

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В. о. завідувача кафедри квантової радіофізики

доц. Сергій КОЛЕНОВ

Протокол № \_\_\_\_\_ засідання кафедри

від “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**УДОСКОНАЛЕНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ІМІТАТОР ПІРОВОЗЛА**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

студентки спеціальності

171 Електроніка

ОП “Електроніка (високі технології)”

**Мацюк Любові Дмитрівни**

Науковий керівник

завідувач кафедри

теоретичних основ високих технологій

доцент, канд. техн. наук **Резніков Михайло Ігорович**

Оцінка захисту роботи

\_\_\_\_\_

Київ 2024

## АНОТАЦІЯ

Мацюк Л.Д. Удосконалений електронний імітатор гіровузла. – Випускна кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 171 ОП «Електроніка (високі технології)».

Дипломна робота присвячена темі удосконалення прототипу імітатора гіровузла шляхом заміни його механічних компонентів на електронні та додавання можливості змінювання режиму роботи для налаштування різних гіроскопів.

У першому розділі надано огляд гіроінерційних систем і розглянуті основні напрямки досліджень в галузі імітаторів гіроскопів. Другий розділ описує існуючі натеper рішення, за допомогою яких реалізовані імітатори гіровузла. В другому розділі також показані характеристики механічного гіроскопа, роботу якого необхідно імітувати. В третьому розділі описаний процес розробки імітатора. Четвертий розділ присвячений огляду отриманих результатів.

Розроблений удосконалений імітатор гіровузла має практичну цінність для виробничих та наукових застосувань.

**Ключові слова:** імітатор гіровузла, гіроскоп, інерціальна навігаційна система.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1: ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГІРОІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ТА ІМІТАТОРИ ГІРОВУЗЛІВ.....	7
1.1 Історія та напрямки досліджень в галузі гіроскопів .....	8
РОЗДІЛ 2: ЗАГАЛЬНА СХЕМА БЛОКУ РОЗГОНУ.....	10
2.1 Схема розгону.....	11
2.2 Аналоги імітаторів гіровузла.....	17
2.2.1 Імітатор гіровузла 9В860 — прототип.....	17
2.2.2 Імітатор гіровузла 9В818М.....	19
2.2.3 Імітатор гіровузла 9В788.....	20
2.3 Характеристики гіровузла із механічним гіроскопом.....	21
РОЗДІЛ 3: СТРУКТУРНА І ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ІМІТАТОРА ГІРОВУЗЛА.....	28
3.1 Структурні схеми.....	29
3.2 Електрична схема імітатора гіровузла.....	31
РОЗДІЛ 4: ОГЛЯД ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	38
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45
ДОДАТОК А. КОД ДЛЯ РОБОТИ УДОСКОНАЛЕНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ІМІТАТОРА ГІРОВУЗЛА.....	47

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГІС — гіроінерціальна система;

ІНС — інерціальна навігаційна система;

ДП — датчик положення;

КР — схема контролю розгону;

ПЗРК — пусковий зенітно-ракетний комплекс;

ЕРС — електрорушійна сила.

## ВСТУП

У сучасних високотехнологічних галузях, таких як авіація, космічна техніка, та військова індустрія, вимоги до точності навігаційного обладнання є надзвичайно високими. Центральне місце у системах навігації займають гіроінерціальні системи, здатні забезпечувати точне визначення просторового положення об'єктів в умовах відсутності візуальних орієнтирів. Одним із ключових компонентів таких систем є гіроскопи та гіровузли, які потребують регулярного тестування та калібрування для забезпечення їх високої точності та надійності. Ці процеси виконуються з використанням імітаторів гіровузлів, які дозволяють проводити всебічні перевірки без застосування дорогих і чутливих реальних гіроскопів.

Значення імітаторів гіровузлів постійно зростає, адже вони забезпечують можливість тестування та калібрування в контрольованих лабораторних умовах, що є ключовим для розвитку точних та надійних навігаційних систем. Особливу увагу у даному напрямі приділяється вдосконаленню технічних засобів імітації.

Ця робота присвячена розробці удосконаленого імітатора гіровузла, здатного ефективно імітувати роботу гіроскопів за допомогою використання сучасних електронних компонентів та алгоритмів управління. Мета роботи полягає у вдосконаленні прототипу імітатора гіровузла шляхом заміни його механічних компонентів на електронні та додавання можливості змінювання режиму роботи для налаштування різних гіроскопів. Для досягнення поставленої мети поставлено науково-технічне завдання, яке полягає у розробленні структурної та принципової схем гіровузла і виготовленні дослідного зразка удосконаленого імітатора гіровузла.

У розділах цієї дипломної роботи буде представлено огляд існуючих імітаторів гіровузлів, аналіз їхніх основних характеристик та обмежень та опис розробки удосконаленого імітатора гіровузла.

Розробка нового імітатора включає комплексний підхід, починаючи з аналізу вимог до гіроскопів у різних застосуваннях і закінчуючи практичною реалізацією прототипу з використанням сучасних компонентів.

Результатами роботи є розроблені структурна та принципова схеми гіровузла і виготовлений дослідний зразок удосконаленого імітатора гіровузла.

Використання отриманих результатів на практиці надасть можливість замінити гіровузол його електронним імітатором. Така заміна дозволить зберегти ресурс оригінального гіровузла на заданому рівні під час технічної експлуатації електронних засобів.

## **РОЗДІЛ 1: ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГІРОІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ТА ІМІТАТОРИ ГІРОВУЗЛІВ**

Імітатор гіровузла — це пристрій, за допомогою якого виконується тестування та калібрування гіроінерціальних систем без необхідності використання реальних гіроскопів. Гіроінерціальна система (ГІС), або її інша назва - інерціальна навігаційна система (ІНС), — це система, яка використовує гіроскопи та акселерометри для визначення положення, орієнтації та швидкості об'єкта без зовнішніх довідкових точок. Такі системи часто застосовуються у навігації, авіації, космічній техніці, тобто в тих галузях і аспектах, де важливе точне визначення положення та руху об'єкта. Імітатори дозволяють перевіряти точність і роботу інерціальних систем у різних умовах.

З розвитком складних ІНС у 1970-х роках виникла потреба в пристроях, що могли б імітувати роботу механічного гіровузла для тестування та калібрування, відповідно перші імітатори гіровузлів з'явилися у відповідь на цю потребу. Сьогодні імітатори гіровузлів є важливими інструментами для забезпечення точності та надійності роботи інерціальних навігаційних систем у різних галузях [1].

Гіроскопічні прилади й системи є одними з основних і найбільш складних за будовою серед пілотажно-навігаційних приладів. Основне призначення авіаційних гіроскопічних приладів — вимірювання кутів просторового положення й кутових швидкостей літальних апаратів. Гіроскопи є базовими елементами інерціальних навігаційних систем, зокрема, використовуються в гіростабілізаторах платформних ІНС, а також як вимірники кутового положення та кутових швидкостей літальних апаратів в безплатформних ІНС.

## 1.1 Історія та напрямки досліджень в галузі гіроскопів

Історія гіроскопічних приладів починається з середини XIX століття, коли Жан-Бернар-Леон Фуко вперше представив гіроскоп. З тих пір гіроскопи знайшли широке застосування в навігації, авіації та космонавтиці.

Перші гіроскопи використовувалися для демонстрації обертання Землі та зберігали свою орієнтацію завдяки збереженню кутового моменту. В XX столітті гіроскопи стали важливою та практично невід'ємною частиною авіаційних і морських навігаційних систем. Перші імітатори гіровузлів з'явилися у 1970-х роках у відповідь на зростаючу потребу в тестуванні складних інерціальних навігаційних систем.

Сучасні дослідження в галузі імітаторів гіровузлів спрямовані на підвищення точності моделювання руху, зниження похибок та розширення функціональних можливостей. Багато наукових праць присвячено аналізу та покращенню алгоритмів навігації та контролю, що використовують гіроскопи. Наприклад, в роботах [2], [3], [4] розглядаються різні підходи до вирішення цих завдань, включаючи використання сучасних цифрових технологій для створення високоточних імітаторів.

Аналіз поточних проблем і обмежень існуючих імітаторів гіровузлів виявляє кілька ключових напрямків для вдосконалення. Основними проблемами є недостатня точність імітації, висока чутливість до зовнішніх впливів, складність в калібруванні, обмежені функціональні можливості та наявність механічних деталей, що мають обмежений гарантійний термін експлуатації. Наприклад, традиційні гіроскопи часто піддаються дрейфу, що призводить до накопичення помилок з часом. Дослідження в цій галузі [5], [6], [7] пропонують різні методи для зменшення цих проблем, такі як використання високоточних датчиків руху та розробка нових алгоритмів обробки даних.

Нині відомі імітатори гіровузлів мають значний недолік, а саме: використання високошвидкісного гіроскопа, механічні деталі якого при постійному використанні схильні до прискореного зносу (гарантійний строк роботи такого пристрою — 3 години). Також імітатор гіровузла можна використовувати для перевірки тільки того розгонного пристрою, якому відповідає встановлений у ньому гіроскоп.

Метою даної роботи є удосконалення прототипу імітатора гіровузла шляхом заміни його механічних компонентів на електронні та додавання можливості змінювання режиму роботи для налаштування різних гіроскопів.

