

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри ІВТ

Володимир ЄРЕМЕНКО

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2021 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Інформаційні вимірювальні технології та системи»

спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

на тему: Інформаційно-вимірювальна система розходу палива

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ВА-71

Білоног Артур Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник

доц. каф. ІВС, к.т.н., доц. Шумков Юрій Сергійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

к.т.н., доцент Петрик В.ф

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище ім'я по батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) приладобудівний факультет
(повна назва)

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітньо-професійна програма
«Інформаційні вимірювальні технології та системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Володимир ЄРЕМЕНКО

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«___» _____ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту**

Білоногу Артуру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Інформаційно-вимірювальна система розходу палива

керівник проєкту (роботи) Шумков Юрій Сергійович, к.т.н., доц.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «26» 05 2021 р. №1347-с

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) 1. Маса палива в баках, кг: 0...2350,

2. Температура палива, °C: ± 60 , 3. Основна зведена похибка вимірювання маси палива в баках, %: не більше ± 2.5 , 4. Абсолютна похибка вимірювання температури палива, °C: не більше ± 2 , 5. Час вимірювання - 180 мс.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) ТЗ. Вступ. Огляд технічних рішень. Розробка структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи розходу палива. Розробка функціональної схеми інформаційно-вимірювальної системи розходу палива. Розробка принципової схеми інформаційно-вимірювальної системи розходу палива. Аналіз похибок

5. Перелік (ілюстративного) графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів тощо) Схема структурна. Схема функціональна. Схема принципова.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 11 лютого 2021 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1.	Розробка та узгодження технічного завдання	05.03.2021 р.	
2.	Огляд і аналіз існуючих технічних рішень	08.03.2021 р.	
3.	Проектування структурної схеми	15.04.2021 р.	
4.	Проектування функційної схеми	20.04.2021 р.	
5.	Проектування схеми електричної принципової вимірювальних каналів системи	28.04.2021 р.	
6.	Аналіз похибок вимірювальних каналів	14.05.2021 р.	
7.	Оформлення графічних матеріалів	01.06.2021 р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2021 р.	
9.	Попередній захист дипломного проєкту	09.06.2021 р.	
10.	Рецензування дипломного проєкту	до 14.06.2021 р.	
11.	Захист дипломного проєкту	до 18.06.2021 р.	

Студент

(підпис)

Артур БІЛОНОГ

(ініціали, прізвище)

Керівник проєкту

(підпис)

Юрій ШУМКОВ

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту (роботи)

АНОТАЦІЯ

В дипломному проєкті було розроблено інформаційно-вимірювальну систему розходу палива, призначену для вимірювання маси палива в діапазоні від 0 до 2350 кг та температурі пального в межах ± 60 °C.

Вимірювання маси палива базується на принципі вимірювання ємності датчиків, встановлених у топливних баках. Маса пального вимірюється з урахуванням діелектричної проникності діелектрика ємнісного датчика, на який впливають багато чинників.

В дипломному проєкті були розроблені: структурна схема, функційна схема, принципові схеми блоку перетворювача, блоку обробки та індикації інформації. Був реалізований алгоритм корекції похибки вимірювання маси палива з використанням ємного датчика, який дозволяє мінімізувати похибку перетворення через непостійність діелектричної проникності. Проведено детальний аналіз похибок.

SUMMARY

In the diploma project the information-measuring system of fuel consumption was developed, intended for measurement of mass of fuel in the range from 0 to 2350 kg and temperature of fuel within ± 60 °C.

Fuel mass measurement is based on the principle of measuring the capacity of sensors installed in fuel tanks. The mass of the fuel is measured taking into account the dielectric constant of the dielectric of the capacitive sensor, which is influenced by many factors.

In the diploma project were developed: block diagram, functional diagram, schematic diagrams of the converter unit, processing unit and information display. An algorithm for correcting the error of fuel mass measurement was implemented using a capacitive sensor, which minimizes the conversion error due to the inconsistency of the dielectric constant. A detailed analysis of errors was performed.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ІВТ

_____ проф. Володимир ЄРЕМЕНКО

" ____ " _____ 2021 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт

«Система вимірювання віброприскорення відокремлюваного елемента»

ВА71.020004.001 ТЗ

УЗГОДЖЕНО:

Керівник дипломного проєкту

_____ доц. каф. ІВС
(Посада)

_____ Шумков Ю.С.
(Прізвище І.ПБ.)

" ____ " _____ 2021 р.

Дипломник:

Ст. гр. ВА-71

_____ Білоног А.С.
(Прізвище І.ПБ.)

" ____ " _____ 2021 р.

Залікова книжка № ВА-7102

Київ 2021

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ

Розроблена інформаційно-вимірювальна система розходу палива призначена для вимірювання маси палива та його температури. Оброблення цієї інформації, видачі керуючих сигналів та індикації розходу палива. Галузь використання – авіаційна промисловість.

2 ПІДСТАВИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРОБКИ

Підставою для розробки є завдання на дипломний проєкт, видане і затверджене кафедрою інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

3 МЕТА ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ

Метою розробки є створення на сучасній елементній базі інформаційно-вимірювальної системи розходу палива на ємнісних конденсаторах.

Використання пристрою дозволить:

- проводити вимірювання маси та температури пального;
- подальшого обчислення розходу палива;
- видача керуючих сигналів з їх подальшою індикацією;
- підвищення безпеки за рахунок автоматизування процесу контролю маси та температури палива.

4 ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

Джерелами розробки є:

- державні та галузеві стандарти;
- науково-технічні та дослідно-конструкторські звіти;

- науково-технічна література по проектуванню електронного обладнання.

5 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.1 Вимоги, що визначають експлуатаційні характеристики, показники якості та метрологічні характеристики

5.1.1 Технічні характеристики, метрологічні характеристики і показники якості

5.1.1.1 Пристрій повинен виконувати вимірювання маси та температури пального.

5.1.1.3 Пристрій повинен мати наступні технічні характеристики:

5.1.1.3.1 Маса пального в баках: 0 - 2350 кг.

5.1.1.3.2 Температура пального: -60 до +60 °C.

5.1.1.3.3 Час вимірювання: 180 мс.

5.1.1.3.4 Основна приведена похибка вимірювання маси палива в баках - < 2.5%.

5.1.1.5 Абсолютна похибка вимірювання температури палива - < 2%.

5.1.2 Вимоги до виду кліматичного виконання та вимоги до розробляемого пристрою частині видів впливових величин

5.1.2.1 Система повинна зберігати зовнішній вигляд і свої параметри в процесі впливу наступних видів кліматичних та механічних факторів, характеристики яких наведені по ГОСТ В 20.39.304-76:

- нормальні умови:
 - температура від +15 °C до +25 °C ;
 - відносна вологість повітря від 30% до 80%;
 - Атмосферний тиск, кПа (мм.рт.ст.) від 84 до 106 (від 630 до 795).
- Робочі умови:
 - температура повітря від -55 °C до +55 °C ;
 - відносна вологість повітря від 30% до 90%;

– Атмосферний тиск, кПа (мм.рт.ст.) від 95 до 106 (від 710 до 800)

Пристрій повинен зберігати працездатність, зовнішній вигляд і свої параметри після транспортування при дії наступних видів кліматичних і механічних чинників, які відповідають ГОСТу В 20.39.305-76.

Кліматичні і механічні фактори що впливають при транспортуванні наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Кліматичні і механічні фактори що впливають при транспортуванні

	Види впливаючих кліматичних і механічних факторів	Номінальні значення і граничні відхилення
Умови транспортування	Температура навколишнього повітря, °С	-30 ... +50
	Відносна вологість повітря при температурі 35°С, %	98
	Атмосферний тиск, кПа (мм. рт. ст.)	60,0 - 106,7 (650 – 1150)
	Транспортна тряска:	80 – 120
	Кількість ударів в хвилину	160
	Максимальне прискорення, м/с ²	8
	Тривалість дії, год.	

5.1.3 Вимоги до часу встановлення робочого режиму

Пристрій повинен забезпечувати в робочих умовах застосування необхідні характеристики після закінчення часу встановлення робочого режиму. Час встановлення робочого режиму має бути не більше 10 хвилин.

Пристрій повинен допускати тривалість безперервної роботи не менше 8 годин з подальшою зупинкою на період не менше 1 години.

5.1.4 Вимоги до електричної міцності та опору ізоляції за ГОСТ 26104

5.1.4.1 Ізоляція електричних ланцюгів системи щодо корпусу і між собою в залежності від номінальної напруги ланцюга і умов випробувань повинна витримувати протягом однієї хвилини дію випробувальної напруги по ГОСТ 12997-84.

5.1.4.2 Випробувальна напруга (середнє квадратичне значення) в ланцюгах з робочою ізоляцією 1,5 кВ в нормальних умовах, при верхніх значеннях вологості 0,9 кВ.

5.2 Вимоги до конструктивного пристрою

5.2.1 Усі написи згідно ГОСТ 26.020-80

5.2.2 Комплектуючі вироби та матеріали повинні застосовуватися в режимах експлуатації, встановлених в стандартах і ТУ на них.

5.3 Вимоги до електроживлення

5.3.1 Живлення пристрою має здійснюватися безпосередньо із системи літака 25 В

5.3.2 Робочі умови застосування:

- напруга (25 ± 4) В;
- струм 2 ± 0.5 ;

5.4 Вимоги до надійності

5.4.1 Пристрій відноситься до відновлюваного класу виробів

5.4.2 Система повинна бути працездатною в умовах впливу на літак атмосферної електрики і блискавки відповідно до ГОСТ 26807-86.

5.4.3 Середній термін служби повинен бути не менше 10 років

5.5 Вимоги безпеки при монтажі, експлуатації та ремонті

5.5.1 Пристрій повинен відповідати вимогам безпеки за ГОСТ 26104 і ГОСТ 12.2.007.0

5.6 Вимоги до перешкодозахищеності

5.6.1 Система повинна бути працездатною в умовах впливу на літак атмосферної електрики і блискавки відповідно до ГОСТ 26807-86.

5.7 Вимоги до засобів, методів і умов повірки

5.7.1 Умови проведення повірки повинні відповідати вимогам ГОСТ В 20.39.308-76.

5.8 Додаткові вимоги

5.8.1 Система повинна здійснювати індикацію мінімальної температури палива на літаку.

5.8.2 Система повинна формувати сигнали на закриття кранів заправки і на закриття перекривний заслінки.

5.8.3 Система повинна здійснювати індикацію початку вироблення палива з витратного відсіку і вироблення невирабативаемого залишку палива.

5.8.4 Система повинна забезпечувати видачу інформації про сумарний залишок палива на об'єкті в літаковий відповідач.

Етапи розробки, оформлення та узгодження дипломного проєкту наведено в табл. 6.1.

6 ЕТАПИ РОЗРОБКИ

Таблиця 6.1 – Етапи розробки дипломного проекту

№ п/п	Найменування етапу	Дата
1	Розробка та узгодження технічного завдання	05.03.2021
2	Огляд і аналіз існуючих технічних рішень	08.03.2021
3	Проектування електричної структурної схеми	15.04.2021
4	Проектування електричної функційної схеми	20.04.2021
5	Проектування схеми електричної принципової вимірювальних каналів системи	28.04.2021
6	Аналіз похибок вимірювальних каналів	14.05.2021
7	Оформлення графічних матеріалів	01.06.2021
8	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2021
9	Попередній захист дипломного проекту	09.06.2021
10	Рецензування дипломного проекту	до 14.06.2021
11	Захист дипломного проекту	до 18.06.2021

Всі стандарти що використовуються в даному ТЗ на ДП є чинними на території України.

Номер рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Номер екзем.	Примітка
1						
2			<u>Альбом 1</u>			
3			<i>Документація загальна</i>			
4						
5			<i>Розроблена заново</i>			
6	A4	BA71.020004.001 ТП	<i>Відомість технічного проекту</i>	1	1	
7	A4	BA71.020004.001 ПЗ	<i>Пояснювальна записка</i>	45	1	
8						
9	A4	BA71.020004.001 ТЗ	<i>Технічне завдання</i>	7	1	
10						
11						
12						
13			<u>Альбом 2</u>			
14			<i>Графічна документація</i>			
15			<u>Розроблена заново</u>			
16						
17	A1	BA71.020004.001E1	<i>Інформаційно-вимірювальна система розходу палива.</i>	1	1	
18			<i>Схема електрична структурна</i>			
19						
20	A1	BA71.020004.002E2	<i>Вимірювальний канал інформаційно-вимірювальної системи розходу палива.</i>	1	1	
21			<i>Схема електрична функціональна</i>			
22						
23	A1	BA71.020004.003E3	<i>Блок вимірювального каналу інформаційно-вимірювальної системи розходу палива.</i>	1	1	
24			<i>Схема електрична принципова</i>			
25						
26						
27						

					BA71.020004.001 ТП						
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Інформаційно-вимірювальна система розходу палива Відомість технічного проекту				Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Білоног А.С.									
Керівн.		Шумков Ю.С.								1	1
									КПІ ім. Ігоря Сікорського Група BA-71		
Н.Контроль		Богомазов С.А.									
Затв.		Єременко В.С.									

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

на тему: «Інформаційно-вимірювальна система розходу палива»

Київ – 2021 року

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	4
1.1 Пошук технічних рішень	4
1.2 Поплавкові системи вимірювання розходу палива	5
1.3 Ємнісні системи вимірювання розходу палива	8
1.4 Манометричні системи вимірювання палива	12
1.5 Похибка електричної системи вимірювання палива	12
2 СТРУКТУРНА СХЕМА	14
2.1 Принцип дії інформаційно-вимірювальної системи	14
2.2 Процес вимірювання	17
2.3 Вимірювання температури	20
3 СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ФУНКЦІЙНА	22
3.1 Генератор синусоїдальної напруги	22
3.2 Підключення датчиків	23
3.3 Фазочутливе перетворення	23
3.4 Формувач опорних напруг	25
3.5 АЦП-перетворювач напруга-час	25
3.6 Перетворювач температури	27
4 СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА	28
4.1 Генератор синусоїдального випробувального сигналу	28
4.2 Перетворювач напруга-часу заснований на ICL7135	30
4.3. Фільтр низьких частот	32
4.4 Формувачі опорних квадратурних сигналів СД	37
5 АНАЛІЗ ПОХИБОК	38
5.1 Рівняння перетворення	38
5.2. Оцінка сумарної похибки	43
ВИСНОВКИ	44
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	45

					ВА71.020004.001 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис					
Розробив	Білоног А.С.				Інформаційно-вимірювальна системарозходу палива Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Шумков Ю.С.					Т	2	45
						КПІ ім. Ігоря Сікорського Група ВА-71		
Затв.								

