

Елементи стенду	$D_{гр i}, P$	$D_{гр}, P$
Інтегральні схеми	5×10^5	10 ⁴
Резистори	10 ⁷	
Транзистори	10 ⁴	
Напівпровідники	10 ⁵	
Конденсатори	10 ⁷	
Діоди	10 ⁴	

По мінімальному значенню допустимої дози, при якій в елементній базі виникають необоротні зміни, визначаємо границю стійкості роботи РЕА в цілому. Проаналізувавши дані таблиці 7.9, робимо висновок, що самим уразли-

вим елементом системи з мінімальною дозою $D_{zp}=10^4$ Р є транзистори та діоди. Визначаємо можливу дозу опромінення за формулою

$$D_m = \frac{2 \cdot P_1 (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{ocл}}, \quad (7.8)$$

де P_1 – максимальне значення рівня радіації ($P_1 = 7,72$ Р/год);

t_k – час кінця опромінення ($t_k = 131400$ год (15 років));

t_n – час початку опромінення ($t_n = 1$ год);

$K_{ocл}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{ocл} = 2$).

$$D_m = \frac{2 \cdot 7,72 (\sqrt{131400} - \sqrt{1})}{2} = 2791(\text{Р}).$$

Оскільки $D_{zp} > D_m$, то дана система стенда «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів» стійка до дії радіації. Визначимо допустимий час роботи РЕА в заданих умовах за формулою

$$t_d = \frac{D_{zp} \cdot K_{ocл} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1}, \quad (7.9)$$

$$t_d = \frac{10^4 \cdot 2 + 2 \cdot 7,72 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 7,72} = 1296,34 \text{ (год)}.$$

Можлива доза опромінення елементної бази $D_m = 2791$ Р, а допустима - 10^4 Р, отже, система стенда «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів» є стійкою в умовах дії іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи стенда в заданих умовах становить 1296,34 год., при рівні радіації 7,72 Р/год.

7.3.2 Дослідження стійкості роботи стенда «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів » в умовах дії електромагнітного імпульсу

При оцінці впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) на струмопровідні елементи необхідно врахувати, що ЕМІ має горизонтальну та вертикальну складові напруженостей електричного поля і тому повинні визначатися значення напруг на вертикальних та горизонтальних ділянках ліній. Так як для живлення силового обладнання використовується мережа живлення змінної напруги 220 В, а кола управління – постійної 24 В, то проведемо розрахунок стійкості роботи для обох мереж живлення. Напруга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині

$$U_z = E_g \cdot L_z, \quad (7.10)$$

де E_g – величина вертикальної складової напруженості електромагнітного поля ($E_g = 9,59 \cdot 10^3$ В/м);

L_z – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи ($L_r = 1,482$ м).

$$U_z = 9,59 \cdot 10^3 \cdot 1,482 = 14250 \text{ (В)},$$

$$U_g = E_z \cdot L_g, \quad (7.11)$$

де E_z – величина вертикальної складової напруженості електромагнітного поля (В/м);

L_g – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи ($L_b = 2,1$ м).

Визначаємо горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля

$$E_z = E_g \cdot 10^{-3}, \quad (7.12)$$

$$E_z = 9,59 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 9,59 \text{ (В/м)},$$

$$U_g = 9,59 \cdot 2,1 = 20,139 \text{ (В)}.$$

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення для різних блоків

$$U_{\text{дон}} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N, \quad (7.13)$$

де N – відсоток допуску ($N=5\%$ і 10%).

Для силового кола ($U_{\text{жс}} = 220 \text{ В}$), $U_{\text{дон}} = 242 \text{ (В)}$.

Для кола управління (5 В), $U_{\text{дон}} = 5,68 \text{ (В)}$.

Коефіцієнт безпеки визначається за формулою

$$K\bar{\sigma}_{z(\theta)} = 201\text{г} \cdot \frac{U_{\text{дон}}}{U_{z(\theta)}} \geq 40 \text{ [дБ]}, \quad (7.14)$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для силового кола ($U_{\text{жс}} = 220 \text{ В}$):

- вертикальної: $K\bar{\sigma}_g = 60,89 \text{ (дБ)}$,
- горизонтальної: $K\bar{\sigma}_z = -71,51 \text{ (дБ)}$.

Визначаємо коефіцієнти безпеки для кола управління ($U_{\text{жс}} = 5 \text{ В}$):

- вертикальної: $K\bar{\sigma}_g = 5,64 \text{ (дБ)}$,
- горизонтальної: $K\bar{\sigma}_z = -96,75 \text{ (дБ)}$.

Отримані дані заносимо в таблицю 7.10.

Таблиця 7.10 – Значення коефіцієнтів безпеки стенда «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів»

№	Найменування блоків	$K\bar{b}_e$	$K\bar{b}_z$	Результат дії
1	Силове коло, 220 В	60,89	-71,51	Нестійке
2	Основний блок, 5 В	5,64	-96,75	Нестійке

Отже електрична частина стенду є нестійкою в умовах впливу електромагнітного імпульсу. Для підвищення стійкості роботи обладнання, слід застосувати пасивне екранування.