## РОЗДІЛ 2: ЗАГАЛЬНА СХЕМА БЛОКУ РОЗГОНУ

Блок розгону, як випливає з назви, призначений для розгону ротора гіроскопа. До складу блоку розгону входять, котушки обертання, датчики положення, обмотки генератора опорної напруги. Котушки обертання служать для розгону ротора гіроскопа до номінальних обертів у процесі підготовки ракети до пуску. Після ввімкнення наземного джерела живлення в котушках обертання створюється змінне магнітне поле, яке, взаємодіючи з постійним магнітом ротора гіроскопа, створює обертальний момент. Датчики положення беруть участь у створенні змінною магнітного поля в котушках обертання залежно від кута повороту ротора гіроскопа. Після розгону ротора гіроскопа до номінальної швидкості обертання частотне реле вимикає схему розгону[8].

Блок розгону призначений для отримання постійної напруги - 80В, розгону ротору гіроскопу до певної граничної частоти  $f_1$ , та виключення розгонного пристрою при досягненні ротором вказаної частоти, що формує комутуючу напругу - 40В, що подається на блок обертання.

Блок розгону складається із перетворювача напруги, схеми розгону та частотного реле.

Перетворювач напруги призначений для отримання постійної напруги 80В, напруги зміщення, що використовується в схемі розгону, змінної напруги високої частоти для датчиків положення. Він являє собою двухтактний генератор із самозбудженням та трансформаторним оберненим зв'язком.

## 2.1 Схема розгону

Для розгону ротора гіроскопу слугує пристрій, блок-схема якого наведена на рисунку 2.1 [9].

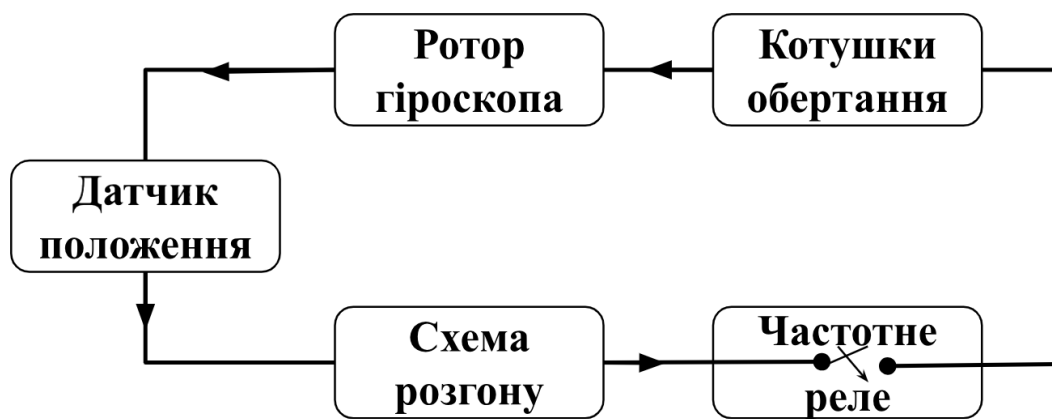


Рис. 2.1. Блок-схема розгонного пристрою.

З рис. 2.1 видно, що до складу розгонного пристрою входять п'ять основних елементів, а саме частотне реле, схема розгону, датчики положення, ротор гіроскопу та котушки обертання.

На рис. 2.2 зображено схему блоку обертання та ротору гіроскопа [9].

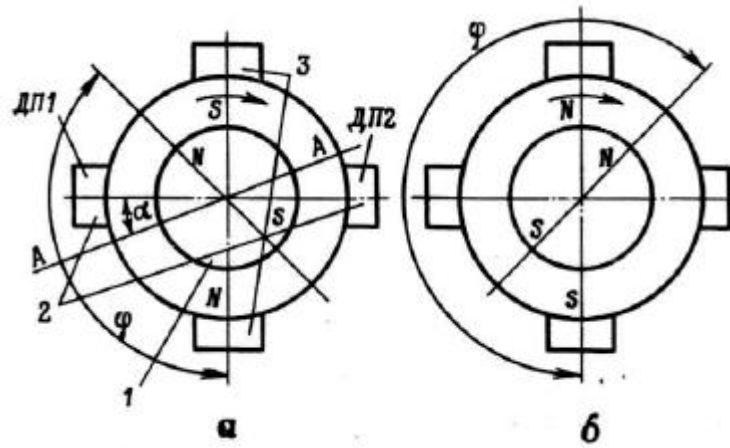


Рис. 2.2. Схема блоку обертання і ротору гіроскопа: 1 - ротор гіроскопа; 2 - датчики положення; 3 - котушки обертання.

З рис. 2.2 видно, що ротор 1 гіроскопа являє собою постійний магніт із явно вираженими полюсами. Блок обертання має котушки обертання 3, що слугують для утворення магнітного поля, яке виникає при подачі напруги зі схеми розгону. Магнітне поле котушок взаємодіє із магнітним полем постійного магніта ротора гіроскопа, в результаті чого виникає обертовий момент. Магнітне поле ротора діє на датчики положення 2, сигнали з яких за допомогою схеми розгону переключають напрям струму в котушках блоку обертання і, відповідно, переключають зовнішнє магнітне поле, що взаємодіє із полем ротора гіроскопа.

При досягненні ротором гіроскопа частоти обертання  $f_1$  Гц, струм в котушці обертання вимикається. Вимикання здійснюється за допомогою частотного реле (рис. 2.1). Доведення частоти обертання ротора до частоти  $f_2$  і підтримання її в цих межах здійснюється за допомогою системи стабілізації обертів гіроскопу головки.

Для створення комутаційної напруги 40В, що подається до блоку обертання до досягнення ротором гіроскопу частоти обертання  $f_2$  слугує схема розгону.

На рисунку 2.3 зображено електричну принципову схему блоку обертання [9].

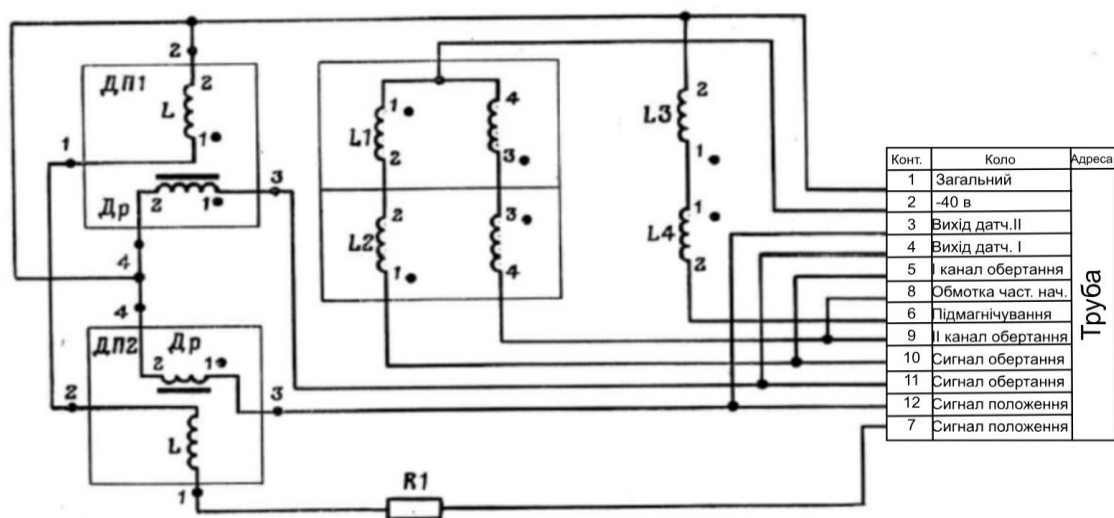


Рис. 2.3. Блок обертання. Схема електрична принципова.

З рис. 2.3 видно, що змінна напруга із виводів 6, 7, 8 поступає на обмотку дроселей датчиків положення ДП1 та ДП2 які знаходяться у блоці обертання труби.

Будова датчика положення наведена на рис. 2.4 [9].

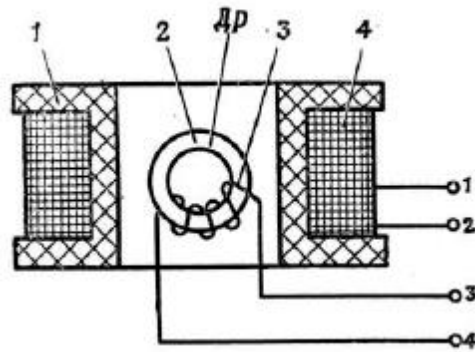


Рис. 2.4. Датчик положення: 1 - каркас; 2 - феромагнітний стержень; 3 - обмотка дроселя; 4 - обмотка підмагнічування.

З рис. 2.4 видно, що датчик положення складається із дроселя, обмотка 3 якого намотана на феромагнітний сердечник 2, і обмотки підмагнічування 4 що розміщена на каркасі 1. Для того, щоб датчик був чутливий до напрямлення магнітного поля, дросель розміщують у магнітному полі величиною Н0 (рис. 2.5) [9].