ВСТУП

Україна є країною, у якій дуже добре розвинене авіабудівництво. Завод «Антонов», та його літаки серії АН, які дуже поширені у всьому світі, є одним із світових стандартів на рівні зі літаками компанії Boeing і Lockheed.

На сьогодні, існує багато різновидів літаків, та систем для них. Вони модернізуються та покращуються, задля забезпечення автоматизації та підвищення безпеки. І не останнім чинником є об'єм палива, який витрачається. Від усіх цих чинників залежить багато характеристик, а саме тривалість знаходження в повітрі, без безпосереднього дозаправлення паливом, кількості людей, які знаходяться на борту, обсяг перевезеного вантажу і також багато інших. Метою моєї роботи є розробка інформаційно-вимірювальної системи розходу палива, яка буде виконувати функції індикації, вимірювати масу палива і його температуру.

Прогрес не стоїть на місці, тому з кожним роком паливні системи у літаках ускладнюються. Тому сьогодні паливна система — це складний комплекс, який складається з тісно пов'язаних між собою систем та вимірювальних підсистем різного ступеня важкості.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						3
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

1.1 Пошук технічних рішень

Сучасні прилади можуть дозволити пілотам літака визначити, кількість палива у будь-який момент, і після, оцінити час, скільки часу літак може летіти далі.

На превеликий жаль, на сьогодні неможливе безпосереднє вимірювання пального, через це застосовують методи непрямого вимірювання. Зазвичай використовують такі величини, які легко можна визначити. Як еталон таких величин зазвичай обирають рівень стовпу або вагу палива в баку.

З допомогою систем визначають який запас палива є у баках, і також кількість палива яка є окремо в кожному з них. Знати, як пальне розміщене між баками, дуже важливо, адже треба розуміти з якого баку краще брати пальне, щоб не допустити фатальної помилки зміщення мас і як наслідок падіння літака.

Розподіляючи системи за принципом дії, виділяємо такі типи, які використовуються найбільше:

- поплавкові — базуються на вимірі рівня пального за допомогою рухомого поплавця;
- манометричні — базуються на вимірі тиску палива, манометром;
- ємнісні — базуються на вимірі рівня пального, спеціальним конденсатором. Він є функційно залежним, тобто, ємність пов'язана із залишком пального в баку.

Існує два види систем розходу палива: електричні або механічні. Зазвичай в авіації використовують Електричні системи, а механічні майже не застосовуються.

В системах, зазвичай, використовуються одні та ті самі методи, але між ними є відмінності, які накладають свої обмеження та умови експлуатації:

- паливні баки, дуже часто, мають обмежені розміри, і це накладає деякі обмеження на датчики рівня, які можуть бути використані;

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						4
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

– паливні баки мають складну форму, через обмежену кількість місця, що призводить до того, що потрібно використовувати лише профільовані датчики рівня;

– літак під час польоту є схильним до сил прискорення, тяжіння тощо. Через це в баках паливо є доволі мінливим і самостійно перерозподіляється під силами які на нього впливають. Отже через це, в баку є імовірність появи похибки вимірювання;

– для літаків в які встановлено декілька паливних баків, потрібно робити центрування шляхом перекачування пального з одного паливного бака в інший, щоб забезпечити стабілізацію центру мас літака, тому що дестабілізація літака може призвести до аварії.

1.2 Поплавкові системи вимірювання розходу палива

Застосування плаваючого манометра для вимірювання кількості палива в паливному баку базується на наступному принципі: перетворити неелектричну енергію (змінну висоту рівня палива) в електричну. Датчики, які залежать від форми баку, передаються на індикатор.

Діапазон похибки вимірювань електричного датчика рівня палива з плаваючим поплавком, коли поверхня палива знаходиться в тихому стані, становить від 2% до 5%.

Недоліком плаваючого манометра є те, що коли паливо перетікає з однієї частини паливного бака на іншу сторону або котиться поздовжньо та поперечно (є похибка кочення), похибка вимірювання дуже велика.

У маневрених літаках, щоб зменшити похибку крену літального апарату, якщо це дозволяє конфігурація паливного бака, є можливість встановити електричний поплашковий датчик типу поплавця з двома поплавцями та механічним диференціалом.

Плавучий паливомір електричного важеля може не тільки вимірювати кількість палива, але також контролювати централізовано автоматичне заправлення та подачу пального з паливного бака, а також подавати сигнал аварійному залишку пального в паливному баку літака.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Використовується сигнальний пристрій, розташований у корпусі головки датчика, для передачі сигналу про вказівку заправки, сигналу управління клапаном подачі та сигналу про аварійний залишок палива.

Недоліки таких систем:

- відсутність вимірювання маси залишку пального;
- відсутність автоматизування процесу послідовного використання палива із різних баків, та послідовності дозаправлення або повної заправки паливним баків;
- відсутність автоматизування процесу перерозподілу пального між паливними баками, задля забезпечення безпеки та уникнення крену.

На рис.1.2.1 наведено конструктивну схему важеля-поплавкового датчика БЕ-46

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						6
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

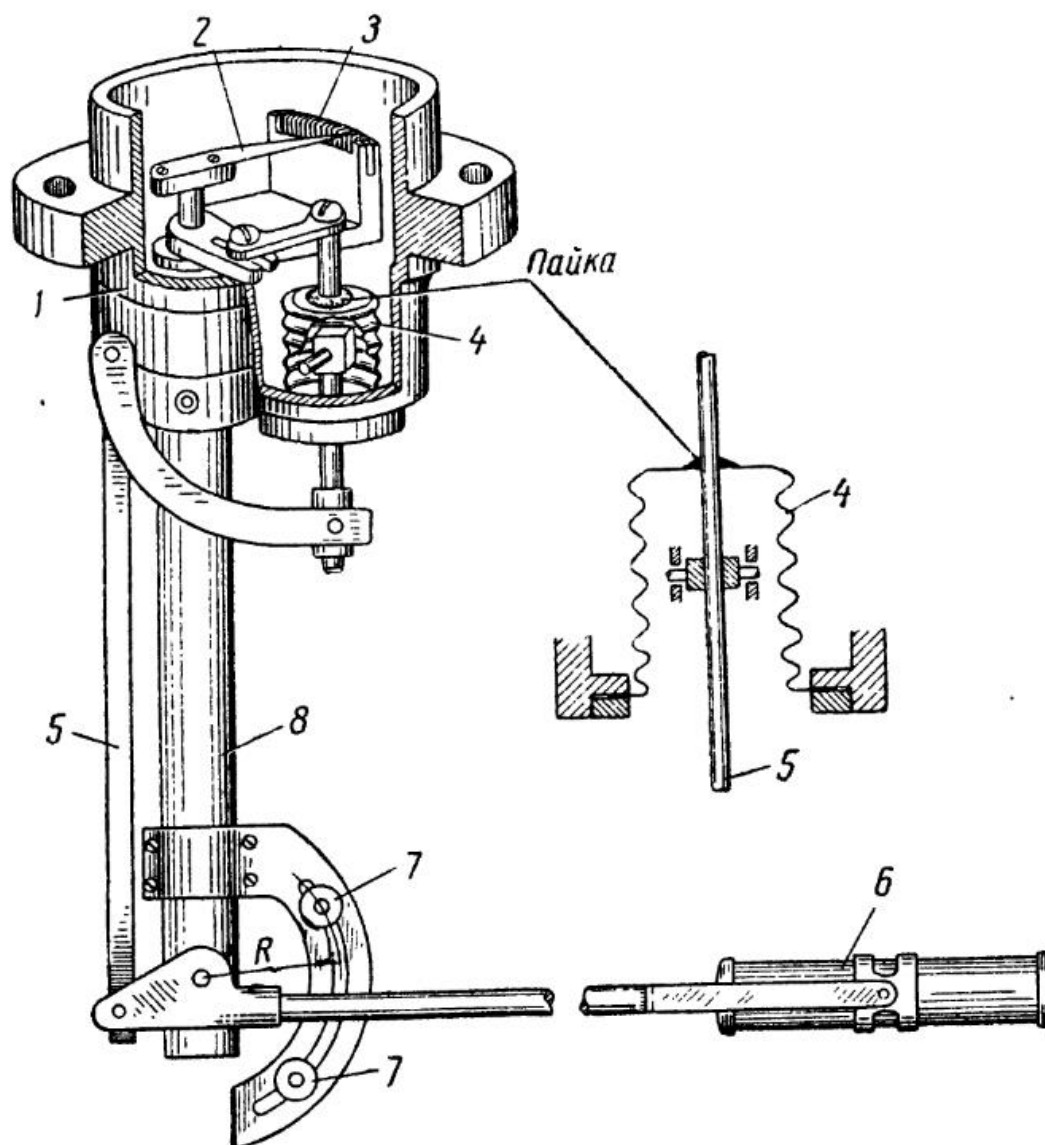


Рис. 1.2.1 – Конструктивна схема важеля-поплавого датчика БЕ-46
 1 - корпус потенціометра датчика; 2 - повзунок потенціометра; 3 -
 потенціометр; 5 - важіль передавального механізму; 6 - поплавок; 7 -
 обмежувач; 8 - колонка.

На рис.1.2.2 наведено принципову електричну схему топливоміру БЕ-46.

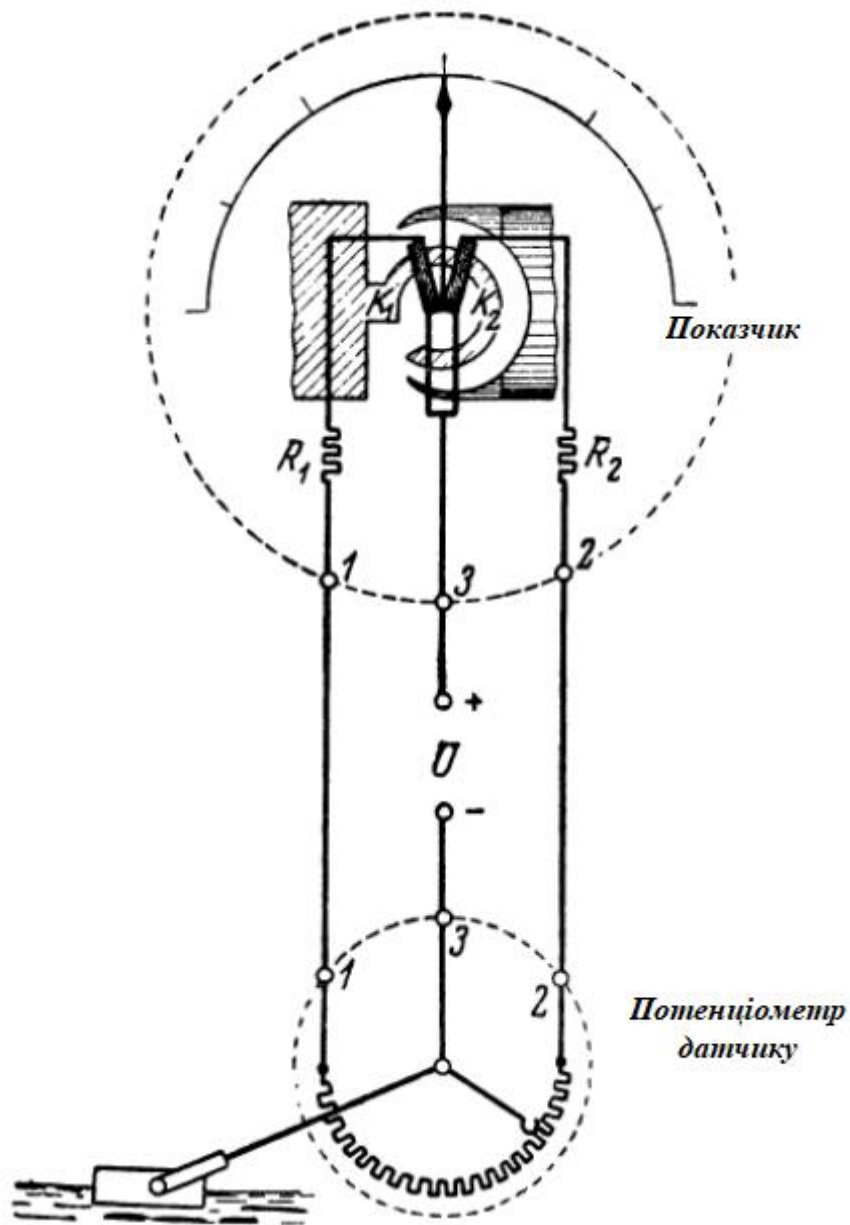


Рис. 1.2.2 – Принципова електрична схема топливомера БЕ-46.

K1, K2 - котушки логометра; R1, R2 - підганяльні опори; 1, 2, 3 - клеми приєднання живлення і електропроводів лінії зв'язку.

1.3 Ємнісні системи вимірювання розходу палива

Ємнісні системи працюють завдяки тому, що в паливний бак, встановлюється ємнісний датчик, і він має залежність від кількості пального(рівня рідини) в баку.

Датчик складається з конденсатора з коаксіально розташованими трубами (рис. 1.3.1).