7.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи стенду «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів » в умовах надзвичайних ситуацій

Щоб визначити якої товщини необхідно застосувати екран, знайдемо перехідне затухання екрану

$$A = K\bar{b}_{ном} - K\bar{b}_{мін} , \quad (7.15)$$

де $K\bar{b}_{ном}$ – номінальний коефіцієнт безпеки ($K\bar{b}_{ном} = 40$ дБ);

$K\bar{b}_{мін}$ – мінімальний коефіцієнт безпеки отриманий під час розрахунків.

Для силового кола ($U_{жс} = 220$ В)

$$A_{220В} = 40 + 71,51 = 111,51 \text{ (дБ)}.$$

Для основного блоку ($U_{жс} = 5$ В)

$$A_{5B} = 40 + 96,75 = 136,75 \text{ (дБ)}.$$

Товщину захисного екрану знайдемо за формулою

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (7.18)$$

де A – перехідне затухання екрану;

f – найбільш характерна частота (15 кГц).

Отже, для обладнання силового кола товщина екрану

$$t_{220B} = \frac{111,51}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,175 \text{ (см)},$$

Для обладнання основного блоку товщина екрану

$$t_{5B} = \frac{131,75}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,179 \text{ (см)}.$$

Отже, в результаті дослідження стійкості роботи стенду в умовах дії іонізуючих випромінювань було розраховано можливу дозу опромінення елементної бази, яка по своїй величині значно менша від допустимої. Отже, в умовах впливу іонізуючого випромінювання система стенду залишається стійкою. Тому іонізуюче випромінювання для обладнання не є таким небезпечним, як для обслуговуючого персоналу, для якого потрібно буде розраховувати робочі зміни з врахуванням їх граничної дози опромінення.

До дії ЕМП обладнання стенду виявилось нестійким. Для підвищення стійкості роботи стенда «Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів» необхідно застосувати екранування з товщиною сталюого екрану близько 1,8мм.

Висновки до розділу

В результаті написання цього розділу було розглянуто такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів вібропоглинання, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, безпека у надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи було досягнуто мету роботи - розроблено амплітудно-фазовий метод і засіб для вимірювання параметрів резонансних контурів, що має невелику масу, незначну вартість, невелику похибку вимірювання і можуть використовуватися для контролю таких параметрів в широкому діапазоні частот. Принцип дії роботи вимірювача базується на амплітудно-фазовому методі вимірювання параметрів резонансних контурів, суть якого полягає в тому, що потрібно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами – на деякому зразковому елементі та власне резонансному контурі, а також вимірювання відношення амплітуд цих напруг.

У порівнянні з іншими серійними вимірювачами параметрів елементів електричних кіл, які побудовані на аналоговій елементній базі, розроблений у дипломному проекті пристрій побудований на сучасній цифровій елементній базі, що дає змогу добитися високої точності при вимірюванні параметрів резонансних контурів.

З врахуванням поставлених у технічному завданні вимог було обґрунтовано вибір та розробку структурної схеми, по якій і спроектовано електричну схему амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів. Проведено ряд електричних розрахунків каскадів пристрою, результати яких підтвердили можливість реалізації необхідних функцій на основі вибраних схемних рішень. А моделювання емітерного повторювача у схемному редакторі Electronics Workbench v.5.0с підтвердили правильність проведених електричних розрахунків.

В економічній частині МКР були отримані такі результати. Загалом запланована науково-дослідна робота з проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів вимагає грошового вкладення для виконання в межах 164427,78 грн.

Отримані результати досліджень мають високий рівень наукової значимості (в межах 0,50), що свідчить про доцільність проведення розробок та значимість науково-дослідної роботи з дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

У розділі Охорони праці та безпеки у надзвичайних ституаціях було розглянуто такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів вібропоглинання, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів, безпека у надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кукуш В.Д. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
2. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 351 с.
3. Высокоточные угловые измерения//Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В.Меськин и др.; Под ред. Ю.Г. Якушенкова, – М.: Машиностроение, 1987. – 480 с.
4. Галахова О.П., Колтик Е.Д., Кравченко С.А. Основы фазометрии. – Л.: Энергия, 1976. – 256 с.
5. Методы электрических измерений//Под ред. Э.И. Цветкова. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
6. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценки погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
7. Измерения в промышленности. Справочное издание. В 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы. Пер. с нем.//Под ред. Профоса П. – М.: Metallurgia, 1990. – 492 с.
8. Справочник по радиоизмерительным приборам. Т. 2. Измерение частоты, времени и мощности. Измерительные генераторы//Под ред. В.С. Насонова. – М.: Советское радио, 1978. – 272 с.
9. Аппаратура для частотных и временных измерений//Под ред. А.П. Горшкова. – М.: Советское радио, 1971. – 336 с.
10. Жилинскас Р.–П.П. Измерители отношения и их применение в радиоизмерительной технике. – М.: Советское радио, 1975. – 320 с.
11. Рудик А.В. Амплітудно – фазовий метод вимірювання параметрів резонансних контурів//Контроль і управління в складних системах: Тези доповіді 6 – ої міжнародної НТК. – Вінниця. – 2001. – С. 100.
12. Рудик А.В., Возняк О.М., Барановський І.В. Амплітудно – фазовий метод вимірювання параметрів високочастотних резонансних кон-

турів//Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. Випуск 2/2001 (11). – Кременчук. – 2001. – С.137-143.- с. 137.

13. Семенов А.О., Садлій Ю.О., Кичак А.О., Громик В.В., Семенюк Ю.М. Простий транзисторний автогенератор електричних коливань детермінованого хаосу. Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи». 11-30 травня 2019 року, м. Вінниця. С. 1-4.