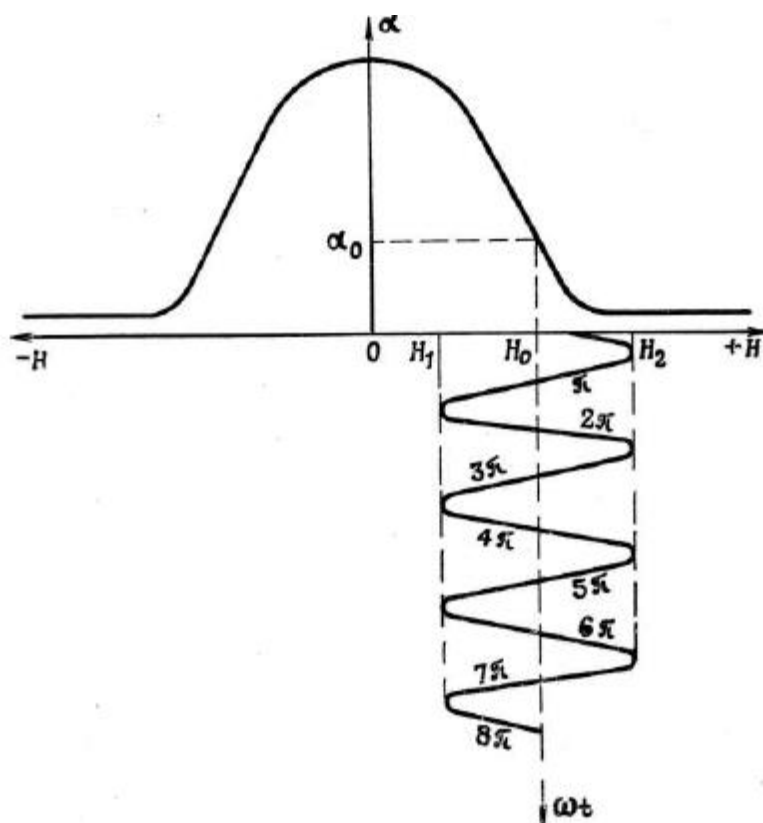


Рис. 2.5. Зміна індуктивності дроселя датчика положення при обертанні ротору гіроскопу.

На рис. 2.5 показано як змінюється індуктивність магнітного поля дроселя при обертанні ротору гіроскопа. Це поле створюється обмоткою підмагнічування (рис 2.4), його величина визначається резистором R1 (рис. 2.3), що знаходиться у блоці обертання. Величина підмагнічування однакова для обох датчиків. На дросель кожного датчика положення діє сумарне магнітне поле котушки підмагнічування та ротору гіроскопа.

В залежності від положення намагніченого ротору гіроскопу 1 (рис. 2.1) відносно датчику положення на дросель буде діяти змінне магнітне поле. Його величина змінюватиметься від  $H_1$  до  $H_2$  (рис. 2.5). Положення ротору визначається кутом  $\phi$  між віссю симетрії котушок обертання та лінією, що проходить через магнітні полюси ротора гіроскопу (рис. 2.2).

Величина напруги на дроселі датчика положення буде залежати від індуктивності дроселя, а його індуктивність змінюється в залежності від

положення ротору. Таким чином напруга на дроселі датчика залежить від положення ротору гіроскопу. При обертанні ротору гіроскопу на виході датчиків положення виникає амплітудно-модульована напруга а, б (рис. 2.6) [9].

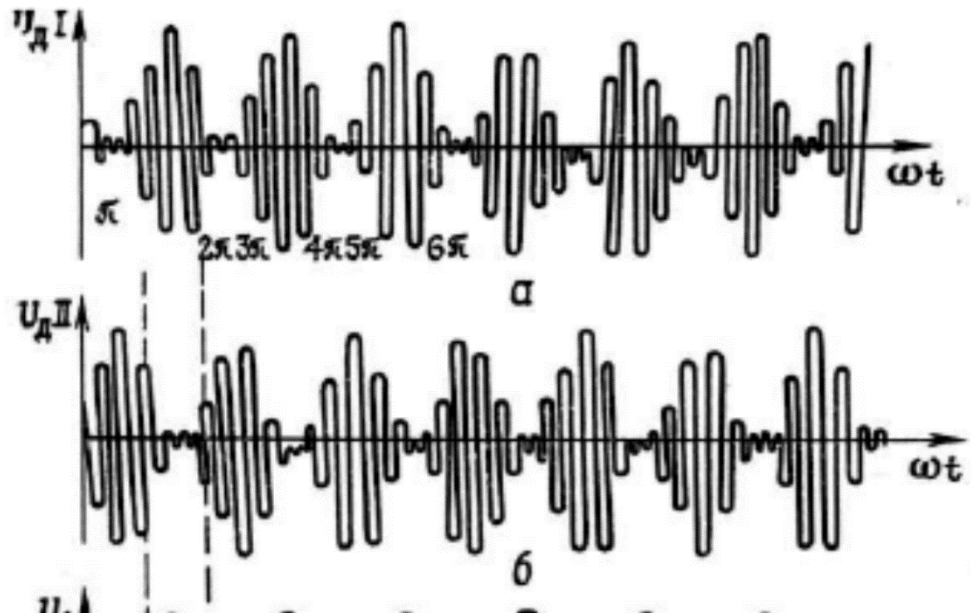


Рис. 2.6. Епюри напруг схеми розгону.

Як видно з рис 2.6, оригінальні криві цих напруг зсунуті одне відносно одного на  $180^\circ$ , так як датчик положення ДП2 знаходиться діаметрально протилежно датчику положення ДП1.

## **2.2 Аналоги імітаторів гіровузла**

Відомі імітатори гіровузла, що складаються з корпусу, роз'єму, блоку обертання у складі датчиків обертання і котушок розгону, а також координатора гіроскопу, що складається з карданного підвісу, при чому блок обертання електрично з'єднаний із роз'ємом. Ці імітатори гіровузла відрізняються одне від одного координаторами, які за механічними і магнітними властивостями аналогічні координаторам відповідних виробів.

Всі перераховані нижче імітатори мають спільний недолік, а саме: використання високошвидкісного гіроскопа, механічні деталі якого при постійному використанні схильні до прискореного зносу (гарантійний строк роботи такого пристрою — 3 години).

### **2.2.1 Імітатор гіровузла 9В860 — прототип**

Імітатор гіровузла 9В860 складається з блока датчиків (аналогічного тому, що застосовують у трубі 9П322) і координатора, за механічними та магнітними властивостями аналогічного координатору, що застосовують у виробі 9В818М.

Пристрій блоку датчиків і координатора наведено в технічному описі та інструкції з експлуатації 9К310.

Блок датчиків укріплений на підставці. Координатор жорстко закріплений у середині блока датчиків. У неробочому положенні координатор закривається кришкою, яка одночасно є механічним аретиром.

Аретир - пристрій для встановлення і закріплення чутливого елемента приладу у неробочому положенні; застосовується, як правило, з метою захисту чутливого елемента від механічних пошкоджень під час транспортування та встановлення, убезпечення його від випадкових поштовхів [10].

Принципову електричну схему імітатора гіровузла наведено на рис. 2.7 [13].

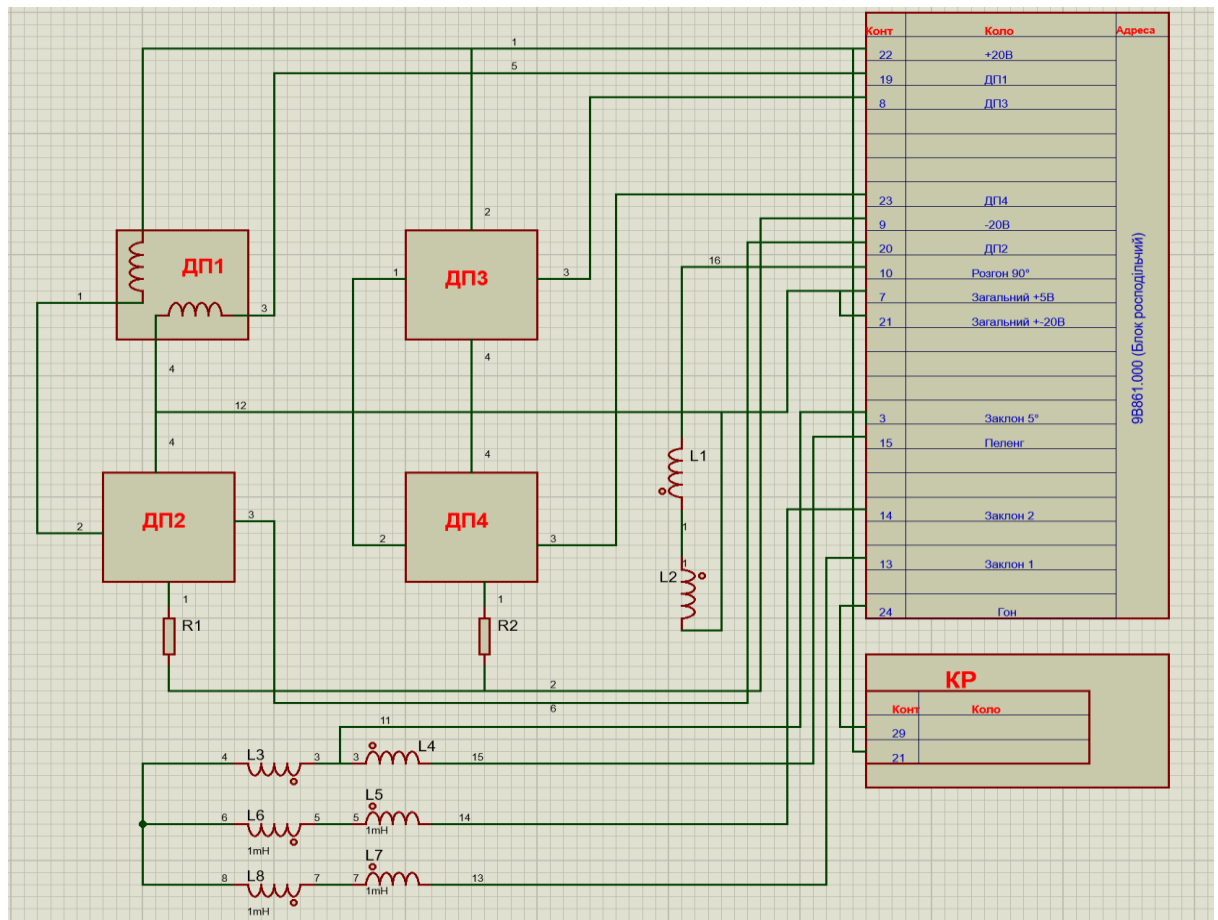


Рис. 2.7. Схема електрична принципова імітатора гіровузла 9В860.