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8

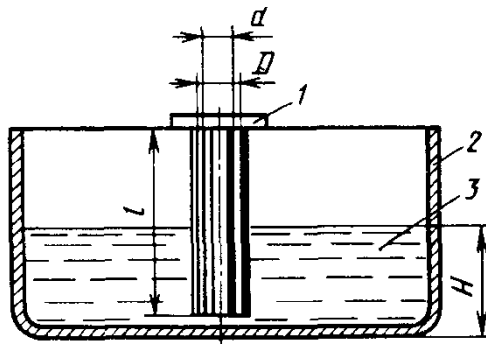


Рис. 1.3.1 – Принципова схема датчика ємнісного топливоміра:

1 - датчик; 2 - паливний бак; 3 - паливо; D - діаметр внутрішнього кола зовнішньої труби; d - діаметр зовнішнього кола внутрішньої труби; H - рівень палива в баку

С цього датчику знаходиться за формулою:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 l}{\ln(D/d)} \quad (1.3.1)$$

Де $\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$ діелектрична проникність середовища між трубками; ϵ_r - відносна проникність середовища; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$; l - довжина робочої частини датчика; D - внутрішній діаметр зовнішньої трубки; d - зовнішній діаметр внутрішньої трубки.

Коли конструкція датчика виконується з декількох коаксіально розташованих труб, ємність датчика визначається як сума ємностей різних паралельно підключених конденсаторів.

З формули (1.3.1) видно, що збільшення ємності датчика залежить від проектних розмірів датчика, рівня масла в паливному баку та діелектричної проникності палива. Для того, щоб отримати однакове значення збільшення ємності, відповідно до калібрувальної кривої паливного бака (залежно від обсягу палива від його висоти в баку).

На рис. 1.3.2 зображено контур циліндричного, спрофільованого датчика ємності системи вимірювання палива

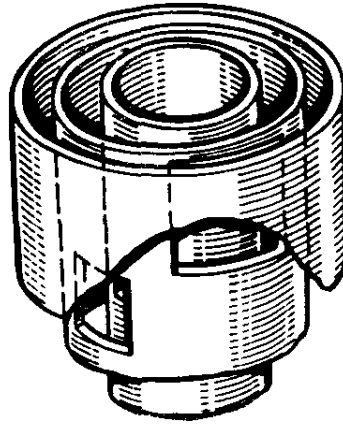


Рис. 1.3.2 – Контур циліндричного, спрофільованого датчика ємносної системи вимірювання палива

Якщо припустити, що, паливна діелектрична проникність є постійною, то показання манометра палива, виміряні в будь-який момент часу, відповідають певному рівню палива, а враховуючи профіль датчика, ми можемо визначити кількість палива в баку.

Однак, оскільки паливна діелектрична проникність залежить лише від щільності, то, беручи конструктивну величину датчика (l, D, d) постійною, маємо

$$\rho_{\Pi} = f(\epsilon)$$

Отже, коли електрична ємність вимірювального датчика збільшується, вона визначається в одиницях маси за рахунок подачі палива в паливний бак літака. Слід зазначити, що функція $\rho_{\Pi} = f(\epsilon)$ властива лише певній партії палива. Для різних різновидів палива, залежність між діелектричною проникністю палива та його щільністю може бути різною, що призведе до додаткових помилок вимірювання.

Якщо паливо забруднене або містить різні добавки або домішки у вигляді води або опадів, ємнісний датчик реагуватиме не на загальну щільність, а на загальну діелектричну проникність. Також, сторонній осад може осідати на стінці конденсаторної трубки, які також буде призводити до зміни ємності, що призводить до додаткових помилок та похибок у вимірюваннях.

Похибка вимірювання ємнісної схеми, пов'язана зі зміною кута положення палива в паливному баку транспортного літака, становить від 50% до 60% загальної похибки вимірювання. Ці помилки є повторюваною функцією кута нахилу поверхні палива в паливному баку, тобто систематична похибка має однакове значення для кожної комбінації об'єму палива, положення літального апарату в просторі та перевантаження.

Щоб зменшити похибки вимірювання, пов'язані з положенням палива в паливному баку:

– На деяких типах літальних апаратів екіпаж забезпечується корекційними кривими та таблицями для внесення поправок під час зчитування показань на основі профілю польоту. Недоліком цього методу є те, що для ручного внесення поправок потрібен тривалий час і складність. Якщо екіпаж повинен прийняти оперативне рішення в особливих умовах польоту, це може бути абсолютно неприйнятним.

– Система з автоматичною корекцією ємнісних вимірювачів ємнісних датчиків забезпечує максимальну точність. Ці датчики визначають кут положення палива в двох взаємно перпендикулярних площинах у паливному баку.

Такі системи дозволяють використовувати непрофільовані датчики і мають велику гнучкість при модернізації літаків, оскільки дозволяють враховувати зміни у формі паливного бака без необхідності модифікувати конструкцію датчиків у паливному баку.

Кришка на горловині датчика повинна бути вологонепроникною, а штепсельний роз'єм на датчику після установки та калібрування повинен бути оброблений епоксидними складами. Проводка датчика манометра повинна бути захищена від вологи. Зверніть особливу увагу на зв'язок, що виникає в крилі, яке схильне до деформації під час польоту.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

На додаток до основної мети - вимірювати подачу палива - топливомір може автоматично вмикати (вимикати) перекачуючий паливний насос і надсилати екіпажу сигнал про вироблення палива в баку.

В індуктивному датчику рівня рідини, чутливим елементом є поплавок, який зв'язується між рівнем палива в паливному баку та вимірювальним стержнем котушки датчика індуктивності. Принцип роботи цього датчика заснований на вимірюванні індуктивності котушки під час руху поплавця.

1.4 Манометричні системи вимірювання палива

Манометричні системи вимірювання працюють за рахунок вимірювання тиску у баку з допомогою манометра, який встановлюється під баком. Датчик тиску монтується під баком після чого, може безпосереднє приймати тиск напряду який потім конвертується в електричний сигнал. Противагою є тиск кисню, над паливом.

Переваги даного типу систем:

- висока точність;
- невеликі розміри.

Недоліки даного типу систем:

- висока енергозатратність;
- висока вартість.

1.5 Похибка електричної системи вимірювання палива

Похибка електричної системи вимірювання палива складається з того самого методу, властивого ємнісній системі вимірювання:

– помилки, спричинені позовжнім та поперечним нахилом та прискоренням літака;

– похилки, спричинені неточним встановленням паливного бака та відхиленням розміру паливного бака від розміру, отриманого в процесі розрахунку та підбору шкіри;

– помилка температури, спричинена зміною температури палива у паливному баку та зміною типу палива.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						12
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Похибки приладу діляться на декілька типів:

- температурна похибка внаслідок зміни його магнітних властивостей та електричних параметрів коли змінюється температура навколо;
- похибки, спричинені зміною або стрибками напруги живлення.

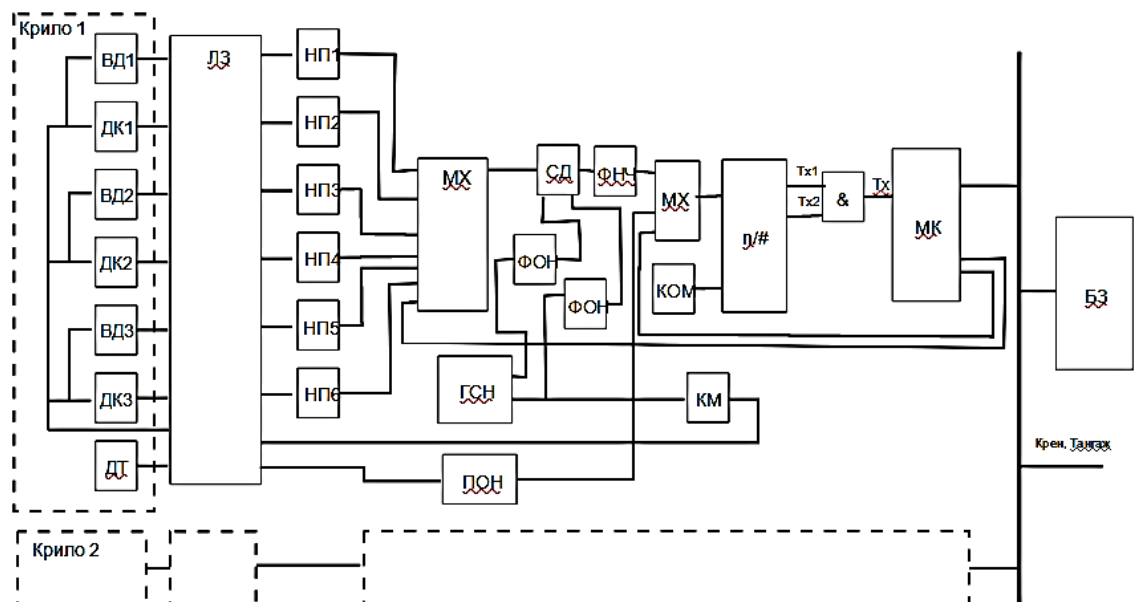
Помилка приладу, спричинена зміною температури, компенсується вибором параметрів схеми.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						13
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2 СТРУКТУРНА СХЕМА

2.1 Принцип дії інформаційно-виміральної системи

До неї входять: ємнісні датчики-компенсатори, вимірвальні датчики(що знаходяться в паливних баках), датчики температури, нормуючі підсилювачі, лінія з'єднання, АЦП, генератор випробувальної синусоїдальної напруги, перетворювач опір-напруга, формувач опорної напруги, синхронний детектор, фільтр низьких частот, керуючий модуль, коммутатор, мультиплексор, блок зображення(це блок виведення інформації та індикації) та мікроконтролер. Рис 2.1.1 Структурна схема інформаційно-виміральної системи розходу палива



ВД1..3 - Вимірвальні датчики;
 ДК1..3 - датчик-компенсатор;
 ДТ - датчик температури;
 ЛЗ - лінія зв'язку;
 НП1..6 - нормуючі підсилювачі;
 п/ч - аналогово-цифровий перетворювач;
 ГСН - генератор синусоїдальної напруги;
 ПОН - перетворювач опору-напруги;
 ФОН - формувач опорної напруги;

СД - синхронний детектор;
 ФНЧ - фільтр низьких частот;
 КМ - керуючий модуль;
 КОМ - коммутатор;
 & - схема збігу;
 МХ - мультиплексор;
 БЗ - блок зображення;
 МК - мікроконтролер;

Рис 2.1.1 – Структурна схема інформаційно-виміральної системи розходу палива

Вимірювання ємності датчиків

До каналу, який вимірює ємність, входять такі складові

- нормуючих підсилювачів, які мають на вхід опор – 0, до них підключені сенсори;
- генератора випробувального синусоїдального сигналу;
- АЦП;
- фільтра нижніх частот та детектора які утворюють фазочутливий випрамляч;
- формувача квадратурного керуючого синхронним детектором сигналу;
- комутатора напруг, які відтворюють імітанс ємнісних датчиків.

Датчики (ємнісні)

Як основний ємнісний датчик було обрано – «БСПИ-54 8ИЗ.038.025».

Він складається із двох труб, які розміщені коаксіально. Електрична ємність датчику рахується за наступною формулою:

$$C_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \epsilon_B (H - h)}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_T \cdot h}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}$$

ϵ_B – відносна діелектрична проникність повітря ($\epsilon_B=1,0001959$);

$\epsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму;

ϵ_T – відносна діелектрична проникність палива (керосин $\epsilon_T=2,1$);

D – внутрішній діаметр зовнішньої труби ($D=36$ мм);

d – зовнішній діаметр внутрішньої труби ($d=28$ мм).

H – висота бака ($H=0.7$ м);

h – рівень палива в баці;

Якщо відстань між трубами буде менша ніж 2 мм, будуть діяти капілярні сили, тому труби мають бути більше, в проєкті вони 36 мм та 28 мм,

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

При відсутності палива($h=0$) ємність датчика

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_B \cdot H}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 8.86 \cdot 10^{-12} \cdot 0.7}{\ln \frac{36}{28}} = 159.479 \text{ пФ}.$$

$$C_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \epsilon_B (H - h)}{\ln \left(\frac{D}{d} \right)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_T \cdot h}{\ln \left(\frac{D}{d} \right)} =$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \epsilon_B H}{\ln \left(\frac{D}{d} \right)} + \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot h (\epsilon_T - \epsilon_B)}{\ln \left(\frac{D}{d} \right)} = C_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot h (\epsilon_T - \epsilon_B)}{\ln \left(\frac{D}{d} \right)}$$

Беручи до уваги те що $\epsilon_B \approx 1$, отримаємо:

$$C_T = C_0 + \frac{C_0}{H} h (\epsilon_T - 1)$$

C_T , C_0 , ϵ_T - відомі, тому знайти висоту палива можна за формулою:

$$h = \frac{H}{\epsilon_T - 1} \left(\frac{C_T}{C_0} - 1 \right)$$

Враховуючи те, що $h_H = V_H / S_H$ - висота палива при стандартній температурі, маємо

$V_H = S_H \cdot h_H$ - загальний об'єм палива

$M = \rho \cdot V_H$ - вага пального

Ємність вимірюваного датчика, коли він заповнений паливом повністю:

$$C_T = \epsilon_{TH} C_0 = 2,1 \cdot 159,479 = 318,958 \text{ пФ},$$

Відносна похибка буде знаходитись за такою формулою:

$$\delta_{\text{MAX}} = \Delta C / C_T = 9.96 / 318.958 = 3,12 \cdot 10^{-2}$$

Похибка вимірювання стане проблемою для точного вимірювання, тому потрібно її компенсувати.

Паливні баки в літаках мають складну форму через відсутність місця, та специфікації розміщення їх у літаку. Таким чином в нас є розуміння, що об'єм палива розміщеного в баках, не має лінійної залежності від рівня пального,

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16

через складні форми та умови розміщення у літаку баків. Але наш ємнісний датчик є залежним від рівня палива та його об'єму. Тому, для того, щоб забезпечити високу точність вимірів, буде введено математичне профілювання нашого ємнісного датчику. Для того, щоб він міг використовуватися у будь-яких системах та баках будь-якої форми. Необхідні обчислення будуть виконуватися за рахунок програми. Кількість палива так само буде обчислена програмно, беручи до увагу діелектричну проникність та щільність пального в залежності від того, який паливний бак використовується.

2.2 Процес вимірювання

Вимірювання проходять в два такти. В першому буде вимірювання ємність вимірювального датчику з паливом, а в другому такті - ємність без палива, тобто датчика, який виконує роль компенсатора.