14. Семенов А.О., Садлій Ю.О., Семенюк Ю.М. Метод дискретної лічби для автоматизованого вимірювання параметрів радіотехнічних резонансних контурів. Збірник матеріалів III Всеукраїнській науково-практична інтернет-конференція "Інформаційно-комп'ютерні технології: стан, досягнення та перспективи розвитку", 26-27 листопада 2020 р., м. Житомир. – С. 1-2.

15. Семенов А.О., Садлій Ю.О., Семенюк Ю.М. Мостовий метод вимірювання параметрів радіотехнічних резонансних контурів. Збірник матеріалів III Всеукраїнської науково-технічної конференції "Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення", 26-27 листопада 2020 р., м. Житомир. – С. 1-2.

16. Электронные приборы: Учебник для вузов/Под ред. Г.Г. Шишкина. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 496 с.

17. Гершунский Б.С. Справочник по расчету электронных схем. – М.: Связь, 1983. – 376 с.

18. Измеритель L, C, R универсальный E7 – 11. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1985.

19. Скрипник Ю.А., Макарышева Е.Л. Цифровой фазовый куметр низкочастотных элементов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 1997. - №1. - с. 93-96.

20. Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. – К.: Техника, 1985. – 151 с.

21. Рудик А.В., Павлов С.М. До визначення основних параметрів варикапів//Вісник ВПІ. – 2002. – №3. – С. 68 – 73.

22. Рудик А.В. Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів//Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино– та приладобудуванні: Тези доповіді 4-ї НТК. – Тернопіль. – 2000. – С. 81.

23. Рудик, А. В. Резонансний метод визначення добротності варикапів / А. В. Рудик, С. М. Павлов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 3. – С. 81-85.

24. Рудик, А. В. Високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання вологості речовин / А. В. Рудик, О. М. Возняк, Р. А. Анфілов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 1. – С. 163-169.

25. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів резонансних контурів / А. В. Рудик, А. О. Семенов, О. О. Семенова // Вісник Інженерної академії України. – 2013. – № 2. – С. 276-281.

26. Рудик, А. В. Застосування амплітудно-фазового методу для вимірювання вологості речовин / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – № 2 (31). – С. 29-35.

27. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів / А. В. Рудик, В. П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – № 2. – С. 198-204.

28. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами наукового напрямку економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. В.О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 22 с.

29. Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 75с.

30. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

31. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

32. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
33. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
34. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
35. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
36. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
37. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
38. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.
39. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
40. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
41. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
42. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
43. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
44. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), МОЗ України. – К., 1997.

Додаток А
(обов'язковий)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри РТ ВНТУ,
д.т.н., професор
_____ О.В. Осадчук
“ 26 ” ____ 09 ____ 2020 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

«Дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів»

08-36.МКР.014.00.000 ТЗ

Керівник роботи:
_____ д.т.н., професор Семенов А.О.
“ ____ ” _____ 2020 р.

Розробив студент гр. РТ-19м
_____ Садлій Ю.О.
“ ____ ” _____ 2020 р.

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 214 “25 ” 09 2020 року та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “03” вересня 2020 р.

Дата закінчення: “10” грудня 2020 р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою роботи є розробка амплітудно-фазового методу та засобу для вимірювання параметрів резонансних контурів, що має невелику масу, незначну вартість, невелику похибку вимірювання і можуть використовуватися для контролю таких параметрів в широкому діапазоні частот.

Об’єкт дослідження – процес модельного дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

Предметом дослідження є амплітудно-фазові методи та математичні моделі для вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

Задачами досліджень магістерської кваліфікаційної роботи є:

- провести аналіз сучасних методів вимірювання енергетичних і селективних параметрів і характеристик радіотехнічних резонансних контурів;
- здійснити вибір методу вимірювання енергетичних і селективних параметрів і характеристик радіотехнічних резонансних контурів;
- розробити амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів;
- здійснити моделювання та експериментальне дослідження амплітудно-фазових методів вимірювання добротності реактивних елементів радіотехнічних коливальних контурів.

3. ДЖЕРЕА РОЗРОБКИ

1. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 351 с.
2. Высокоточные угловые измерения // Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин и др.; Под ред. Ю.Г. Якушенкова, – М.: Машиностроение, 1987. – 480 с.
3. Методы электрических измерений // Под ред. Э.И. Цветкова. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
4. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценки погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
5. Измерения в промышленности. Справочное издание. В 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы. Пер. с нем.//Под ред. Профоса П. –М.: Металлургия, 1990. – 492 с.
6. Справочник по радиоизмерительным приборам. Т. 2. Измерение частоты, времени и мощности. Измерительные генераторы//Под ред. В.С. Насонова. – М.: Советское радио, 1978. – 272 с.
7. Аппаратура для частотных и временных измерений//Под ред. А.П. Горшкова. – М.: Советское радио, 1971. – 336 с.
8. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
9. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
10. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
11. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
12. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
13. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

4. ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки, студент групи РТ-19м Садлій Ю.О.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується реалізувати .

5.1 Призначення амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів:

- робота в широкому діапазоні частот 10 кГц...10 МГц (з коефіцієнтом перекриття 1000);
- вимірювання добротності та характеристичного опору реактивних елементів радіотехнічних резонансних контурів;
- забезпечення точності вимірювання зі зведеною похибкою не більше 2.0%.