З рис. 2.7 видно, що даний імітатор гіровузла має 4 ДП - датчики положення, що достатньо для охоплення та налаштування всіх типів координат що використовуються в ПЗРК, саме тому імітатор гіровузла 9В860 був прийнятий за прототип. Також до його складу входить такий елемент як КР - схема контролю розгону. Позначення 9В861.000 - блок розподільчий [11], [12].

Принцип роботи схеми аналогічний до представленого на рис. 2.3. Датчиків положення тут не 2 а 4, відповідно на виході датчиків положення виникає амплітудно-модульована напруга, огинаючі криві яких зміщені одне відносно одного на 90 градусів [13].

### **2.2.2 Імітатор гіровузла 9В818М**

Імітатор гіровузла 9В818М складається з блока обертання (аналогічного до того, що застосовують у трубах 9П54 і 9П59) і координатора (за механічними та магнітними властивостями аналогічного до координатора, що застосовують у виробі 9Е45).

Пристрій блоку обертання і координатора наведено в технічному описі та інструкції з експлуатації 9К34. Блок обертання укріплений на підставці. Координатор жорстко закріплений усередині блока обертання. У неробочому положенні координатор закривається кришкою, яка одночасно є механічним аретиром.

Принципову електричну схему імітатора гіровузла наведено на рис. 2.8 [13].

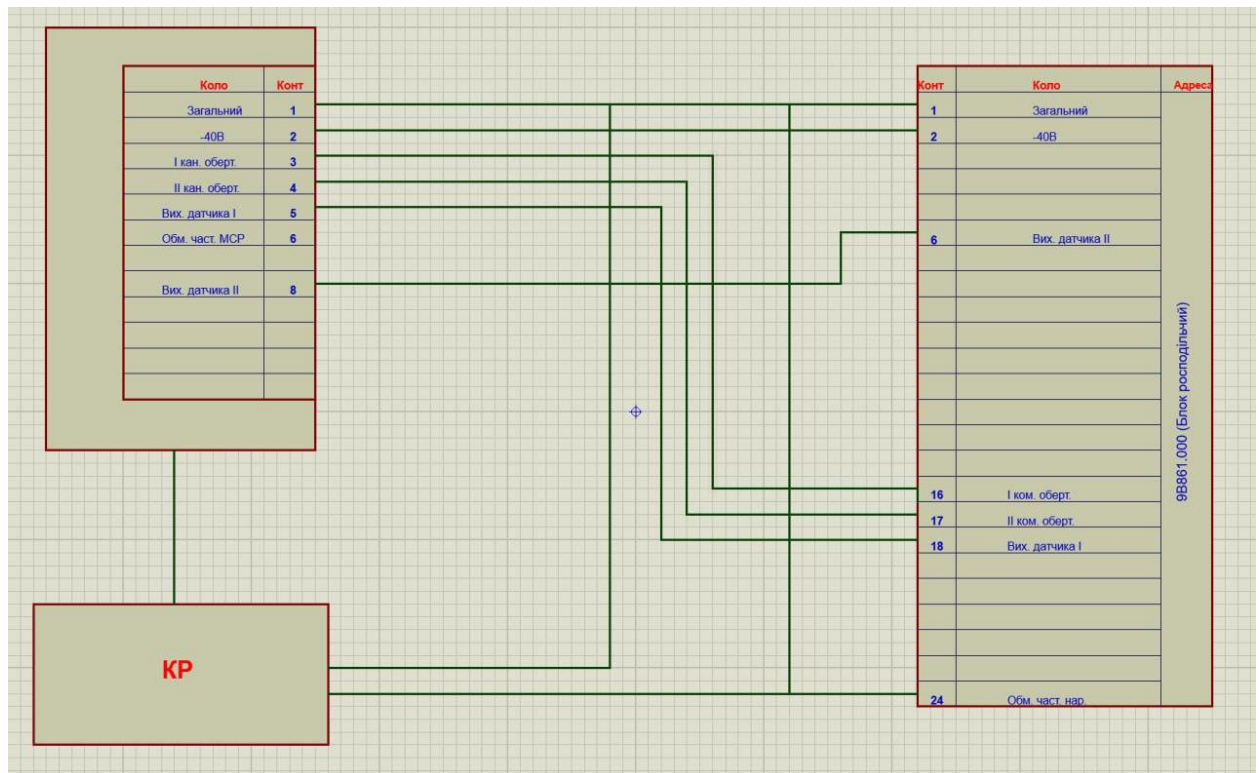


Рис. 2.8. Схема електрична принципова імітатора гіровузла 9В818М.

На рис. 2.8 - БВ - блок обертання; КР - схема контролю розгону; 9В816М - блок розподільчий.

### 2.2.3 Імітатор гіровузла 9В788

Імітатор гіровузла складається з блока обертання (аналогічного до того, що застосовують у трубі 9П322), координатора (за механічними та магнітними властивостями аналогічного до координатора, що застосовують у виробі 9Е410) та підсилювача.

Пристрій блоку обертання і координатора наведено в технічному описі та інструкції з експлуатації 9К310, 9К38. Блок обертання укріплений на підставці. Координатор та підсилювач жорстко закріплені усередині блока

датчиків. У неробочому положенні координатор закривається кришкою, яка одночасно є механічним аретиром. Підсилювач призначений для додаткового розгону координатора.

Принципову електричну схему імітатора гіровузла наведено на рис. Рис. 2.9 [13].

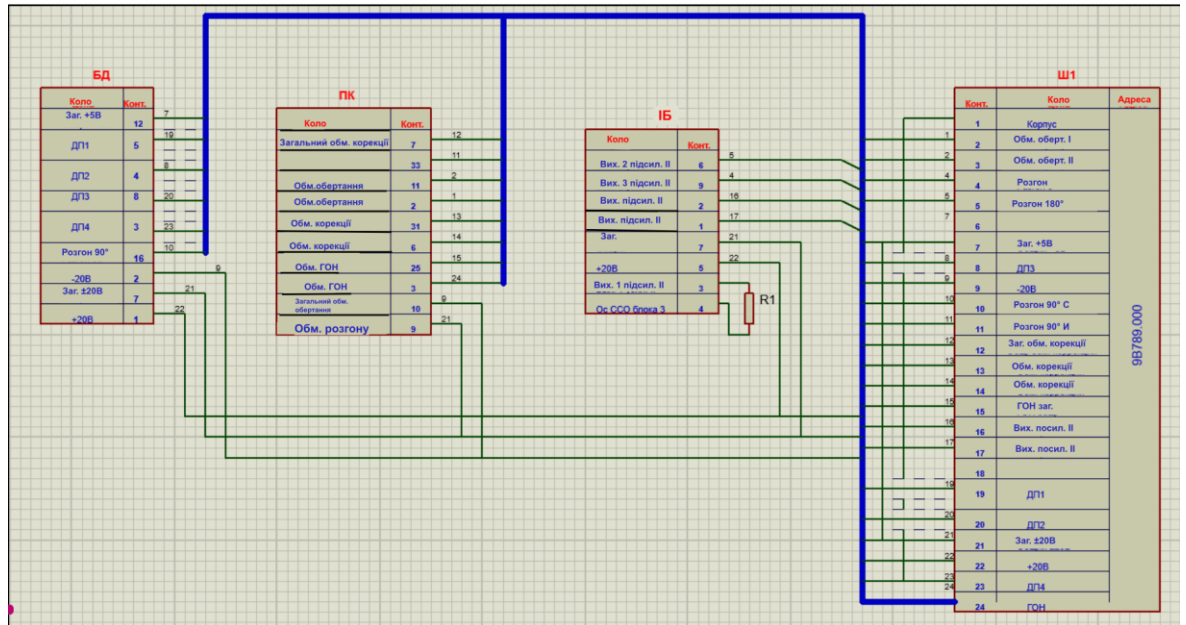


Рис. 2.9. Схема електрична принципова імітатора гіровузла 9В788.

Як видно з рис. 2.9 імітатор має роз'єм для підключення його кабелем до блоку розподільчого 9В789.01.000; КР - схема контролю розгону; БД - блок обертання; ІБ — підсилювач.

### 2.3 Характеристики гіровузла із механічним гіроскопом

Були виміряні характеристики високочастотного гороскопу, що входить до складу імітатора гіровузла за допомогою осцилографа та контрольно-вимірювальної апаратури. Обчислені дисперсія та математичне очікування щодо часу для обох випадків.

На рис. 2.10 наведено осцилограму отриману із високочатотного механічного в момент розгону.