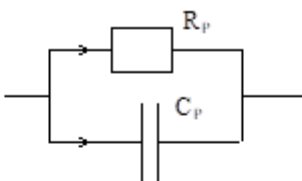
Датчики знаходяться на відстані(не більше 10 метрів), тому підключення до електричного ланцюга відбувається за допомогою двох екранованих дротів, які підключаються до однієї точки

Фазочутливий перетворювач виконує розділення параметрів імітансу датчиків, формує постійні напруги, що мають залежність від R або C.

Ці напруги перетворюються в інтервали часу (інтегруючий АЦП типу ICL7135 - в режимі перетворення вхідної напруги в інтервали часу) і потім ці інтервали часу будуть конвертовані в код у мікроконтролері. Еквівалентна схема заміщення ємнісного датчику та його параметри є в таблиці 2.1.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17

Таблиця 2.2.1 – Еквівалентна схема заміщення ємнісного датчика та його параметри

Модель	Параметри
 $ Z(j\omega) = \frac{1}{ Y(j\omega) } > 1 k\Omega$ <p><u>Вимірювані величини:</u></p> $C_X = C_P$ R_P	$\dot{U}_X = \frac{R_0}{Z_X} \dot{U}_0 = R_0 \dot{Y}_X \dot{U}_0$ $\dot{Y}_X = \frac{1}{R_P} + j\omega C_P$ $ \dot{Y}_X = \sqrt{\left(\frac{1}{R_P}\right)^2 + (\omega C_P)^2}$ $\text{Im}\{\dot{Y}_X\} = \omega C_P$ $\text{Re}\{\dot{Y}_X\} = \frac{1}{R_P}$ $\text{tg}\delta = \frac{\text{Re}\{\dot{Y}_X\}}{\text{Im}\{\dot{Y}_X\}} = \frac{1}{\omega R_P C_P}$

Напруга на виході перетворювача «імітанс-напруження»

$$\dot{U}_X = \frac{R_{0i}}{Z_X} \dot{U}_0 = \dot{Y}_X R_0 \dot{U}_0 = \dot{Y}_X R_{0i} U_{m0} e^{j\varphi_0} \quad (2.2.1.)$$

де \dot{U}_0 - напруга випробувального сигналу, з фазою, яка дорівнювати 0. Тоді напруга, яка відтворює імітанс датчика дорівнюватиме:

$$\begin{aligned} \dot{U}_X &= \left(\frac{1}{R_{PX}} + j\omega_0 C_{PX} \right) R_{0i} U_{m0} = \frac{R_{0i}}{R_{PX}} U_{m0} + j\omega_0 C_{PX} R_{0i} U_{m0} ; \\ \dot{U}_X &= U_{mX} e^{j\varphi_X} = U_{mX} \cos \varphi_X + j U_{mX} \sin \varphi_X ; \\ \text{Re}\{\dot{U}_X\} &= U_{mX} \cos \varphi_X = \frac{R_{0i}}{R_{PX}} U_{m0} ; \\ \text{Im}\{\dot{U}_X\} &= U_{mX} \sin \varphi_X = \omega_0 C_{PX} R_{0i} U_{m0} . \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

Далі напруга потрапляє на фазочутливий перетворювач. На входи синхронного детектора, подається напруга яка є зміщеною по фазі на 90, або синфазну напругу.

Також при формуванні керуючих або ключових напруг, виконується компенсація фазових зсувів у вимірювальному ланцюгу. Вхідний сигнал фазочутливого перетворювача може мати уявну чи дійсну складові, які перетворюються у постійні вихідні напруги.

У випадку коли ми маємо синфазну ключову напругу:

$$\begin{aligned} U_{\Phi HЧ} &= K_M \frac{2}{\pi} U_{mX} \cos \varphi_X = K_M \frac{2}{\pi} \operatorname{Re}\{\dot{U}_X\} = K_M \frac{2}{\pi} \operatorname{Re}\{\dot{Y}_X\} R_{0i} U_{m0} = \\ &= K_M \frac{2}{\pi} \frac{R_{0i}}{R_{PX}} U_{m0} ; \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Коли ключова напруга має зсув 90, від випробувального сигналу:

$$\begin{aligned} U_{\Phi HЧ} &= K_M \frac{2}{\pi} U_{mX} \sin \varphi_X = K_M \frac{2}{\pi} \operatorname{Im}\{\dot{U}_X\} = K_M \frac{2}{\pi} \operatorname{Im}\{\dot{Y}_X\} R_{0i} U_{m0} = \\ &= K_M \frac{2}{\pi} \omega_0 C_{PX} R_{0i} U_{m0} \end{aligned} \quad (2.2.4)$$

Для вимірювання напруги ФНЧ ми використовуємо АЦП з подвійним інтегруванням, з прямим тактом протягом заданого часу. Загалом цикл вимірювання цього типу АЦП включає 3 етапи:

- інтегрування заданої напруги ФНЧ;
- використання опорної напруги для розряду інтегруючого конденсатора;
- автоматичне коректування нуля;

У АЦП(ICL7135) вихідна напруга ФНЧ перетворюється в інтервали T_X .

$$T_X = T_0 \frac{U_{\Phi HЧ}}{U_{REF}} = \frac{N_0}{f_{T.n}} \frac{U_{\Phi HЧ}}{U_{REF}}$$

T_0 - незмінний час, за який відбувається інтегрування напруги ФНЧ $N_0 = 1000$;

f_T - частота генератора АЦП, який видає тактові імпульси і є вбудованим;

U_{REF} - зовнішня еталона опорна напруга АЦП.

Мікроконтролер відповідає за вимірювання часового інтервалу. Він використовує власний таймер для вимірювання.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						19
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Показання, отримані за перші два цикли, а саме, вимірювання, та розрахункова корекція результату, відповідно дорівнюють:

$$N_{C_{P0}}^I = (\omega_0 R_{01} C_{P0} U_{m0}) K_{M2} K_{\Phi HЧ} \frac{N_0}{f_{T.n.}} \frac{1}{U_{REF}} f_K, \quad (2.2.5)$$

$$N_{C_{PX}}^II = (\omega_0 C_{PX} R_{0i} U_{m0}) K_{M2} K_{\Phi HЧ} \frac{N_0}{f_{T.n.}} \frac{1}{U_{REF}} f_K \quad (2.2.6)$$

$$N_{C_{PX}} = \left(\frac{N_{C_{P0}}^I}{N_{C_{PX}}^II} \right) = \frac{C_{PX}}{C_{P0}} \frac{R_{0i}}{R_{01}} \quad (2.2.7)$$

Автоматичне калібрування, або вимірювання ємності компенсатора датчика, відбувається протягом певного періоду часу, наприклад 200 секунд. Після чого, за результатами обчислень та відліків мікроконтролера, починається обчислення кількості(маси) пального:

$$N_{C_{PX}} = \frac{\frac{C_0}{H} h(\varepsilon_T - 1) + C_0}{\varepsilon_T C_0} \cdot \frac{R_{0i}}{R_{0k}} = \frac{\frac{C_0}{H} \frac{V}{S} (\varepsilon_T - 1) + C_0}{\varepsilon_T C_0} \cdot \frac{R_{0i}}{R_{0k}} \quad (2.2.8)$$

$$m_T = \rho \cdot V \quad (2.2.9)$$

ρ , V - щільність та об'єм палива в баку

2.3 Вимірювання температури

Для вимірювання температури палива був обраний датчик AD592C виробництва Analog Devises. Датчик AD592C є біполярним джерелом струму, пропорційним температурі в Кельвіні (К), використовуючи $p-n$ перехід транзистора, як чутливий елемент.

Вихідною функцією цього датчику є:

$$I_t = K_t T = 273.2 \text{ мкА} + K_t t,$$

$K_t = 1 \text{ мкА/град.}$ - коефіцієнт перетворення;

Діапазон вимірюваних температур, ° С: від - 55 до + 150

вихідне значення струму:

а) Номінальна, коли температура дорівнює + 25 ° С: 298,9 мкА

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						20
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

б) Діапазон вимірювання від 248,2 до 378,2 мкА

Похибка, ° С

а) При температурі + 25 ° С (без калібрування): 0,5-1

б) У діапазоні температур (з калібруванням, коли температура дорівнює 25 ° С): 0,35

в) Нелінійність, ° С: 0,1

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						21
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3 СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ФУНКЦІЙНА

3.1 Генератор синусоїдальної напруги

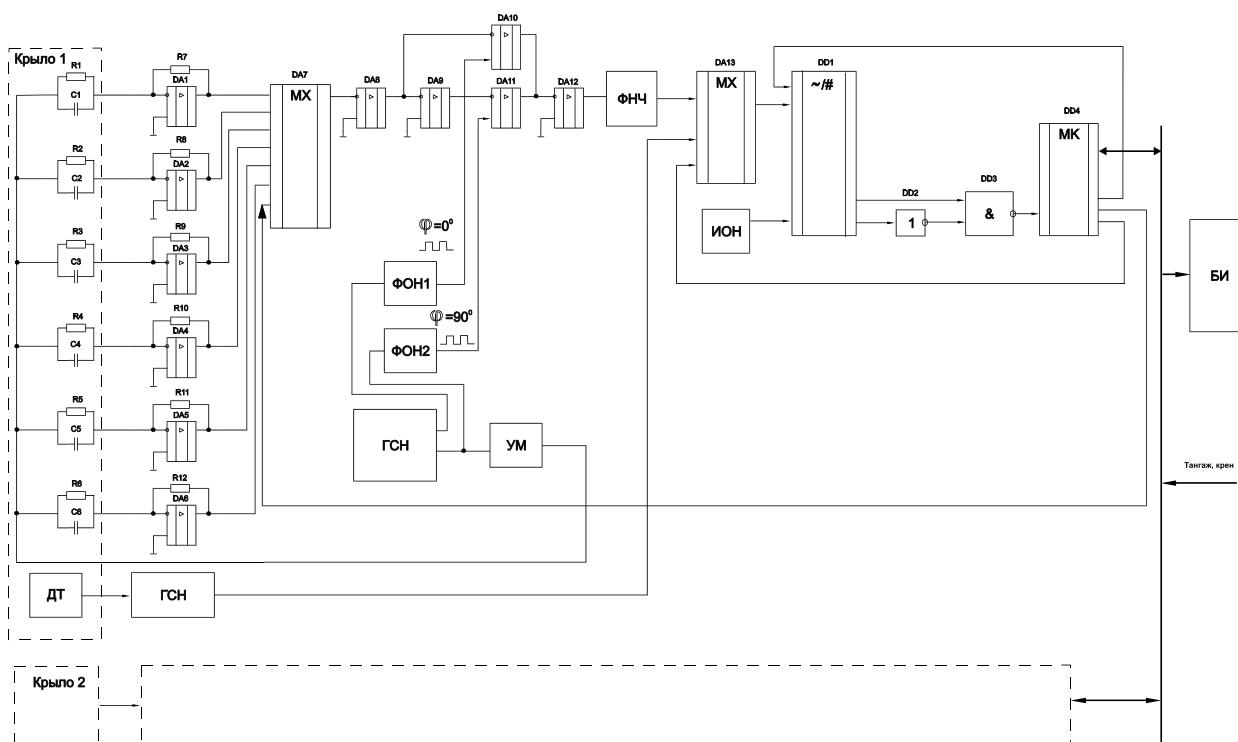


Рис.3.1.1 – Функційна схема інформаційно-вимірювальної системи розходу палива

Канал вимірювання включає датчик ємності, датчик компенсатора, датчик температури, фазочутливий випрямляч, що складається з синхронного детектора та фільтра низьких частот, генератор синусоїдальної напруги, генератор опорної напруги, інтегральний перетворювач часу-напруги та мікроконтролер

Активний опір еквівалентної схеми ємнісного датчика не дає інформації. Тому для усунення впливу резистивного опору датчика використовується фазочутливе перетворення, і рекомендується вимірювати значення ємності датчика на частоті $f_{02} = 1 \text{ кГц}$. У цьому випадку вплив активних компонентів невеликий.

Призначений для формування гармонійного випробувального сигналу (ВС) з низькими нелінійними спотвореннями на частоті 10кГц, та отримання 2-х опорних синусоїдальних сигналів: синфазний, що має зсув $\varphi = 0^\circ$, та

квадратурний опорний сигнал, що має зсув $\varphi = 90^\circ$ відносно до випробувального сигналу.

3.2 Підключення датчиків

Схема підключення ємнісного датчика у перетворювач «імітанс-напруга» забезпечує режим заданої напруги на полюсах датчика, а також перетворює імітанс датчика (пасивна величина) в активну величину – вихідну напругу.

Для дистанційного вимірювання не можна використовувати, наприклад, схему з чотирма затискачами, яка мінімізує вплив опору дроту. На великих відстанях датчик можна підключити до перетворювача «імітанс-напруга» лише за допомогою 2-х екранованих проводів.

На частотах до 10 кГц і відстанях до 10 м ефект кабелю еквівалентний ефекту концентрованої ємності. Перетворювач «імітанс-напруга» забезпечує перетворення параметрів паралельної схеми заміщення датчика у напругу, а також мінімізує вплив ємності з'єднувального кабелю.

На ємність дроту, через повторювач безпосередньо підключен генератор синусоїдальної напруги, який має нульовий опір.

З боку вихідного підсилювача перетворювач «імітанс-напруга» потенціал вхідної точки близький до нуля. Тому струм витоку через шунтуючу ємність кабелю, тобто вплив ємності кабелю, зведений до мінімуму, тому що екран підключений до загальної точки нульового потенціалу.

3.3 Фазочутливе перетворення

Ця схема забезпечує вибір уявного $\text{Im}\{U_x\}$ компонента з напруги, яка є пропорційною ємності датчика, і перетворення його в постійну напругу.