5.2 Технічні вимоги до амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів:

- | | |
|--|--|
| – діапазон робочих частот | 0,01 ... 10 МГц |
| – діапазон вимірювання добротності | 0,1 ... 200 |
| – діапазон вимірювання характеристичного опору | 0.01...10 кОм |
| – зведена похибка вимірювання, не більше | 2.0% |
| – час вимірювання, не більше | 1 с |
| – споживана потужність, не більше | 7 ВА |
| – живлення пристрою має відбуватися від джерела живлення ЕОМ з напругами | $\pm 5\text{В}$ |
| – рівні вхідних та вихідних сигналів мають відповідати рівням ТТЛ | $U^0 < 0,5 \text{ В}; U^1 > 2,5 \text{ В}$ |
| – вид обміну інформацією | паралельний |
| – інформаційна ємність даних | 8 біт |
| – вид передачі даних | неперервний |

– час готовності до роботи, не більше 1 хв.

5.3 Конструктивні вимоги:

- маса пристрою, не більше 2 кг
- габаритні розміри, не більше 200×80×120 мм
- пристрій має вписуватися в сучасний дизайн комп'ютерної техніки
- конструкція пристрою має бути блочною для покращення ремонтпридатності

5.4 Експлуатаційні вимоги:

- час неперервної роботи в робочих умовах, не менше 8 год
- час наробки на відмову, не менше 4000 год
- термін роботи, не менше 10 років
- технічний ресурс, не менше 10000 год

5.5 Кліматичні умови експлуатації

- температурний діапазон в робочій зоні (0 ... 40)°C
- відносна вологість повітря в робочій зоні (0 ... 80)%
- атмосферний тиск повітря в робочій зоні (700...800) мм.рт.ст.

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2020	14.09.2020	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2020	21.09.2020	Аналіз літературних джерел. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2020	25.09.2020	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження теми Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09. 2020	09.10. 2020	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1-2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2020	25.10. 2020	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3-5
6.	Розділ моделювання	26.10. 2020	04.11. 2020	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	05.11. 2020	15.11. 2020	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	16.11. 2020	19.11. 2020	Економічна частина	Розділ 6
9.	Охорона праці (ОП)	19.11. 2020	22.11. 2020	Частина БЖД	Розділ 7
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11. 2020	29.11. 2020	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормоконтроль	30.11. 2020	01.12. 2020	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12. 2020	04.12. 2020	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	11.12. 2020	14.12. 2020	Позитивний захист	Протокол ЕК

7. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи буде зроблено:

- Розроблено еквівалентні схеми та математичні моделі реактивних елементів радіотехнічних резонансних контурів.
- Розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів.
- Розроблено електричну схему амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів.
- Розроблено конструкторську документацію на амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів.
- Результати комп'ютерного моделювання каскадів амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів.

Очікуваний економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень та розробки очікується підвищення добротності реактивних елементів радіотехнічних резонансних контурів у заданому діапазоні частот.

8. МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9. ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання роботи повинна містити:

- еквівалентні схеми та математичні моделі реактивних елементів радіотехнічних резонансних контурів;
- структурна схема амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів;
- електрична схема амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів;
- конструкторська документація на амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів;
- результати комп'ютерного моделювання каскадів амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів;
- дослідження питань охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

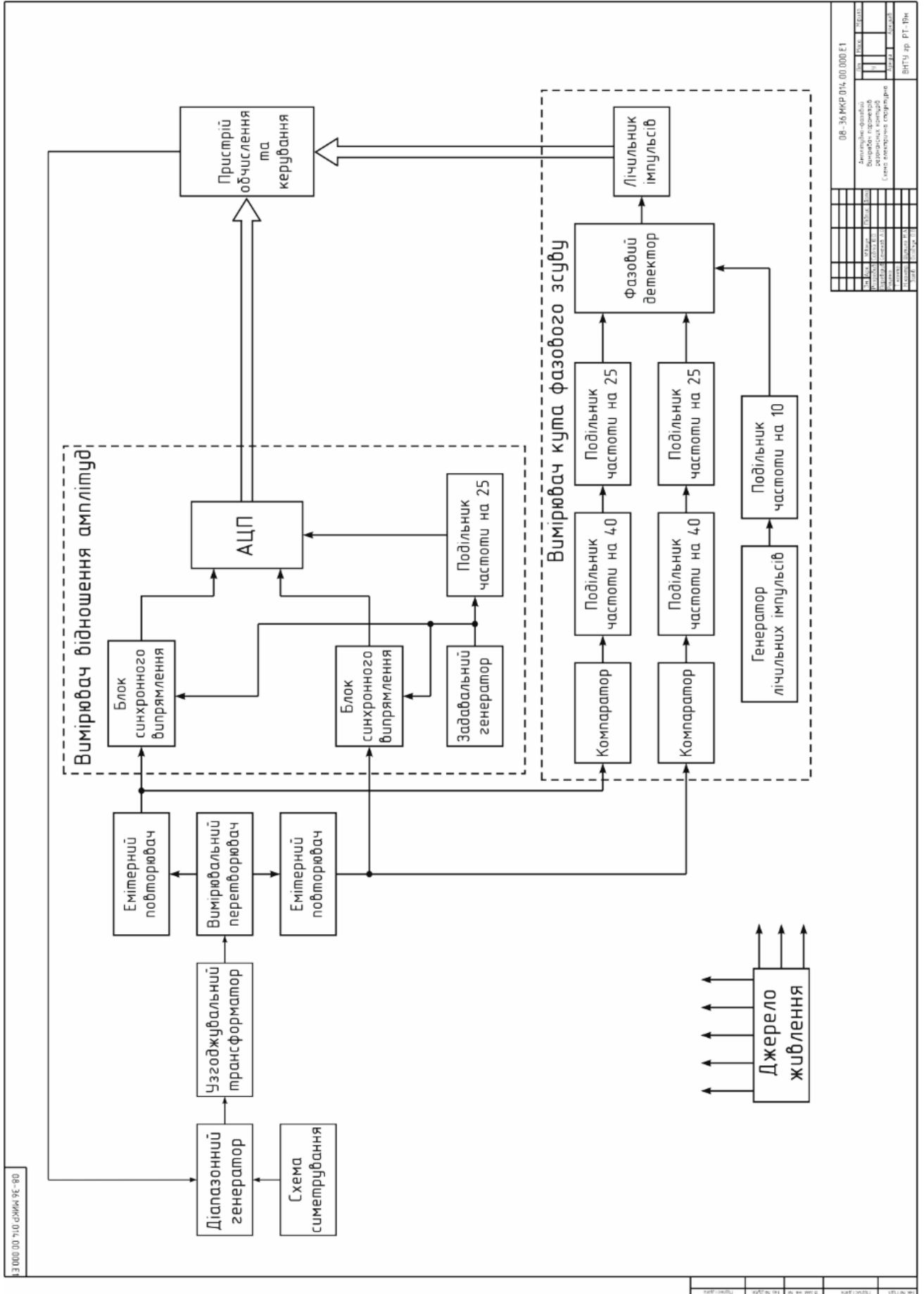
11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ
ДОБРОТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ
КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