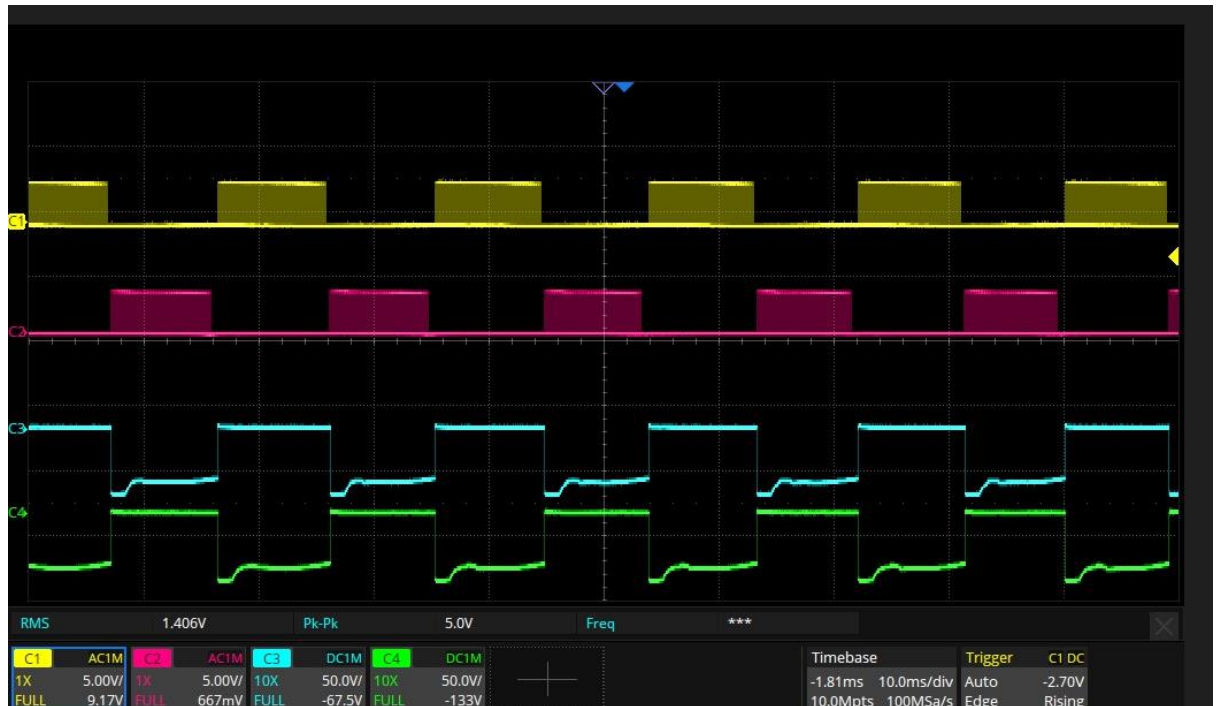


Рис. 2.10. Осцилограма механічного гіроскопу під час розгону

На рис. 2.10 наведені результати вимірювань осцилографом зі штатного гіровузла. Два верхні (позначені жовтим та рожевим кольорами) — сигнали отримані із датчиків обертання, Два нижні (позначені блакитним та зеленим кольорами) — із розгонних котушок.

На рисунку 2.11 наведено результати вимірювань сигналів при роботі механічного гіроскопа до та після вимикання котушок розгону.

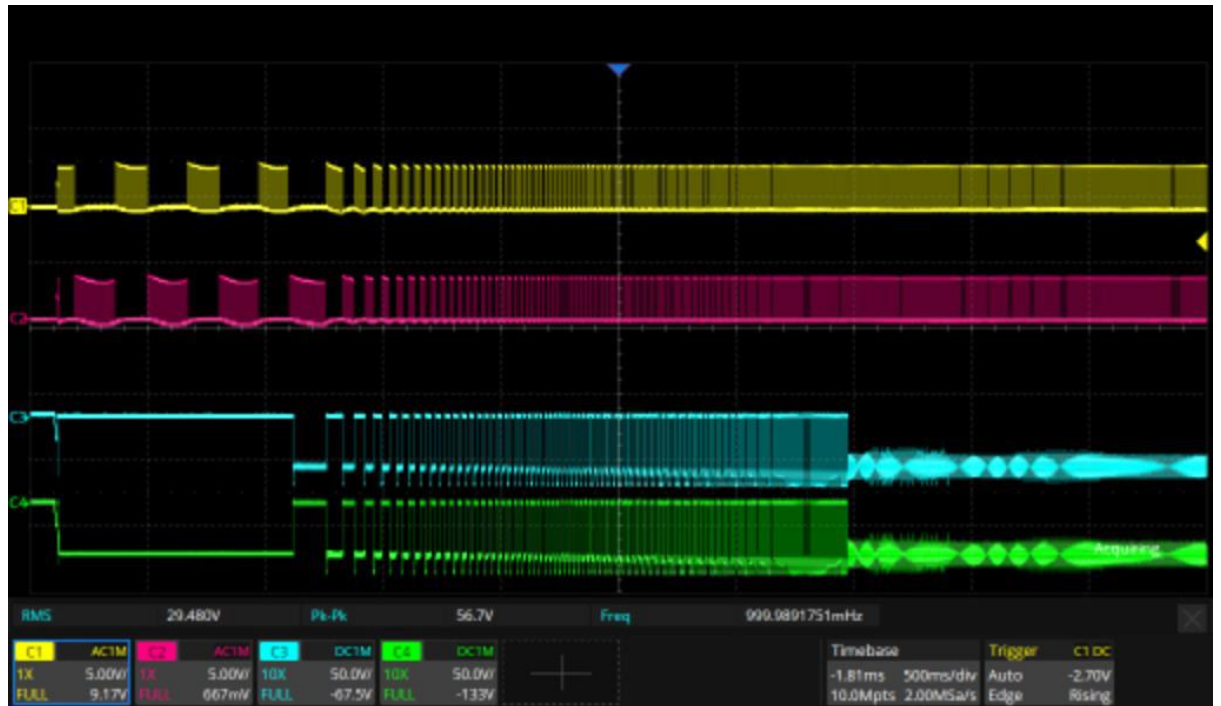
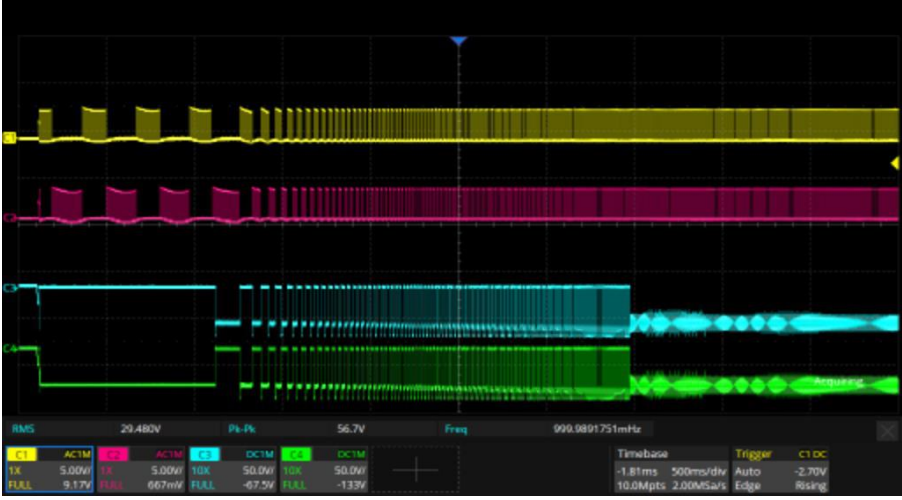
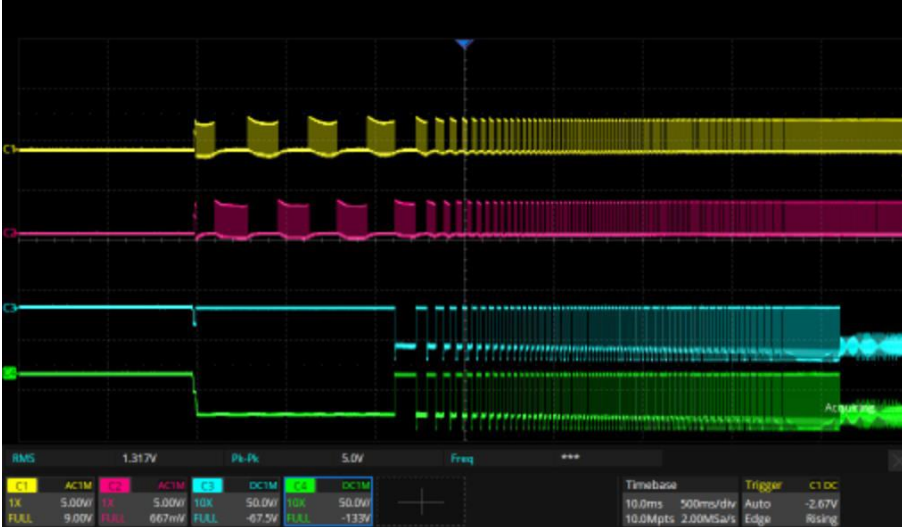