У склад схеми входять синхронний детектор типу «ключ» та фільтр низьких частот. Рис. 3.3.1 зображений фазочутливий випрямляч.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		23

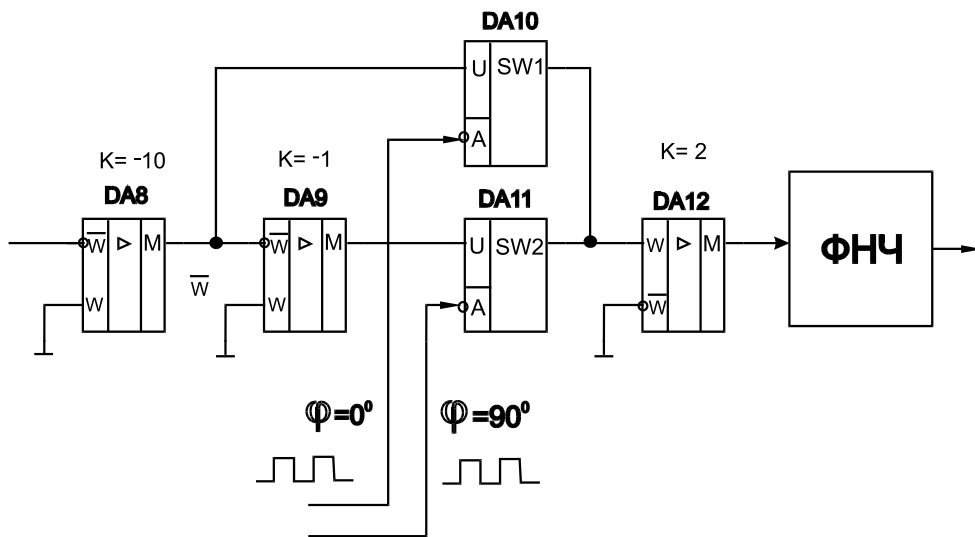


Рис. 3.3.1 – Фазочутливий випрямляч

Управління ключами синхронного детектора здійснюється сигналами типу "меандр" (прямий та інвертований), зміщеними на 90° відносно випробувального сигналу, що подається на датчик.

Робота схеми типу «ключ» відповідає точному множенню вхідного синусоїдального сигналу та прямокутну періодичну функцію.

Якщо ключова опорна напруга $s_{KB}(t)$, що має зсув $\varphi = 90^\circ$, то відбувається множення синусоїдальної напруги на функцію «ключ» в наступному вигляді. Результат множення виражається рядом Фур'є:

$$U_Y(t) = U_X(t) \cdot s_{KB}(t) = U_{Xm} \cdot \sin(\omega t + \varphi_X) \cdot A \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\omega t}{(2n-1)}$$

Середнє значення інтегралу від цей напруги за час, рівний цілому числу циклів m , відтворює уявну складову імпедансу датчика.

$$\begin{aligned} U_{Im} &= \frac{1}{mT_0} \int_0^{T_{им.}} U_Y(t) dt = \frac{1}{mT_0} \int_0^{T_{им.}} \{ U_{Xm} [\cos \varphi_X \cdot \sin \omega t + \sin \varphi_X \cdot \cos \omega t] \times \\ &\quad \times A \frac{4}{\pi} [\cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \dots] \} dt = \\ &= \frac{1}{mT_0} \int_0^{T_{им.}} \frac{4}{\pi} U_{Xm} \{ \cos \varphi_X \cdot \sin \omega t \cdot \cos \omega t + \sin \varphi_X \cdot \cos^2 \omega t + \dots \} dt = \\ &= \frac{2}{\pi} U_{Xm} \cdot \sin \varphi_X \end{aligned}$$

Тому що інтеграл від синусоїдальної функції та косинусоїдальної функції та їх похідних за проміжок часу, що дорівнює або кратний цілому числу періодів, дорівнює нулю.

Після синхронного детектора сигнал надходить на фільтр низьких частот, який виділяє постійну складову, яка пропорційна ємності датчика.

3.4 Формувач опорних напруг

Формувач призначений для створення опорної квадратурної напруги типу "меандр", що подається на вхід управління інтегральним ключем синхронного детектора. Формувачі побудовані на інтегральних компараторах - вони забезпечують формування вихідної напруги рівня ТТЛ. Опорні сигнали формуються із квадратурних напруг генератора синусоїдального сигналу.

3.5 АЦП-перетворювач напруга-час

АЦП перетворює інформаційні постійні напруги вихідного сигналу ФЧВ, пропорційні $U_{xm} \sin \varphi_x$ та $U_{xm} \cos \varphi_x$, в інтервали часу T_x .

АЦП ICL7135 від MAXIM працює за принципом двохтактного інтегрування. Цифрова частина АЦП містить додаткові виходи – кінець першого такту інтегрування вхідної напруги і кінець зворотного інтегрування опорної напруги або кінець всього перетворення, з них можна сформувати інтервал часу T_x , який пропорційний вимірювальній постійній напруги.

Дуже зручно передавати сигнал у вигляді інтервалу часу T_x на контролер, де вимірюється час. Квантування T_x може виконуватися на зручній 16-разрядній бітовій розрядності, використовуючи внутрішній генератор квантуючих імпульсів контролера.

На рис. 3.5.1 представлена аналогова частина АЦП ICL7135.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

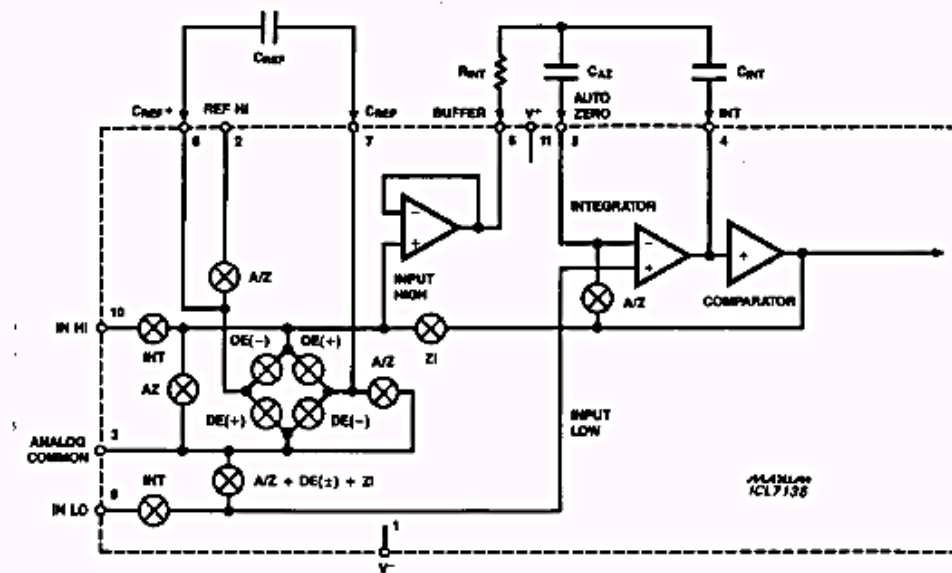


Рис. 3.5.1 – Схема аналогової частини АЦП ICL7135

АЦП включає повторювач напруги, інтегратор, компаратор, блок формування загального потенціалу, аналогові ключі та цифрову частину (не показано на рис.). Резистори та конденсатори – зовнішні визначають постійну часу інтегратора.

Конденсатор C2 - в ланцюзі корекції напруги зміщення підсилювачів. Опорна напруга зберігається на конденсаторі C3. Резистор і конденсатор C4 - визначають частоту та тривалість імпульсів такту. АЦП має диференціальні входи для перетворюваної напруги та опорної напруг.

У першому циклі куючи S1 і S2 відкрити, інтегрується вхідна напруга. Тривалість складає - 1000 імпульсів тактів.

В кінці першого циклу блок управління оцінює знак напруги $U_{ВХ}$ відповідно до сигналу компаратора. У другому циклі інтегрується опорна напруга, полярність вихідної напруги встановлюється на протилежну. Тривалість другого циклу визначається часом, коли напруга на виході інтегратора стає нулю. Тривалість - від 0 до 2000 імпульсів тактів.

3.6 Перетворювач температури

Для вимірювання температури палива ми обрали датчик AD592C виробництва Analog Devises.

Датчик AD592C є біполярним джерелом струму, пропорційним температурі в Кельвіні (K), використовує як чутливий елемент р-п переходи однотипних транзисторів.

Вихідна функція датчику:

$$I_t = K_t T = 273.2 \text{ мкА} + K_t t,$$

Серед них коефіцієнт перетворення K_t дорівнює: 1 мкА / град;

діапазон вимірюваних температур, ° C: від -55 до + 150;

вихідне значення:

- номінальна температура + 25 °: 298,9 мкА;
- діапазон вимірювання: від 248 мкА до 378 мкА;

вихідні похибки, ° C;

- при виставленій температурі + 25 ° C (без використання калібрування): 0,5-1;
- у діапазоні температур (з використанням калібрування, при $t = 25^\circ \text{C}$): 0,35;
- нелінійність, ° C: 0,1;

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						27
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4 СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА

4.1 Генератор синусоїдального випробувального сигналу

На Рис. 4.1.1 Зображено генератор синусоїдальної випробувальної напруги за структурою Ван де Поля

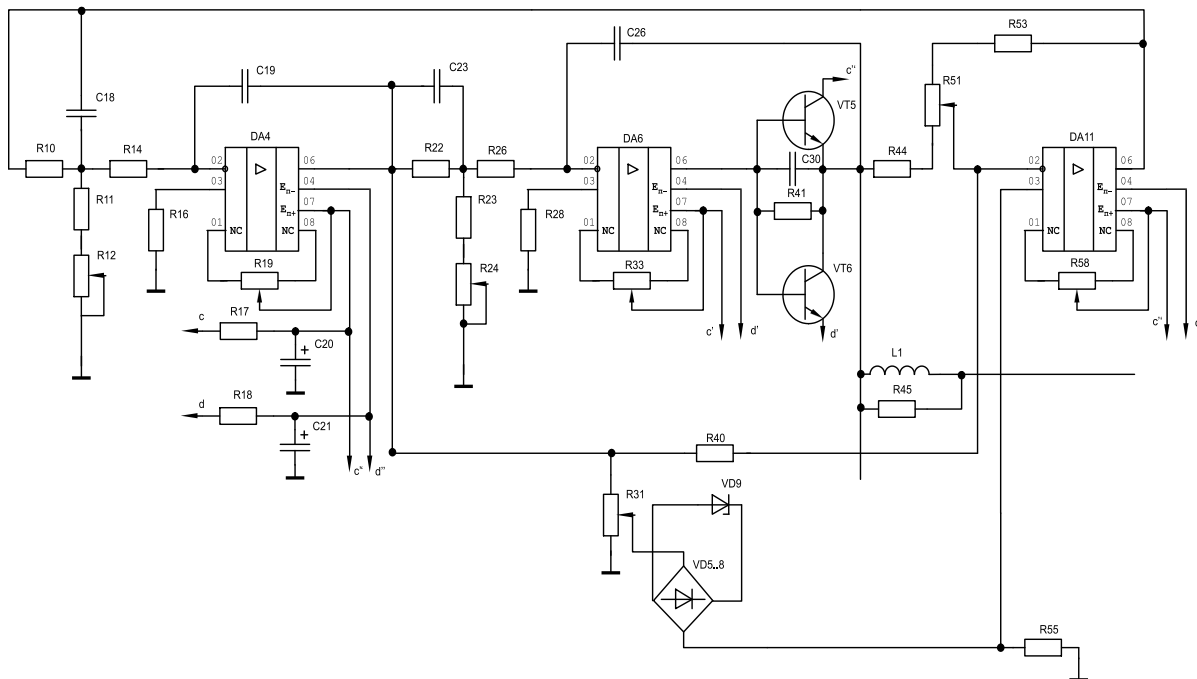


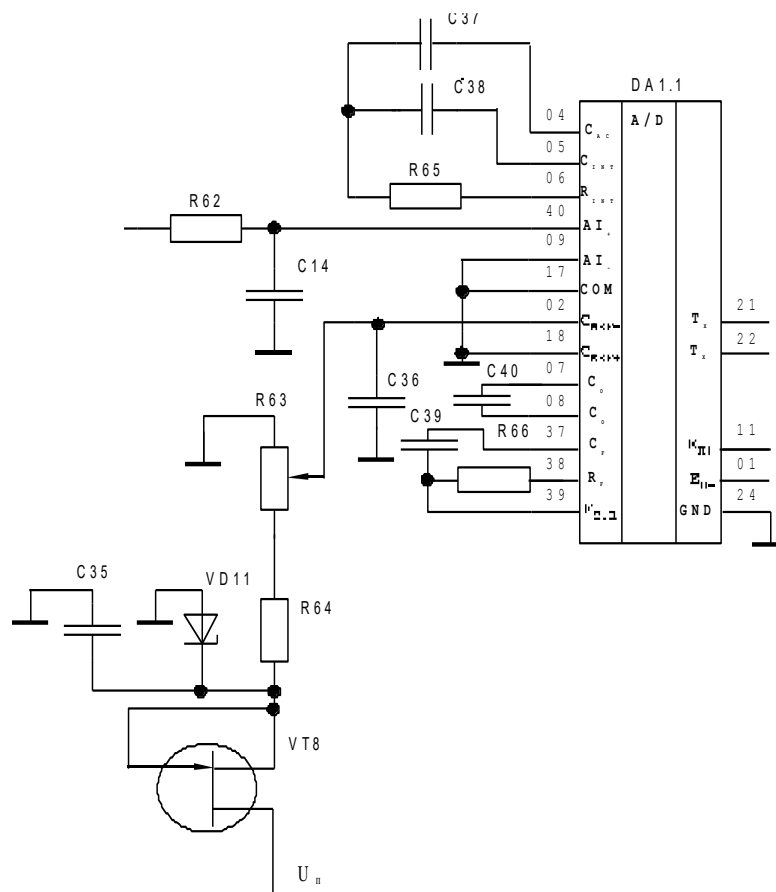
Рис. 4.1.1 – Генератор синусоїдальної випробувальної напруги за структурою
Ван де Поля

З виходів інтеграторів знімаємо напругу випробувального сигналу, яка має початкову фазу 0° , і квадратурну напругу, яка має зміщення на 90° по відношенню до випробувального сигналу.