Схема електрична структурна амплітудно-фазового вимірювача



08-36 МКР 014 00 0000 Е1

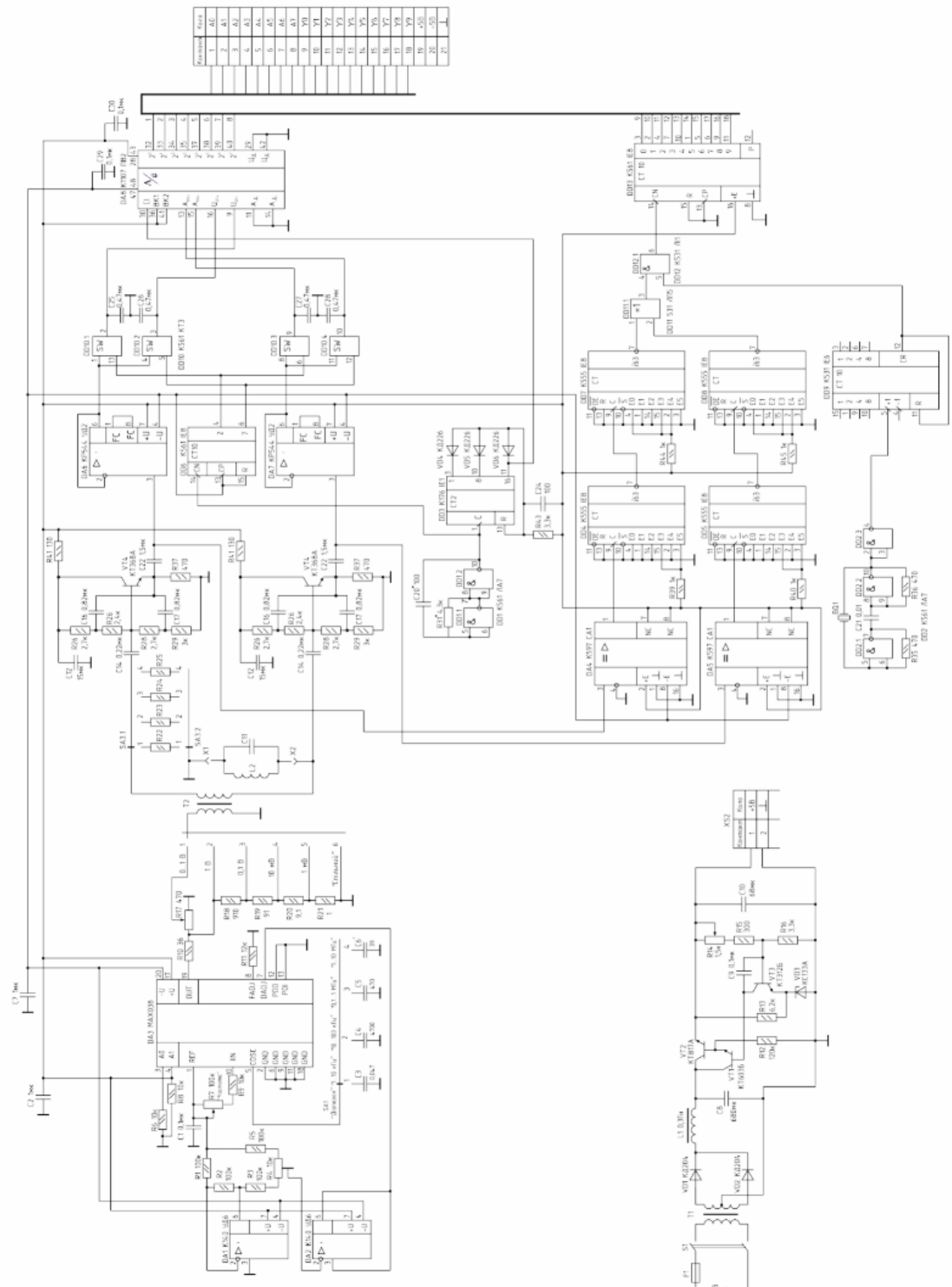
08-36 МКР 014 00 0000 Е1	
Датум складання	15.05.11
Датум розробки матеріалів	15.05.11
Схема електрична спеціальна	08-36 МКР 014 00 0000 Е1
Вип'як	РГ-Вн