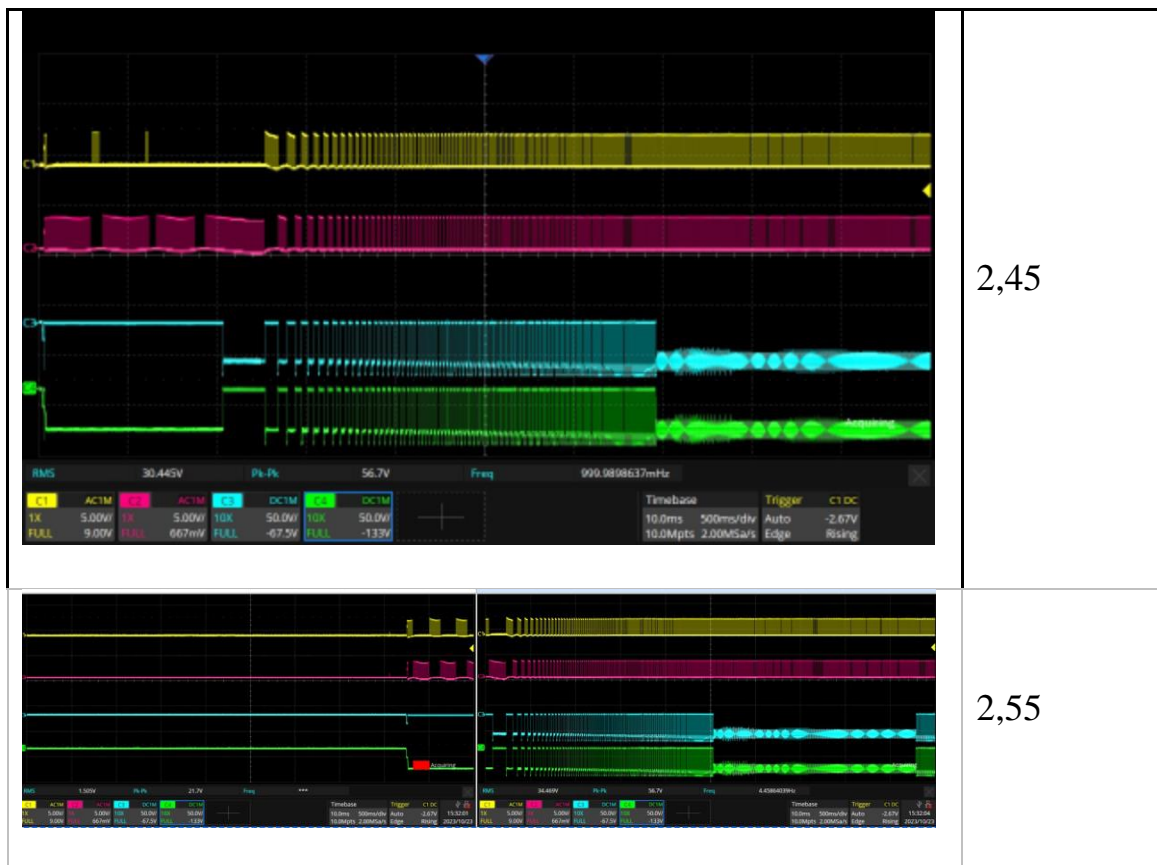
Рис. 2.11. Осцилограма механічного гіроскопу

Як бачимо з рис. 2.11 завершення розгону характеризується зміною форми модуляційного сигналу, а саме перехід із міандра до синусоїдального сигналу.

Обраховані визначений час розгону для отриманих осцилограм осцилограм (Таблиця 2.1).

## Осцилограми та час розгону механічного гіроскопу

Осцилограма	Час розгону (t, сек)																								
 <p>RMS 29.480V Pk-Pk 56.7V Freq 990.9891751MHz</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Ch</th> <th>ACIM</th> <th>PK</th> <th>ACIM</th> <th>PK</th> <th>DCIM</th> <th>PK</th> <th>DCIM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1X</td> <td>5.00V</td> <td>1X</td> <td>5.00V</td> <td>10X</td> <td>50.0V</td> <td>10X</td> <td>50.0V</td> </tr> <tr> <td>FULL</td> <td>9.17V</td> <td>FULL</td> <td>667mV</td> <td>FULL</td> <td>-67.5V</td> <td>FULL</td> <td>-133V</td> </tr> </tbody> </table> <p>Timebase -1.81ms 500ms/div Auto -2.70V 10.0Mpts 2.00MSa/s Edge Rising</p>	Ch	ACIM	PK	ACIM	PK	DCIM	PK	DCIM	1X	5.00V	1X	5.00V	10X	50.0V	10X	50.0V	FULL	9.17V	FULL	667mV	FULL	-67.5V	FULL	-133V	2,35
Ch	ACIM	PK	ACIM	PK	DCIM	PK	DCIM																		
1X	5.00V	1X	5.00V	10X	50.0V	10X	50.0V																		
FULL	9.17V	FULL	667mV	FULL	-67.5V	FULL	-133V																		
 <p>RMS 1.317V Pk-Pk 5.0V Freq ***</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Ch</th> <th>ACIM</th> <th>PK</th> <th>ACIM</th> <th>PK</th> <th>DCIM</th> <th>PK</th> <th>DCIM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1X</td> <td>5.00V</td> <td>1X</td> <td>5.00V</td> <td>10X</td> <td>50.0V</td> <td>10X</td> <td>50.0V</td> </tr> <tr> <td>FULL</td> <td>9.00V</td> <td>FULL</td> <td>667mV</td> <td>FULL</td> <td>-67.5V</td> <td>FULL</td> <td>-133V</td> </tr> </tbody> </table> <p>Timebase 10.0ms 500ms/div Auto -2.67V 10.0Mpts 2.00MSa/s Edge Rising</p>	Ch	ACIM	PK	ACIM	PK	DCIM	PK	DCIM	1X	5.00V	1X	5.00V	10X	50.0V	10X	50.0V	FULL	9.00V	FULL	667mV	FULL	-67.5V	FULL	-133V	2,5
Ch	ACIM	PK	ACIM	PK	DCIM	PK	DCIM																		
1X	5.00V	1X	5.00V	10X	50.0V	10X	50.0V																		
FULL	9.00V	FULL	667mV	FULL	-67.5V	FULL	-133V																		



Використовуючи результати описані в таблиці 2.1 було розраховано математичну дисперсію часу розгону, що становить 0,0035 с і математичне очікування для часу розгону, що становить 2,46 с.

Отримані результати вимірювання часу розгону механічного гіроскопа методом тестування ПЗРК контрольно-вимірювальною апаратурою. Було проведено по 2 вимірювання для кожного із наявних ПЗРК. Результати наведені в таблиці 2.2

Час розгону механічного гіроскопа вимірний за допомогою контрольно-вимірювальної апаратури

№ ПЗРК	Період обертання (T, обертів/с)	t1, с -	t2
1	942	3,02	3,16
2	942	3,21	3,12
3	938	3,21	3,54
4	942	3,28	3,14
5	942	3,49	2,95
6	940	3,29	3,91
7	934	3,08	3,6
8	940	3,75	3,54
9	939	2,96	4,47
10	943	3,19	2,97

Як видно із таблиці 2.2, результати значно відрізняються від тих, що отримані при вимірюванні аналогічних характеристик осцилографом. Період обертання котушок при розгоні виводився автоматично, час розгону вимірювався вручну за допомогою секундоміра, тому є значна похибка на час реакції та натискання, що призвело до значної відмінності від вимірів і

розрахунків отриманих із осцилограм. Тому надалі прийнято брати результати отримані за допомогою осцилографа для розробки імітатора гіровузла.

### **РОЗДІЛ 3: СТРУКТУРНА І ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ІМІТАТОРА ГІРОВУЗЛА**

Розробка детальної структурної схеми важлива для визначення взаємозв'язків між різними компонентами системи, які забезпечують точне імітування поведінки механічного гіровузла. Електрична схема, зокрема, відіграє ключову роль у забезпеченні надійного електричного зв'язку між компонентами, що дозволяє ефективно управляти навантаженнями та сигналами в системі. Розглянуті в цьому розділі схеми дають змогу детально оцінити та оптимізувати кожен аспект роботи імітатора. Цей розділ включає інтеграцію вже розроблених компонентів, їхнє випробування та фінальне налаштування системи з використанням мікроконтролера Teensy для управління імітатором через модуль SPI.

### 3.1 Структурні схеми

Структурна схема імітатора гіровузла, що прийнятий за прототип, зображена на рис. 3.1.

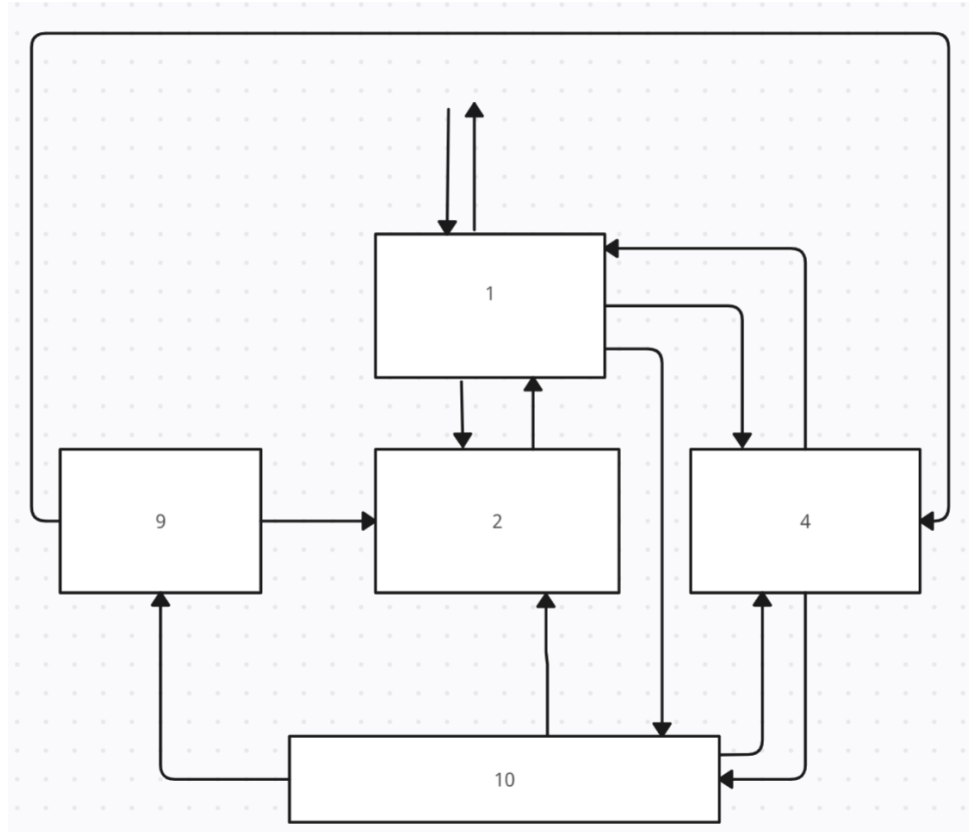


Рис. 3.1. Структурна схема імітатора гіровузла 9B860

З рис. 3.1 видно, що імітатор гіровузла, що прийнятий за прототип працює наступним чином. При його включенні постійна напруга через роз'єм (1) подається на датчики обертання (2), на які з розгонного пристрою (не входить до складу імітатора гіровузла)(9) подається змінна напруга. Механічний гіроскоп (10) містить ротор, що має постійний магніт з явно вираженими полюсами, знаходиться у довільному положенні. Ротор гіроскопа своїм магнітним полем впливає на датчики положення (4), модулюючи по амплітуді змінну напругу, яка надходить у розгонну систему. Ця модульована напруга дозволяє розгонному пристрою визначити положення ротора

гіроскопа та подати напругу на розгонні котушки, які створюють магнітне поле. Магнітне поле розгонних котушок взаємодіє з магнітним полем ротора гіроскопа і цим приводить його в рух. Датчики положення видають інформацію розгонному пристрою, який у свою чергу формує відповідну напругу в котушках розгону. Після досягнення заданої швидкості обертання розгонний пристрій відключається від котушок розгону. Ротор, що обертається своїм магнітним полем наводить електрорушійну силу в котушках обертання, яку використовують для вимірювання швидкості обертання гіроскопу.