Дільник напруги на компонентах R31, R55, діодний міст VD5, ..., VD8 і стабілітрон VD9, забезпечують амплітудний баланс нелінійного диференціального рівняння квазісинусоїдальних коливань. Змінний опір R51 - регулювання амплітуди синусоїдального коливання. Частота коливань визначається зовнішніми компонентами та компонентами зворотного зв'язку інтегруючих підсилювачів. Тобто, частота не має нічого спільного з амплітудою коливань і визначається наступним чином

Похибки завдання амплітуди і частоти коливань випробувального синусоїдального сигналу під час обчислень комплексного опору виключається. Важливо забезпечити короточасну стабільність. Оскільки синхронний детектор ключового типу - важливо забезпечити низький рівень нелінійних спотворень квазисинусоїдальних коливань. Схема має коефіцієнт гармонійних спотворень 0,03%.

На рис.4.2.1 зображений перетворювач напруга-час, який заснован на ICL7135



Призначений для перетворення інформаційної постійної напруги, пропорційної $U_{Cx} \equiv U_x \sin \phi_x$ в інтервалі часу T_X - зручне для передачі та

подальшого вимірювання за допомогою МК. АЦП ICL7135 використовується як перетворювач напруга-час.

Вибираємо значення опорної напруги 1 В. Діапазон вхідної напруги ± 2 В. Схема на основі стабілітрона VD11 - для формування опорної напруги. Стабільне джерело струму побудовано на польовому транзисторі К303Е.

Тривалість першого циклу інтегрування повинна бути кратною періоду вимірювального сигналу, тобто при частоті 100 Гц час циклу - кратний 10 мс. Для виключення мережевих перешкод - встановлюємо період кратний 20 мілісекундам.

Вибираємо час інтегрування вхідного сигналу, рівний 10 циклам частоти - 100 Гц, що становить 100 мілісекунд.

Виходячи з $T_1 = 100$ мілісекунд (або часу 10 циклів, що дорівнює найнижчій частоті випробувального сигналу 100 Гц), частота тактових імпульсів генератора АЦП повинна бути $f_T = 40$ кГц.

Отже, повний цикл перетворення становитиме $T_{\Sigma} = 0,4$ с, де перший цикл (інтегрування вхідної напруги) дорівнює $T_1 = 100$ мс; інтегрування опорної напруги становить 0-200 мс.

На рис. 4.2.2 зображено графік залежності U від t , та розрахунок часу інтегрування опорної напруги в середовищі AutoCAD.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		31

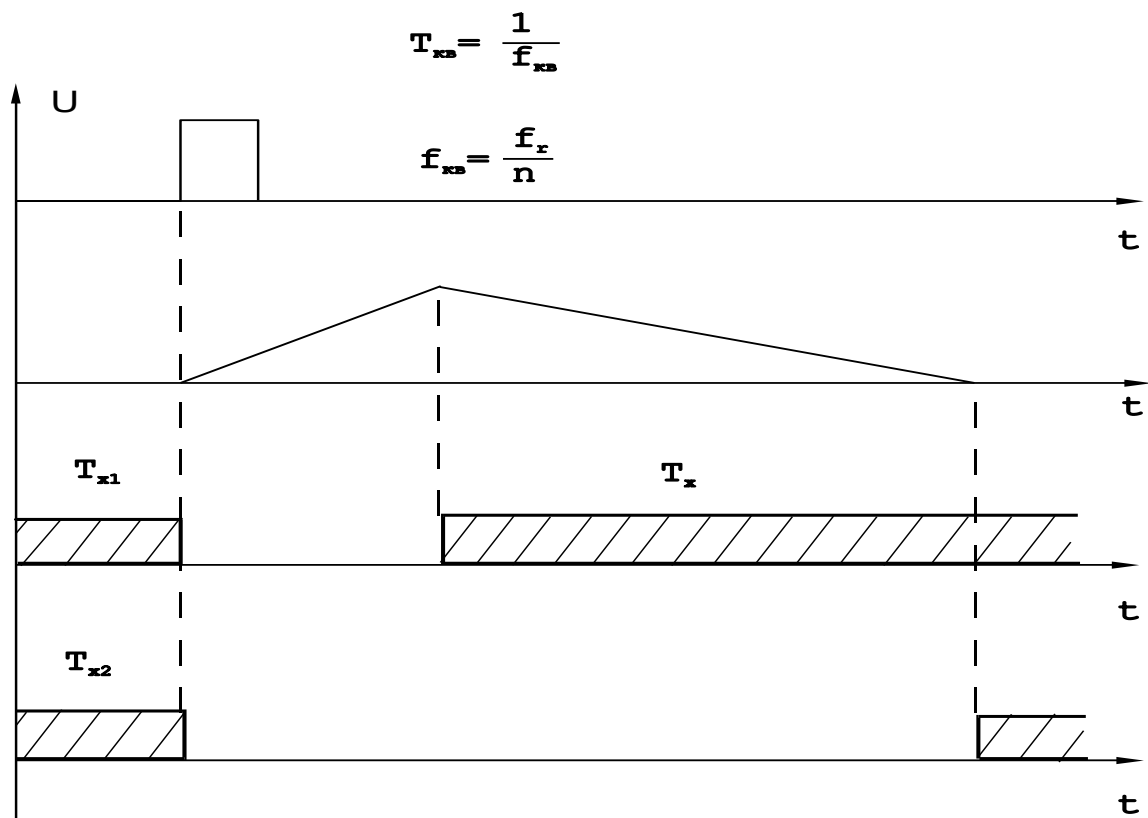


Рис. 4.2.2 - графік залежності U від t, та роозрахунок часу інтегрування опорної напруги в середовищі AutoCAD.

4.3 Фільтр низьких частот

Коефіцієнт передачі в смугі пропускання, дБ	Частота зрізу f_c , Гц	Гранична частота смуги затримки f_s , Гц	Мінімальне ослаблення в смугі затримки, дБ	Нерівномірність АЧХ в смугі пропускання, дБ	Тип фільтра	Тип апроксимації АЧХ	Тип ланки
0	100	250	40	1	ФНЧ	Ч1	MFB (Пауха)

Нормована АЧХ [фільтра Чебишева-1](#):

$$\hat{A}(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot T_n^2(\Omega)}}.$$

$$f_c := 100 \quad f_s := 250 \quad R_p := 1 \quad \Omega_s := \frac{f_s}{f_c} \text{ float, 4} \rightarrow 2.5 \quad \text{AdB} := -40$$

$$\Omega_s = 2.5 \quad \varepsilon_{xx} := \sqrt{10^{\frac{R_p}{10}} - 1} \text{ float, 4} \rightarrow 0.5088$$

$$\hat{A}(n, x) := \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot \text{Tcheb}(n, x)^2}}$$

На рис 4.3.1 зображено нормоване АЧХ.

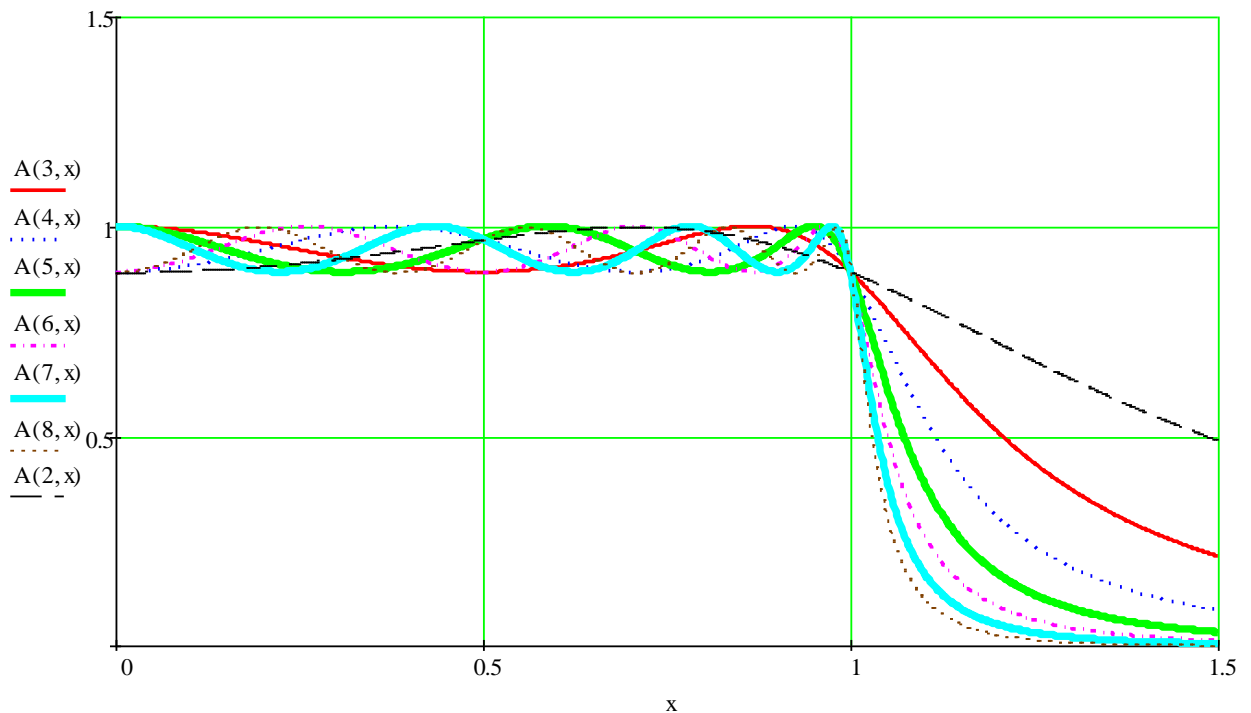


Рис 4.3.1 – Нормована АЧХ

Знайдемо порядок нашого фільтру:

$$20 \cdot \log \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot (\text{Tcheb}(4, \Omega_s))^2}} \right] = -42.5468 \quad \text{Nfiltr} := 4$$

Полюси передатної функції прототипу фільтра:

$$v0 := \frac{1}{\text{Nfiltr}} \cdot \ln \left(\frac{1}{\varepsilon} + \sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + 1} \right) \text{ float}, 4 \rightarrow 0.357 \quad j := \sqrt{-1} \quad k := 1 \dots 2 \cdot \text{Nfiltr}$$

$$sp_k := -\sinh(v0) \cdot \sin \left[\frac{(2 \cdot k - 1) \cdot \pi}{2 \cdot \text{Nfiltr}} \right] + j \cdot \cosh(v0) \cdot \cos \left[\frac{(2 \cdot k - 1) \cdot \pi}{2 \cdot \text{Nfiltr}} \right]$$

$$sp_k = \begin{pmatrix} -0.1395 + 0.9834i \\ -0.3369 + 0.4073i \\ -0.3369 - 0.4073i \\ -0.1395 - 0.9834i \\ 0.1395 - 0.9834i \\ 0.3369 - 0.4073i \\ 0.3369 + 0.4073i \\ 0.1395 + 0.9834i \end{pmatrix}$$

Обираємо полюси, лише з від'ємною дійсною, існуючою частиною. Наша передатна функція нормованого прототипу фільтра, буде мати вигляд:

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

Передатна функція нашого фільтру в реальному розмірі за частотою:

$$u := \frac{s}{2 \cdot \pi \cdot 100}$$

$$\text{HM3}(s) := \text{HM1}(s) \cdot \text{HM2}(s) \text{ float}, 4 \rightarrow \frac{4.296e10}{(175.4 \cdot s + s^2 + 389459.0) \cdot (423.2 \cdot s + s^2 + 110303.0)}$$

Розрахуємо схему фільтруючих елементів за параметрами, які є в її математичної моделі. Для ФНЧ(фільтра низьких частот) першого ступеня маємо:

$$v0(s) := 1$$

Given

$$\frac{v0(s) - v1}{R1} + \frac{(v3 - v1)}{R2} = \frac{v1 - v2}{R3} + v1 \cdot (C1 \cdot s) \quad \frac{v1 - v2}{R3} = (v2 - v3) \cdot C2 \cdot s \quad v2 = 0$$

$$\text{Find}(v1, v2, v3)_2 \text{ collect}, s \rightarrow -\frac{R2}{C1 \cdot C2 \cdot R1 \cdot R2 \cdot R3 \cdot s^2 + (C2 \cdot R1 \cdot R2 + C2 \cdot R1 \cdot R3 + C2 \cdot R2 \cdot R3) \cdot s + R1}$$

Системна функція :

$$\text{HC1}(s) := \frac{\frac{-R2}{R1} \cdot \frac{1}{(C1 \cdot C2 \cdot R3 \cdot R2)}}{s^2 + \frac{1}{C1} \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right) \cdot s + \frac{1}{(C1 \cdot C2 \cdot R3 \cdot R2)}}$$

Математична модель для нашого першого каскаду :

$$\text{HM1}(s) \text{ float}, 4 \rightarrow \frac{389459.0}{175.4 \cdot s + s^2 + 389459.0}$$

Отримуємо систему рівнянь, порівнявши коефіцієнти які знаходяться у знаменниках:

Given

$$175.4 = \frac{1}{C1} \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right) \quad 389459.0 = \frac{1}{(C1 \cdot C2 \cdot R3 \cdot R2)} \quad \frac{389459.0}{389459.0} = \frac{R2}{R1}$$

$$C1 = 1 \cdot 10^{-6} \quad C2 = 100 \cdot 10^{-12}$$

$$\begin{pmatrix} C1 \\ C2 \\ R1 \\ R2 \\ R3 \end{pmatrix} := \text{Find}(C1, C2, R1, R2, R3)^{(1)} \text{ float}, 4 \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0\text{e-}6 \\ 1.0\text{e-}10 \\ 11431.0 \\ 11431.0 \\ 2.246\text{e}6 \end{pmatrix}$$

Аналогічно, обчислюємо елементи другого каскаду

$$j := \sqrt{-1}$$

```

BodePlot(F, MinFreq, MaxFreq) :=
    ndk ← 500
    n ← ndk · ceil(log( (MaxFreq / MinFreq) ))
    r ← ln( (MaxFreq / MinFreq) )
    for i ∈ 0..n
        f ← MinFreq · ei·r/n
        Zi,0 ← f
        V ← F(j·2π·f)
        Zi,1 ← 20·log(|V|)
        Zi,2 ← arg(V)·180/π
    for i ∈ 1..n
        Zi,2 ← Zi,2 - 360·sign(Zi,2 - Zi-1,2) if (|Zi,2 - Zi-1,2|) > 300
    Z

```

Амплітудна та фазова характеристики електричної схеми (окремих ланок та всього фільтру)

$zB := \text{BodePlot}(\text{HM1}, 1, 100000)$ $i := 0.. \text{last}(zB^{(0)})$ $zB1 := \text{BodePlot}(\text{HC1}, 1, 100000)$
 $zB2 := \text{BodePlot}(\text{HM2}, 1, 100000)$ $zB3 := \text{BodePlot}(\text{HM3}, 1, 100000)$

На рис. 4.3.2 – зображена амплітудна характеристика електричної схеми (окремих ланок, та всього фільтру). На рис. 4.3.3 – зображена фазова характеристика електричної схеми (окремих ланок, та всього фільтру).