Додаток В
(обов'язковий)

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ
ДОБРОТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ
КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

Схема електрична принципова амплітудно-фазового вимірювача

08-36 МКФ 014.003.000.E3



Контракт	Дата
1	АЕ
2	АД
3	АВ
4	АБ
5	АА
6	АА
7	АА
8	АА
9	АА
10	АА
11	АА
12	АА
13	АА
14	АА
15	АА
16	АА
17	АА
18	АА
19	АА
20	АА
21	АА
22	АА
23	АА
24	АА
25	АА
26	АА
27	АА
28	АА
29	АА
30	АА

08-36 МКФ 014.003.000.E3		
№	Имя	Фамилия
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Климов	Клима
5	Лебедев	Лебеде
6	Земсков	Земско
7	Соколов	Соколо
8	Виноградов	Виногр
9	Попов	Попов
10	Морозов	Мороз
11	Смирнов	Смирно
12	Борисов	Борис
13	Евдокимов	Евдок
14	Селезнев	Селезн
15	Соловьев	Соловь
16	Константинов	Констан
17	Кузнецов	Кузнец
18	Леонов	Леонов
19	Лыткин	Лыткин
20	Степанов	Степан
21	Свиридов	Свирид
22	Савин	Савин
23	Семин	Семин
24	Семин	Семин
25	Семин	Семин
26	Семин	Семин
27	Семин	Семин
28	Семин	Семин
29	Семин	Семин
30	Семин	Семин

08-36 МКФ 014.003.000.E3		
Выборка параметров резистивных элементов		
Сред. электрич. параметры		
№	Имя	Фамилия
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Климов	Клима
5	Лебедев	Лебеде
6	Земсков	Земско
7	Соколов	Соколо
8	Виноградов	Виногр
9	Попов	Попов
10	Морозов	Мороз
11	Смирнов	Смирно
12	Борисов	Борис
13	Евдокимов	Евдок
14	Селезнев	Селезн
15	Соловьев	Соловь
16	Константинов	Констан
17	Кузнецов	Кузнец
18	Леонов	Леонов
19	Лыткин	Лыткин
20	Степанов	Степан
21	Свиридов	Свирид
22	Савин	Савин
23	Семин	Семин
24	Семин	Семин
25	Семин	Семин
26	Семин	Семин
27	Семин	Семин
28	Семин	Семин
29	Семин	Семин
30	Семин	Семин

№	Имя	Фамилия
1	Иванов	Иван
2	Петров	Петр
3	Сидоров	Сидор
4	Климов	Клима
5	Лебедев	Лебеде
6	Земсков	Земско
7	Соколов	Соколо
8	Виноградов	Виногр
9	Попов	Попов
10	Морозов	Мороз
11	Смирнов	Смирно
12	Борисов	Борис
13	Евдокимов	Евдок
14	Селезнев	Селезн
15	Соловьев	Соловь
16	Константинов	Констан
17	Кузнецов	Кузнец
18	Леонов	Леонов
19	Лыткин	Лыткин
20	Степанов	Степан
21	Свиридов	Свирид
22	Савин	Савин
23	Семин	Семин
24	Семин	Семин
25	Семин	Семин
26	Семин	Семин
27	Семин	Семин
28	Семин	Семин
29	Семин	Семин
30	Семин	Семин

Додаток Д
(обов'язковий)