Структурна схема запропонованого імітатора гіровузла зображена на рис. 3.2.

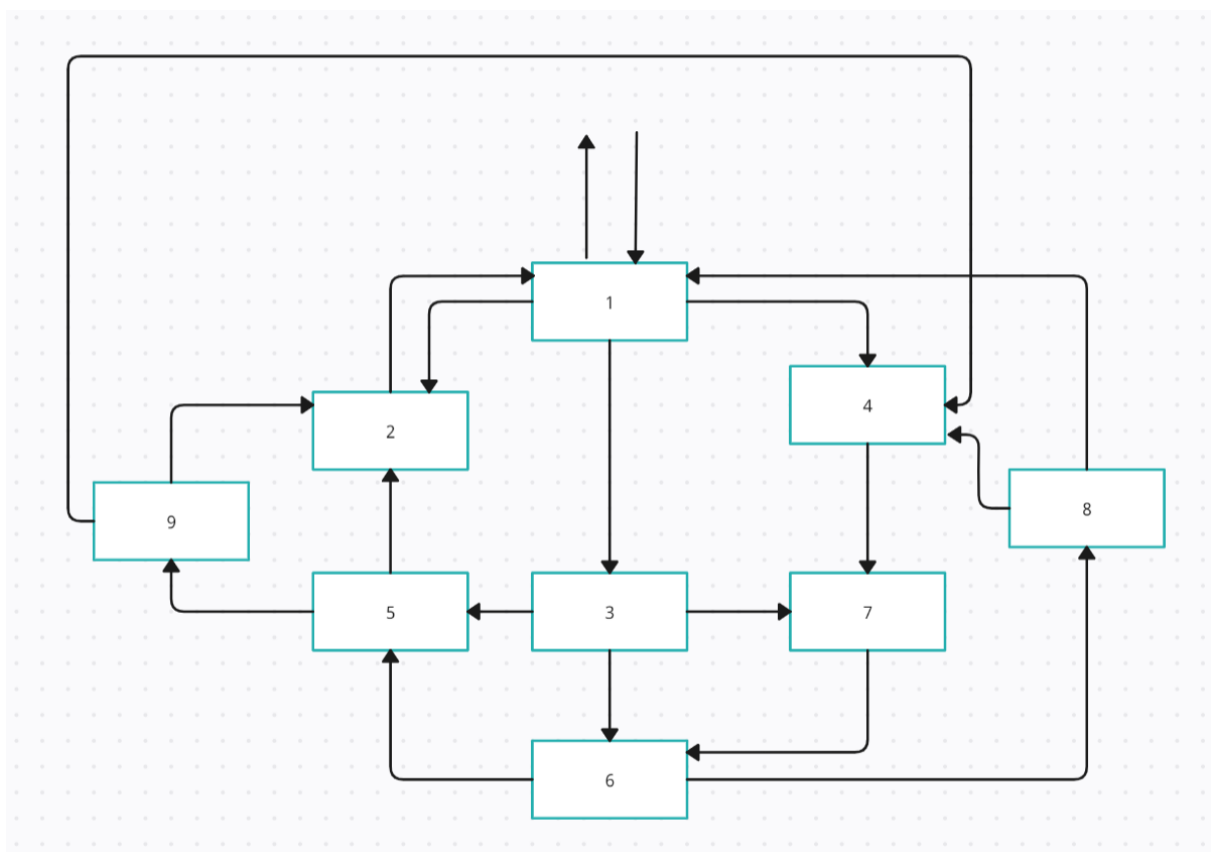


Рис. 3.2. Структурна схема удосконаленого імітатора гіровузла

З рис. 3.2 видно, що запропонований імітатор гіровузла працює таким чином. При його включенні постійна напруга через роз'єм (1) подається на перетворювач напруги (3) і датчики обертання (2), на які з розгонного пристрою (9) (не входить до складу імітатора гіровузла) подається змінна напруга. Перетворювач напруги забезпечує електроживлення електронних елементів схеми імітатора гіровузла. Інформація про подачі напруги на котушку розгону (4) знімається датчиком струму (7), який послідовно з'єднаний з котушкою розгону, і передається відповідний вхід мікроконтролера. Мікроконтролер відповідно до заданого алгоритму формує сигнали керування модулятором. Модульована змінна напруга надходить на розгонний пристрій, який у свою чергу формує відповідну керуючу напругу на розгонну котушку. Таким чином проводиться імітація процесу розгону ротора гіроскопа. Після досягнення заданої швидкості розгонний пристрій перестає формувати керуючі напруги на котушки розгону. Мікроконтролер фіксує процес зупинки розгону та продовжує формувати модулюючі сигнали датчики обертання. Тим самим забезпечується імітація вибігу гіроскопа. Крім того, мікроконтролер формує на виході свого цифроаналогового перетворювача синусоїдальну напругу з частотою, яка дорівнює частоті відключення розгонного пристрою. Ця напруга через узгоджуючий пристрій подається на котушки розгону. Синусоїдальна напруга, що імітує вибіг гіроскопа, використовується для вимірювання частоти відключення розгонного пристрою.

### **3.2 Електрична схема імітатора гіровузла**

Для реалізації різних режимів роботи було обрано вироби 9М39, 9М313, 9М342, що мають в своєму складі по технічним та механічним характеристикам аналогічний гіровузол, сигнал керування з відповідного підключеного виробу в цьому режимі роботи позначений як RAZGON\_90I.

Також для реалізації іншого режиму роботи було обрано виробу 9M32, 9M32M, 9M36, що мають в своєму складі по технічним та механічним характеристикам аналогічний гіровузол, сигнал керування з відповідного підключеного виробу в цьому режимі роботи позначений як RAZGON\_90C.

На рис. 3.3 зображено електричну схему модуля контролера.