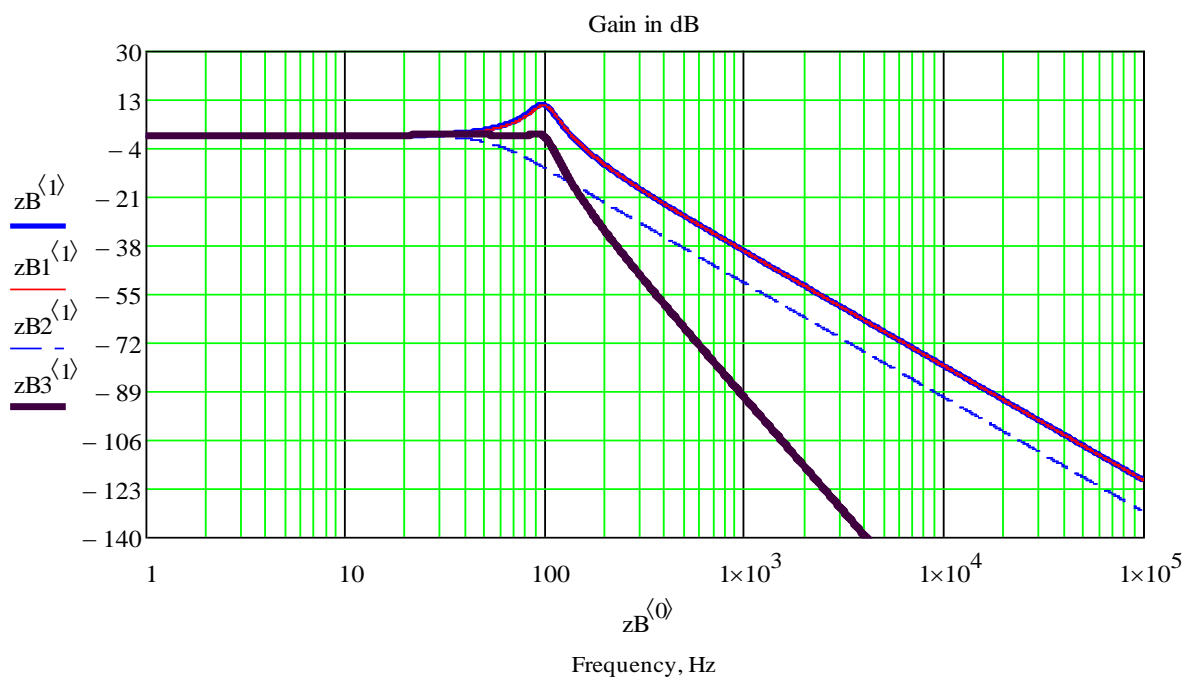


Рис. 4.3.2 – Амплітудна характеристика електричної схеми (окремих ланок, та всього фільтру)

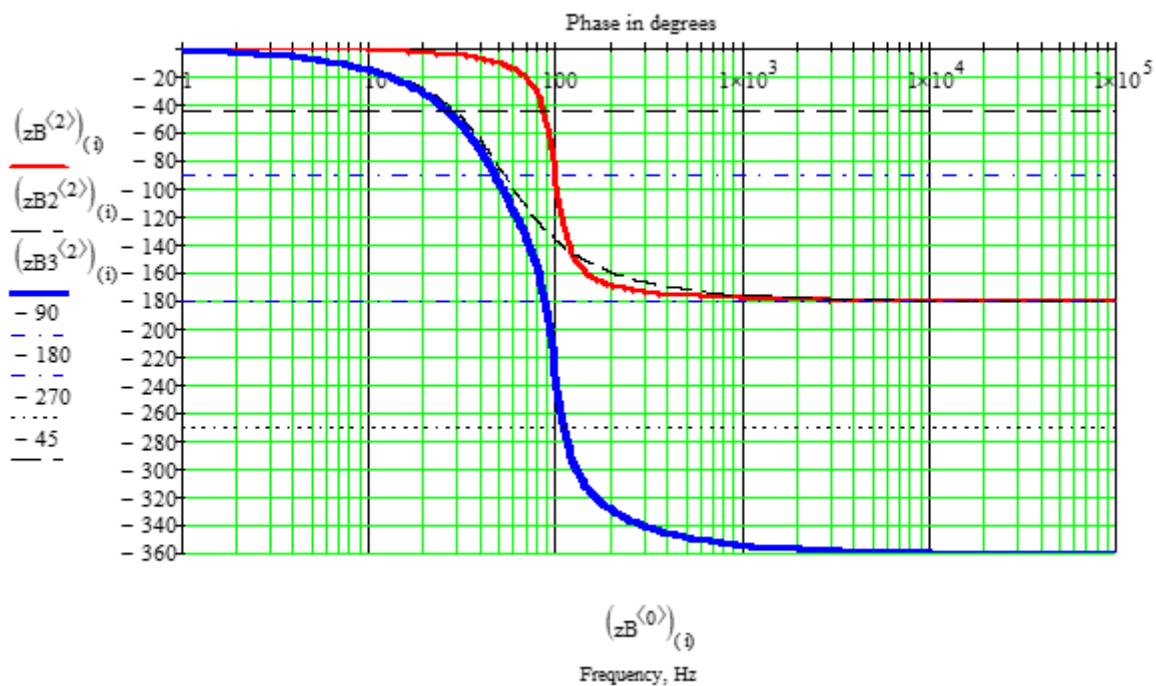


Рис. 4.3.2 – Фазова характеристика електричної схеми (окремих ланок, та всього фільтру)

4.4 Формувачі опорних квадратурних сигналів СД

Формувач - для створення квадратурного опорного сигналу відносно випробувального, який подається на ключі синхронного детектора. На рис. 4.4.1 зображені формувачі опорних квадратурних сигналів СД

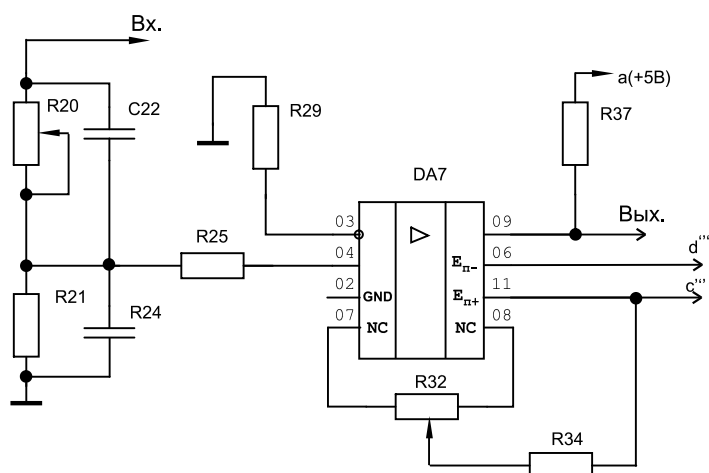


Рис. 4.4.1 – формувачі опорних квадратурних сигналів СД

Формувачі побудовані на компараторах К554СА3, які в свою чергу забезпечують формування рівнів вихідної напруги ТТЛ. Схема фазового зсуву на вході компаратора забезпечує компенсацію фазового зміщення, що з'являється в вимірювальному каналі.

5 АНАЛІЗ ПОХИБОК

5.1 Рівняння перетворення

Однім з недоліків є похибка, спричинена вхідним імпедансом, який не є нульовим в діапазоні частот, та впливом ємності кабелю. На рис. 5.1.1 зображений перетворювач імпеданс-напруга.

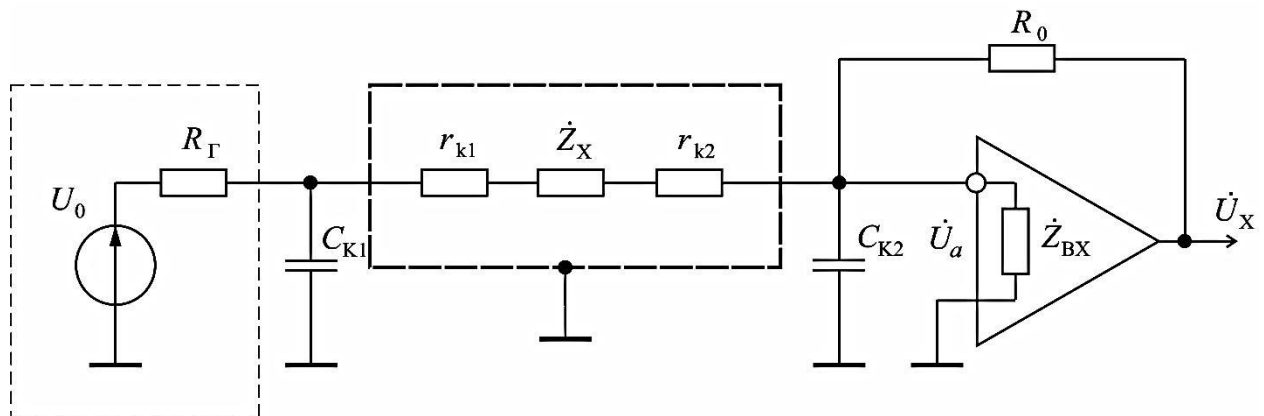


Рис. 5.1.1 – перетворювач імпеданс-напруга

C_k – ємності екранованих кабелів,

r_{k1} – значення активного опору кабелів.

Коаксіальний кабель має опір на постійному струмі та ємність.

$$r_k = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м} \quad C_0 = 1 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/м}$$

Відстань 10 м. Еквівалентна ємність

$$C_k = C_0 \cdot l = 1 \cdot 10^{-10} \cdot 10 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Вихідна напруга

$$\frac{1}{\dot{Z}_X}(\dot{U}_0 - \dot{U}_a) + \frac{1}{R_0}(\dot{U}_X - \dot{U}_a) - \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}_{\text{BX.ОУ}}} - \dot{U}_a \cdot j\omega C_K = 0, \quad (5.1.1)$$

де

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_X}{\dot{K}(j\omega)}, \quad (5.1.2)$$

Коефіцієнт посилення має комплексний характер.

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{K_0}{1 + j\omega\tau_0} \approx \frac{K_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_1} K_0}, \quad (5.1.3)$$

вирішивши отримаємо

$$\dot{U}_X = -U_0 \cdot \frac{R_0}{\dot{Z}_X} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_1} \left[1 + \frac{R_0}{\dot{Z}_X} + \frac{R_0}{\dot{X}_{BX}} + j\omega C_K R_0 \right]} \quad (5.1.4)$$

Амплітудна похибка дорівнює:

$$\gamma_k(\omega) = x + 0,5(x^2 + y^2) = \frac{\omega}{\omega_1} [\omega C_X R_0 + \omega C_K R_0] + 0,5 \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \left\{ (\omega C_X)^2 R_0^2 + \left[1 + \frac{R_0}{R_X} \right]^2 + 2\omega C_K R_0^2 \omega C_X + \omega^2 (C_K R_0)^2 \right\}. \quad (5.1.5)$$

Фазова похибка дорівнює:

$$\Theta(\omega) = \frac{-y}{1+x} \cong -y(1-x) = -\frac{\omega}{\omega_1} \left\{ 1 + \frac{R_0}{R_X} - \frac{\omega}{\omega_1} (\omega C_X) R_0 \left[1 + \frac{R_0}{R_X} \right] - \frac{\omega^2}{\omega_1} C_K R_0 \left[1 + \frac{R_0}{R_X} \right] \right\}. \quad (5.1.6)$$

Амплітудна похибка обумовлена кінцевим коефіцієнтом посилення в смузі частот, залежить від частоти сигналу.

При дистанційних вимірах маємо ємність кабелю 1 nF. Мінімальне значення ємності датчика 159 pF. При вимірюваннях ємності датчика-компенсатора 318 pF. Маємо однакові резистори $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$. Маємо амплітудну похибку в різні такти при частоті $f = 10 \text{ кГц}$:

$$\gamma^I(\omega) = 0,087 \cdot 10^{-3} \text{ и } \gamma^{II}(\omega) = 0,052 \cdot 10^{-3}$$

Фазова похибка також залежить від частоти. Похибка має максимальне значення при 10 кГц і в різні такти вимірювань рівна:

$$\Theta^I(\omega) = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ рад. и } \Theta^{II}(\omega) = 0,94 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

Беручи до уваги похибки блоків отримаємо рівняння перетворення

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						39
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Для цифрового відліку у разі вимірювання ємності датчика палива:

$$N_{C_{px}}^I = \left[\operatorname{Im} \left\{ \left(\frac{R_{01}}{R_{px}} + j\omega C_{px} R_{01} \right) \left(1 + \gamma_K^I(\omega) \right) e^{j\Theta^I(\omega)} U_{m0} (1 + \gamma_{U_{m0}}) K_M (1 + \gamma_M) \right\} + \Delta_{\Phi_{CB}} \right] \times \\ \times K_{\Phi_{CB}} (1 + \gamma_{\Phi_{CB}}) T_0 (1 + \gamma_{T_0}) \frac{1}{U_{REF} (1 + \gamma_{REF})} f_K + \Delta_{\kappa\delta}$$

де $\Delta_{\kappa\delta} \in [0,1]$ - похибка квантування АЦП, відносно значення якої не буде враховуватися.