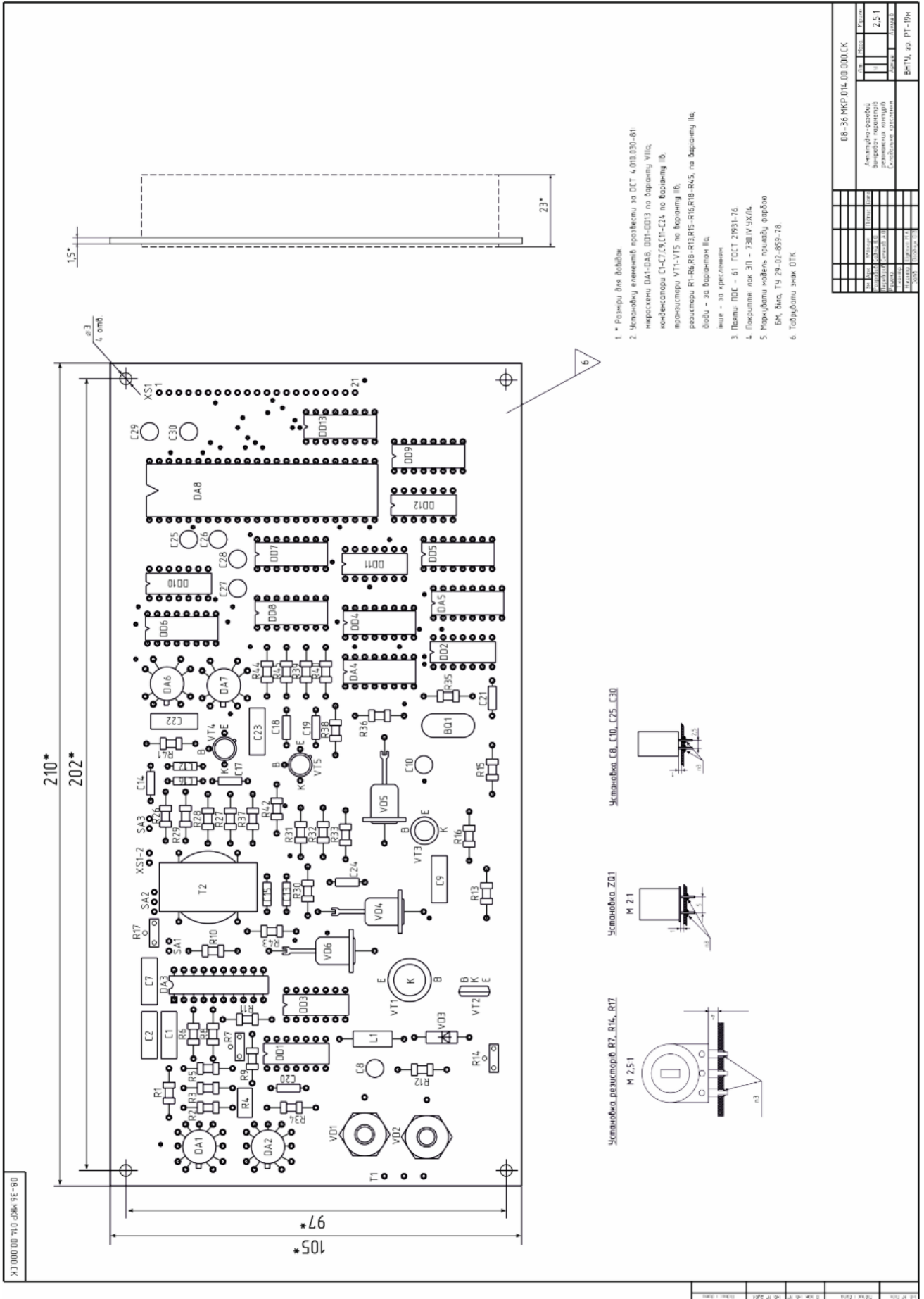
ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ
ДОБРОТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ
КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

Креслення друкованої плати амплітудно-фазового вимірювача

Додаток Е
(обов'язковий)

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ
ДОБРОТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ
КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

Складальне креслення амплітудно-фазового вимірювача



Додаток Ж
(обов'язковий)

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ
ДОБРОТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ
КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