Частота випробувального сигналу $\omega = \omega_0 (1 + \gamma_\omega)$, де γ_ω - відносна похибка

Для паралельного двополюсника маємо

$$\left[\frac{R_0}{R_X} + j\omega C_X R_0 \right] [1 + j\Theta(\omega)] = \left[\frac{R_0}{R_X} - \Theta(\omega) \omega C_X R_0 \right] + j \left[\omega C_X R_0 + \Theta(\omega) \frac{R_0}{R_X} \right] = \\ = \frac{R_0}{R_X} \left[1 - \frac{\Theta(\omega)}{tg\delta_X} \right] + j\omega C_X R_0 [1 + \Theta(\omega) tg\delta_X], \text{ де } tg\delta_X = \frac{1}{\omega C_X R_X}.$$

Звідки для відліку у першому такті отримаємо.

$$N_{C_{px}}^I = \left\{ \omega_0 \cdot C_{px} \cdot R_{01} \cdot \left(1 + \theta^I(\omega) tg^I\delta \right) \cdot \left[1 + \gamma_K^I(\omega) \right] \cdot (1 + \gamma_\omega) U_{m0} \cdot (1 + \gamma_{U_{m0}}) \cdot K_M (1 + \gamma_M) + \Delta_{\Phi_{CB}} \right\} \times \\ \times K_{\Phi_{CB}} (1 + \gamma_{\Phi_{CB}}) T_0 (1 + \gamma_{T_0}) \frac{1}{U_{REF} (1 + \gamma_{REF})} f_K + \Delta_{\kappa\delta} \approx \\ \approx \omega_0 \cdot C_{px} \cdot R_{01} \cdot U_{m0} \cdot K_M \cdot K_{\Phi_{CB}} \cdot T_0 \cdot \frac{1}{U_{REF}} \cdot f_{KB} \times \\ \times \left\{ \left[1 + \theta^I(\omega) \cdot tg^I\delta \right] \cdot \left[1 + \gamma_K^I(\omega) \right] \cdot (1 + \gamma_\omega) \cdot (1 + \gamma_{U_{mo}}) \cdot (1 + \gamma_M) + \frac{\Delta U_{\Phi_{CB}}}{F^I} \right\} \times \\ \times (1 + \gamma_{B\psi}) \cdot (1 + \gamma_{T_0}) \cdot (1 - \gamma_{REF}) \approx \\ \approx \omega_0 \cdot C_{px} \cdot R_{01} \cdot U_{m0} \cdot K_M \cdot K_{\Phi_{CB}} \cdot T_0 \cdot \frac{1}{U_{REF}} \cdot f_{KB} \times \\ \times \left\{ 1 + \theta^I(\omega) \cdot tg^I\delta + \gamma_K^I(\omega) + \gamma_\omega + \gamma_{U_{mo}} + \gamma_M + \frac{\Delta U_{\Phi_{CB}}}{F^I} + \gamma_{\Phi_{CB}} + \gamma_{T_0} - \gamma_{REF} + Q_{11} \right\}$$

де

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F^I = \omega_0 \cdot C_{px} \cdot R_{oi} \cdot U_{mo} \cdot K_M; \quad \delta_{\Phi_{ЧВ}}^I = \frac{\Delta U_{\Phi_{ЧВ}}}{F^I} = \frac{\Delta U_{\Phi_{ЧВ}}}{\omega_0 \cdot C_{px} \cdot R_{oi} \cdot U_{mo} \cdot K_M};$$

- зведена адитивна похибка; Q_{11} - величина другого порядку малості – можна знехтувати;

Аналогічно отримуємо вирази для другого відліку для ємності датчику-компенсатору.

$$\begin{aligned} N_{C_K}^H &= \left\{ \omega_0 C_K R_{02} \cdot \left[1 + \theta^H(\omega) \cdot tg^H \delta \right] \cdot \left[1 + \gamma_K^H(\omega) \right] \cdot (1 + \gamma_\omega) \cdot U_{mo} (1 + \gamma_{Umo}) \cdot K_M (1 + \gamma_M) + \Delta_{\Phi_{ЧВ}} \right\} \times \\ &\quad \times K_{\Phi_{ЧВ}} \cdot (1 + \gamma_{\Phi_{ЧВ}}) \cdot T_0 (1 + \gamma_{T0}) \cdot \frac{1}{U_{REF} (1 + \gamma_{REF})} \cdot f_{KB} + \Delta_{\kappa\delta} \approx \\ &\quad \approx \omega_0 \cdot C_K \cdot R_{02} \cdot U_{mo} \cdot K_M \cdot K_{\Phi_{ЧВ}} \cdot T_0 \cdot \frac{1}{U_{REF}} \cdot f_{KB} \times \\ &\quad \times \left\{ \left[1 + \theta^H(\omega) \cdot tg^H \delta \right] \cdot \left[1 + \gamma_K^H(\omega) \right] \cdot (1 + \gamma_\omega) \cdot (1 + \gamma_{Umo}) \cdot (1 + \gamma_M) + \frac{\Delta U_{\Phi_{ЧВ}}}{F^H} \right\} \times \\ &\quad \times (1 + \gamma_{\Phi_{ЧВ}}) \cdot (1 + \gamma_{T0}) \cdot (1 - \gamma_{REF}) \approx \\ &\quad \approx \omega_0 \cdot C_K \cdot R_{02} \cdot U_{mo} \cdot K_M \cdot K_{\Phi_{ЧВ}} \cdot T_0 \cdot \frac{1}{U_{REF}} \cdot f_{KB} \times \\ &\quad \times \left\{ 1 + \theta^H(\omega) \cdot tg^H \delta + \gamma_K^H(\omega) + \gamma_\omega + \gamma_{Umo} + \gamma_M + \frac{\Delta U_{\Phi_{ЧВ}}}{F^H} + \gamma_{\Phi_{ЧВ}} + \gamma_{T0} - \gamma_{REF} + Q_{12} \right\} \end{aligned}$$

де

$$F^H = \omega_0 \cdot C_K \cdot R_{02} \cdot U_{mo} \cdot K_M, \quad \delta_{\Phi_{ЧВ}}^I = \frac{\Delta U_{\Phi_{ЧВ}}}{F^H} = \frac{\Delta U_{\Phi_{ЧВ}}}{\omega_0 \cdot C_k \cdot R_{02} \cdot U_{mo} \cdot K_M}$$

Q_{12} – другого порядку малості, можна знехтувати.

На підставі виразів для двох відліків отримаємо вираз результату перетворення:

$$N_X = \frac{C_{PX} \cdot R_{01}}{C_K \cdot R_{02}} \times \frac{1 + \theta^I(\omega) \cdot tg^I \delta + \gamma_K^I(\omega) + \gamma_\omega^I + \gamma_{Umo}^I + \gamma_M^I + \gamma_{\Phi\psi B}^I + \gamma_{To}^I - \gamma_{REF}^I + \delta_{\Phi\psi\psi}^I}{1 + \theta^H(\omega) \cdot tg^H \delta + \gamma_K^H(\omega) + \gamma_\omega^H + \gamma_{Umo}^H + \gamma_M^H + \gamma_{\Phi\psi B}^H + \gamma_{To}^H - \gamma_{REF}^H + \delta_{\Phi\psi\psi}^H} \approx$$

$$\approx \frac{C_{PX} \cdot R_{01}}{C_K \cdot R_{02}} \cdot \{1 + [\theta^I(\omega) \cdot tg^I \delta - \theta^H(\omega) \cdot tg^H \delta] + [\gamma_K^I(\omega) - \gamma_K^H(\omega)] + (\gamma_\omega^I - \gamma_\omega^H) +$$

$$+ (\gamma_{Umo}^I - \gamma_{Umo}^H) + (\gamma_M^I - \gamma_M^H) + (\gamma_{\Phi\psi B}^I - \gamma_{\Phi\psi B}^H) +$$

$$+ (\gamma_{To}^I - \gamma_{To}^H) + (\gamma_{REF}^H - \gamma_{REF}^I) + (\delta_{\Phi\psi\psi}^I - \delta_{\Phi\psi\psi}^H) + Q_{13}\}$$

де Q_{13} – величина другого порядку малості. У виразі (5.1.7) відносні похибки рівні

З виразу (5.1.7) випливає, що систематичні складові, а також математичні очікування для випадкових складових - компенсуються. Вважаємо, що ці похибки між тактами не змінюються.

Залишається систематична похибка результату, яка визначається не ідентичністю фазової і амплітудної похибки при вимірах ємності датчика і компенсатора, які некомпенсовані, а також не ідентичністю наведених значень адитивної похибки.

Для результату перетворення, що враховує тільки некомпенсовані систематичні складові похибки

$$N_x = \frac{C_{PX} R_{02}}{C_K R_{01}} \times \left\{ 1 + [\Theta^I(\omega) tg \delta^I - \Theta^H(\omega) tg \delta^H] + [\gamma_K^I(\omega) - \gamma_K^H(\omega)] + [\delta_{\Phi\psi B, cист.}^I - \delta_{\Phi\psi B, cист.}^H] \right\}$$

Випадкові складові похибок окремих блоків, отримані в різні такти вимірювання (в різні моменти часу) слід вважати як різні і незалежні, тобто взаємокомпенсації не відбувається, що важливо при підсумовуванні випадкових похибок.

Сумарна систематична мультиплікативна складова похибки:

$$\gamma_{\Sigma M, cист.} = \left\{ [\Theta^I(\omega) tg \delta^I - \Theta^H(\omega) tg \delta^H] + [\gamma_K^I(\omega) - \gamma_K^H(\omega)] \right\}$$

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		42

Сумарна систематична аддитивная складова похибки

$$\delta_{\Sigma add. сист.} = [\delta_{ФЧВ. сист.}^I - \delta_{ФЧВ. сист.}^{II}]$$

Аналогічні вирази будуть для компенсуються матожодання випадкових складових похибок вимірювання ємності датчика.

5.2. Оцінка сумарної похибки

Обираємо закон розподілу випадкової складової для сумарної мультиплікативної похибки. Маємо при $P = 0.95$ (довірчій ймовірності) що граничне значення дорівнює

$$\Delta \gamma_{M \Sigma_{пред.}} = \pm K \sigma(\dot{\Delta \gamma}_{M \Sigma}) = \pm 2 \cdot \sigma(\dot{\Delta \gamma}_{M \Sigma}).$$

$$\Delta \gamma_{M \Sigma_{пред.}} = \pm 2 \cdot 0,43 = \pm 0,86 \%,$$

Із цього отримуємо граничне значення для загальної мультиплікативної похибки

$$\gamma_{\Sigma M} = \gamma_{\Sigma M. сист.} + \Delta \gamma_{M \Sigma_{пред.}} = 0,083 + 0,86 \cong 0.943 \%,$$

Закон розподілу випадкових складових сумарних адитивних похибок - нормальний. При довірчій ймовірності $P = 0.95$ (зменшений 2σ) розрахуємо граничні значення для похибок випадкових сумарних адитивних, які рівні

$$\delta_{add. сл. пред.} = \pm 2 \sigma(\dot{\Delta \delta}_{add. сл.}) = 1,24 \%$$

Відповідно граничні значення для адитивних похибок

$$\delta_{\Sigma add} = \delta_{\Sigma add. сист.} + \delta_{add. сл. пред.} \cong 1.33 \%,$$

Це граничне значення відносної похибки дорівнює

$$\gamma_{\Sigma пред.} = \gamma_{\Sigma M} + \delta_{add. сл. пред.} = 1,34 + 0,943 = 2,283 \%$$

Маса палива обчислюється МК за формулами (2.2.8) і (2.2.9). Складова похибки через зміни температури в баках при обчисленнях за формулами (2.2.8) і (2.2.9) становить 0,1%.

Таким чином, результуюча похибка вимірювання маси палива становитиме 2,383%, що відповідає вимогам ТЗ.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		43

ВИСНОВКИ

В дипломному проєкті, було розроблено інформаційно-вимірювальну систему розходу палива, для літаків, яка є частиною паливної системи літака.

Система виконує такі функції:

- вимірювання маси пального;
- вимірювання температури палива;
- відслідковування мінімальної температури палива;
- відправка інформації на панель керування про залишок кількості пального;
- відстеження розходу пального.

Було проведено огляд існуючих рішень та пристроїв. Проведений їх аналіз та співставлення. Як основний ємнісний конденсатор було вибрано профільований циліндр, який враховує зміну об'єму палива від форми паливного баку.

Беручи до уваги усі проведені дослідження, було розроблено структурну, функційну та принципову електричну схеми системи. Система є простою, досить дешевою, але в той самий час дає високу точність вимірювання. Проведено аналіз похибок.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		44

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лещинер Л.Б. Проектирование топливных систем самолетов - М.: Машиностроение, 1991. - 320с.
2. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / В.М. Ванько, Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук; за ред. проф. Є.С. Поліщука та проф. В.М. Ванька. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 584 с.
3. Авиационные топливомеры. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studfiles.net/preview/2216419/>.
4. Invariant Transducers of Capacitive Sensor Parameters into Voltage / M. Herasym, Y. Pokhodylo // *Eastern European journal of Enterprise Technologies*, ISSN 1729-3774, – Kharkiv, Ukraine. – 2014. — 2/9 (68). — p.p. 28-32.
5. Походило Є.В. «Перетворювачі параметрів імітансних сенсорів в напругу», *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*, №420, с. 104–109, 2001.
6. М.О. Гаврилюк, В.В. Хома, «Вплив ємності вхідного кабелю на стійкість активного перетворювача імітанс–напруга», *Вимірювальна техніка та метрологія*, Вип. 51, с. 49-50, 1995.
7. *Мартьяшин А.И.* Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А.И. Мартьяшин, К.Л. Куликовский, С.К. Куроедов, Л.В. Орлова: Под ред. А.И. Мартьяшина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
8. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. – М.: «Энергия», 1977. – 576 с.
9. *Глебович Г.В.* Широкополосные линии передачи импульсных сигналов / Г.В. Глебович, И.П. Ковалев – М.: Сов радио, 1973. – 223 с.
10. *Хоровиц П.* Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хил. – М.: «Мир», 1998. – 704 с.
11. *Туз Ю.М.* Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв: монографія / Ю.М. Туз, Ю.С. Шумков, О.В. Козир; за заг. ред. Ю.М. Туза. – К.: "Корнійчук", 2014. – 172 с.

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		45

					ВА71.020004.001 ПЗ	Лист
						46
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		