Результати моделювання каскадів амплітудно-фазового вимірювача

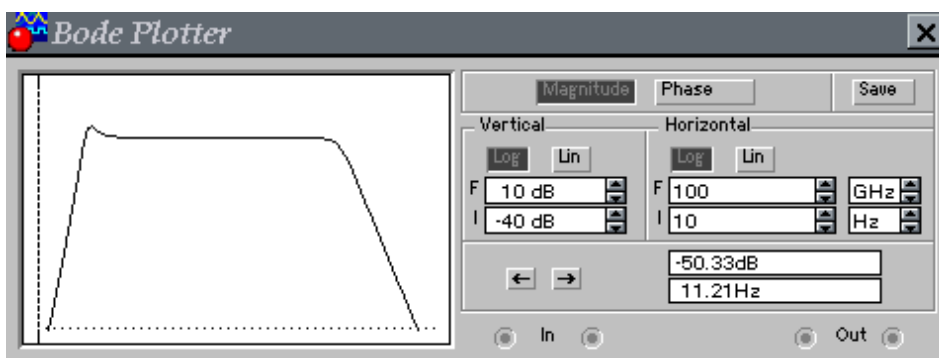


Рисунок Ж.1 – АЧХ емітерного повторювача

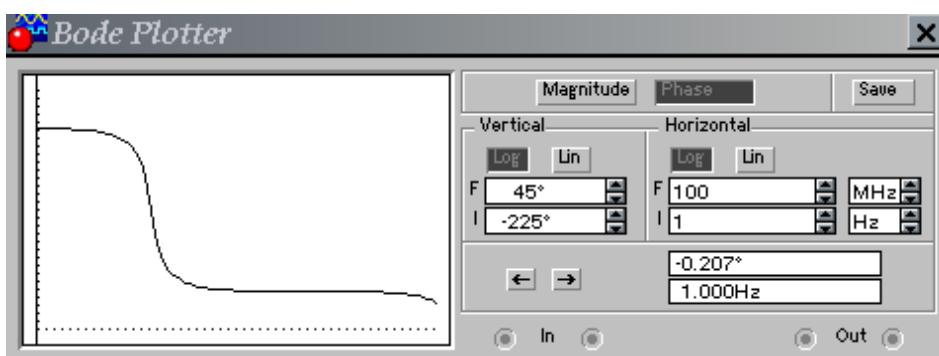


Рисунок Ж.2 – ФЧХ емітерного повторювача

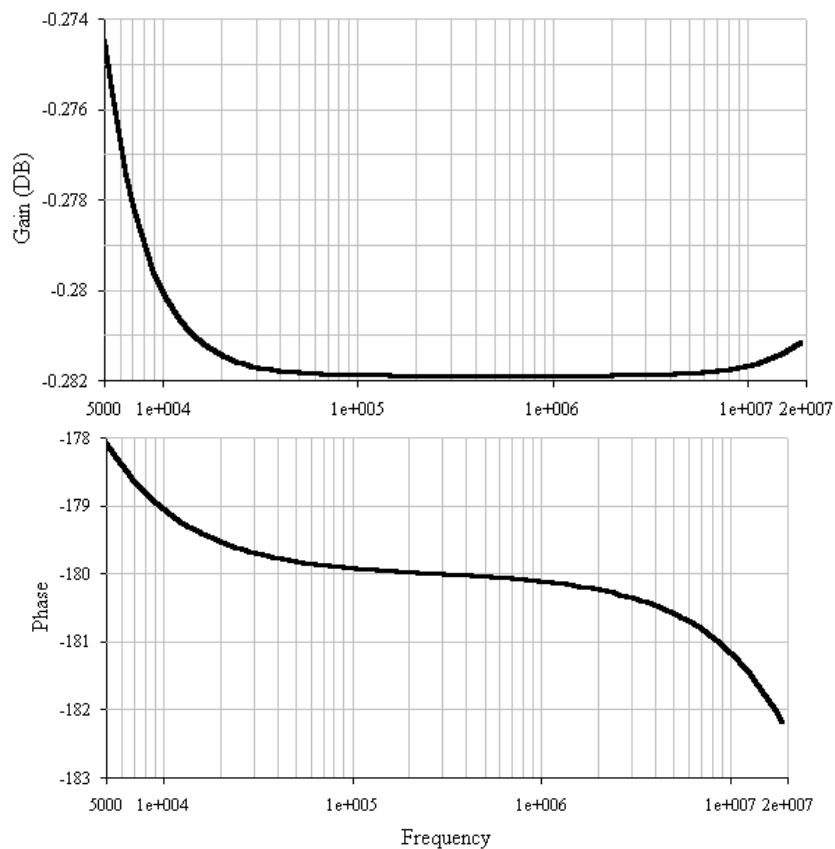


Рисунок Ж.3 – Зображення АЧХ та ФЧХ емітерного повторювача

Додаток К
(обов'язковий)

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ
ДОБРОТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ
КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

Амплітудно-фазовий метод вимірювання

$$\alpha = \frac{r}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})},$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}}.$$

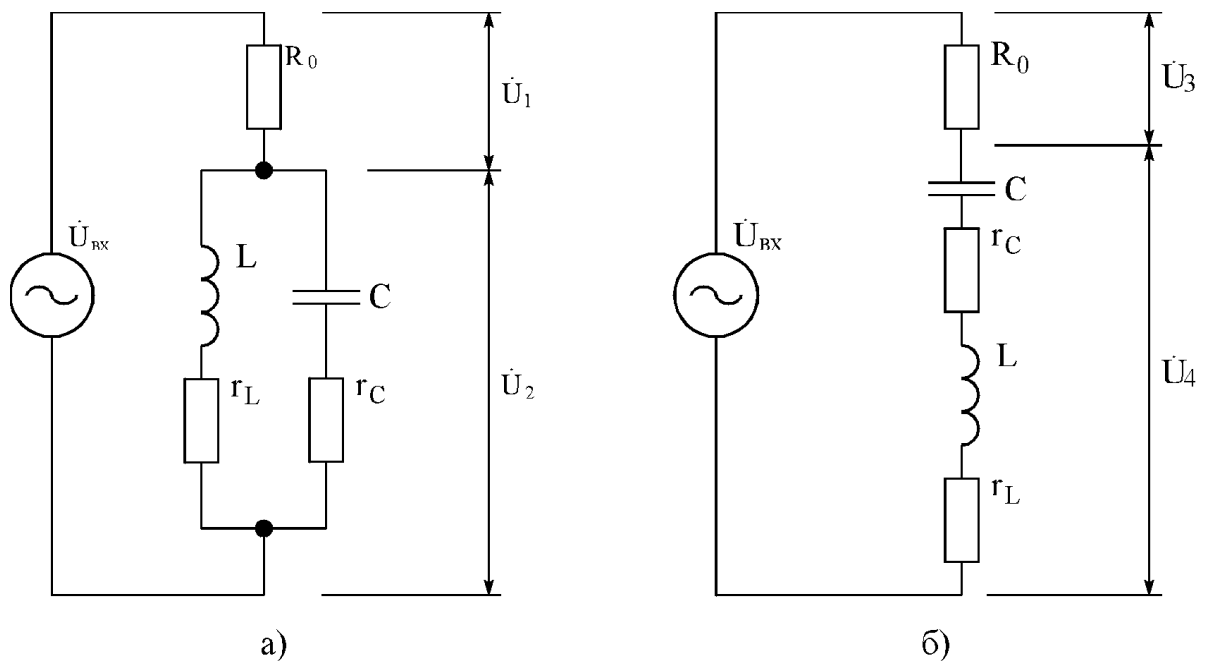


Рисунок К.1 – Еквівалентна схема вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів паралельних (а) та послідовних (б) резонансних контурів