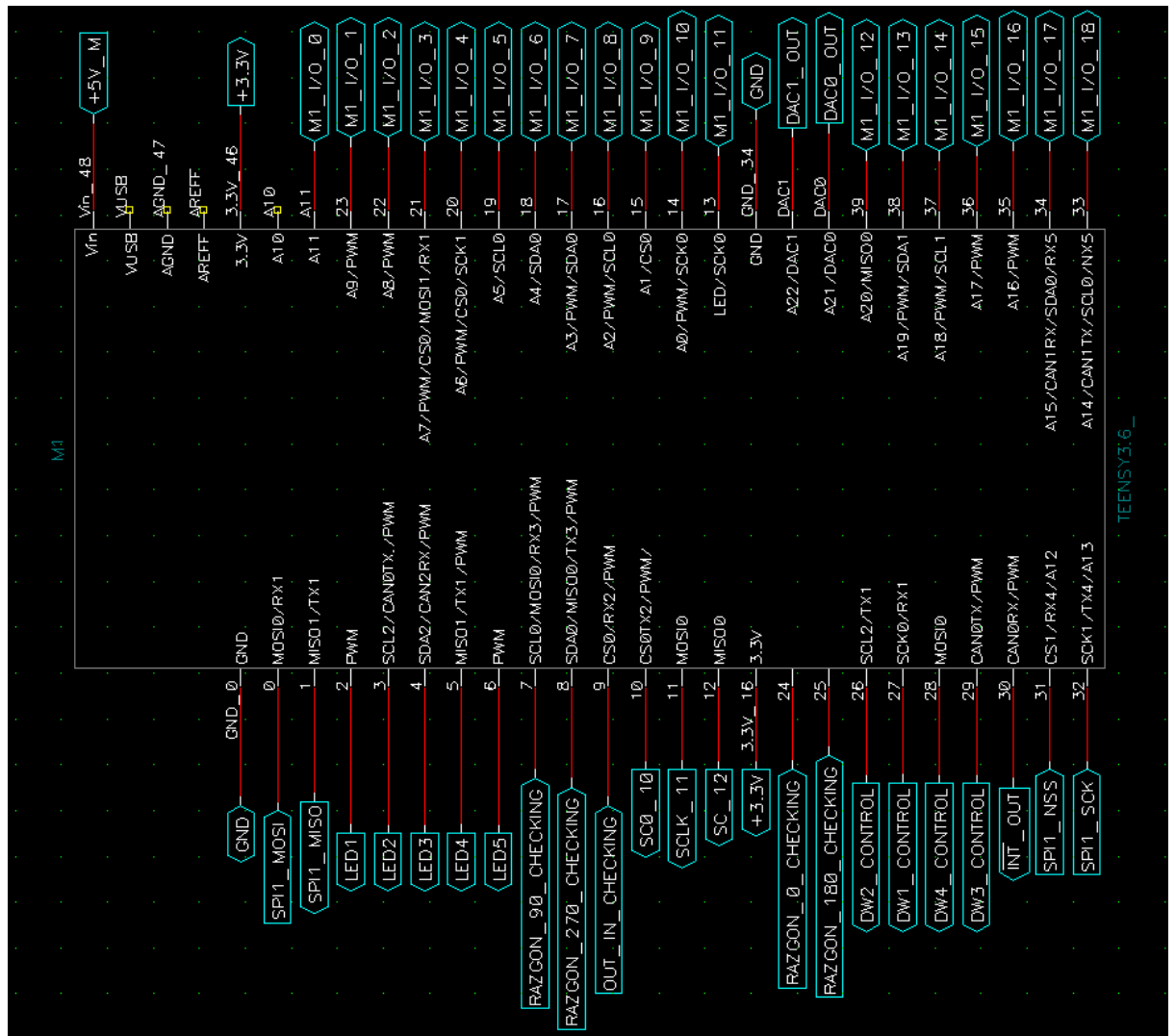


Рис. 3.3. Модуль контролера запропонованого імітатора гіровузла

На рис. 3.3 зображено модуль контролера, обраного для реалізації удосконаленого імітатора гіровузла, з усіма його вхідними та вихідними сигналами. Контролер обрано Teensy 3.6 через його великий обсяг пам'яті, наявність двох цифро-аналогових перетворювачів на самій платі та простоту

програмування та розробки, що вимагає використання як середи програмування Arduino IDE.

На рис. 3.4 зображено схему для обміну інформацією із периферійними пристроями (модуль SPI).

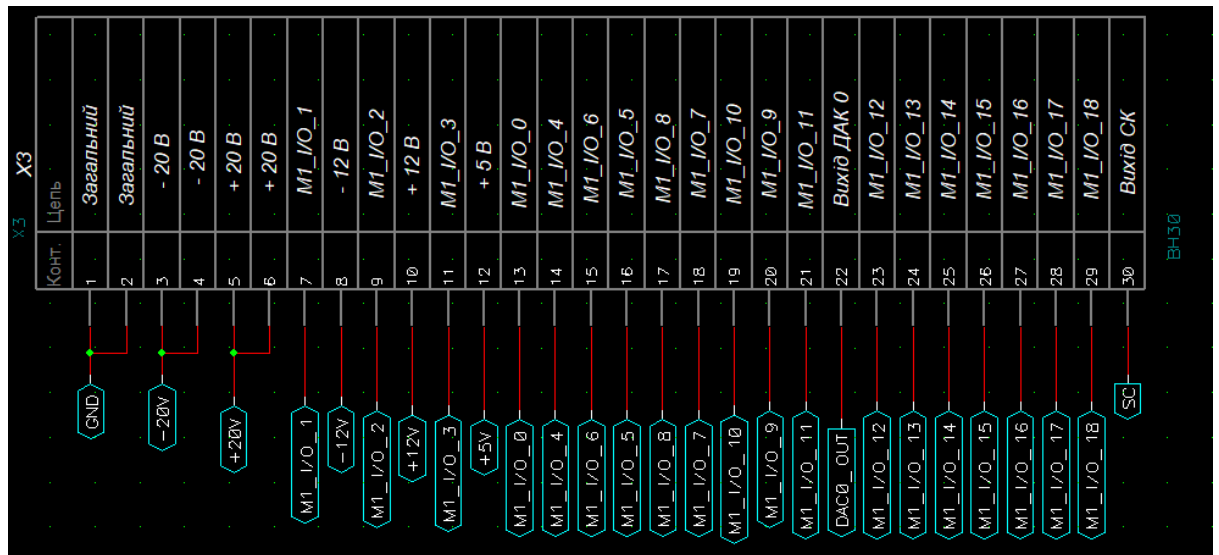


Рис. 3.4. Модуль SPI

На рис. 3.4 представлено схему модуля SPI що використовується для взаємодії периферійними пристроями. Кожен рядок у таблиці на зображенні відповідає конкретному піну роз'єму X3 і показує, до чого він підключений.

На рисунках 3.5а, 3.5б, 3.5с, 3.5д зображено електричну схему імітаторів датчиків обертання.

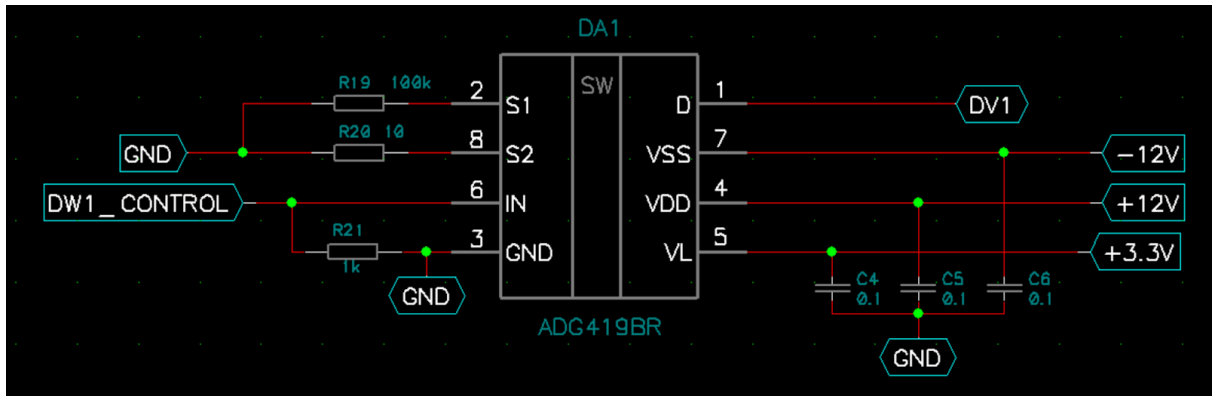


Рис. 3.5а. Електрична схема імітатора датчику обертання.

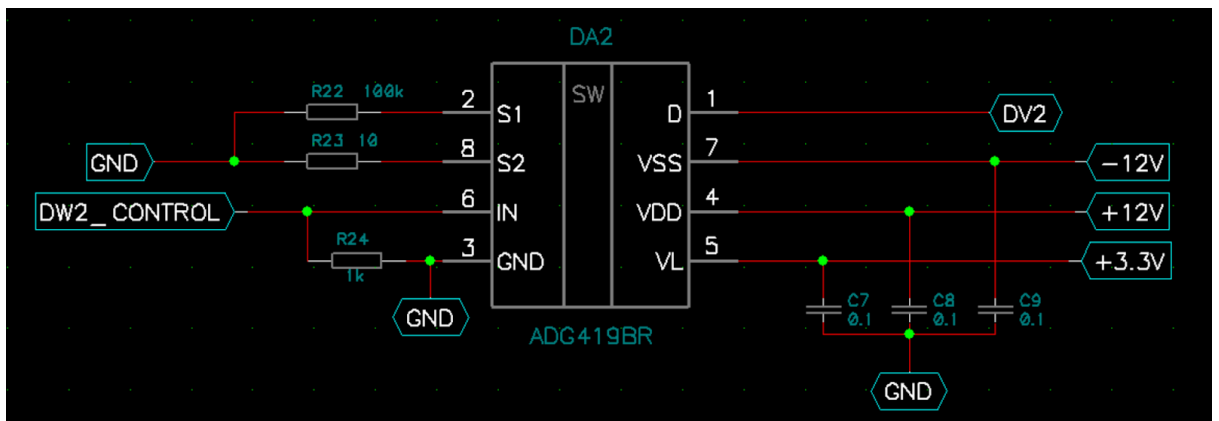


Рис. 3.5б. Електрична схема імітатора датчику обертання.

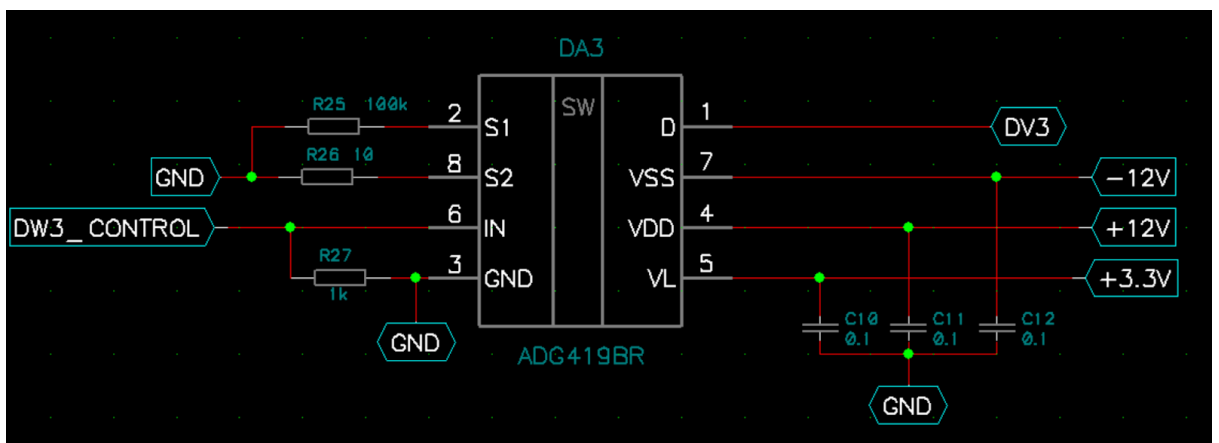


Рис. 3.5с. Електрична схема імітатора датчику обертання.

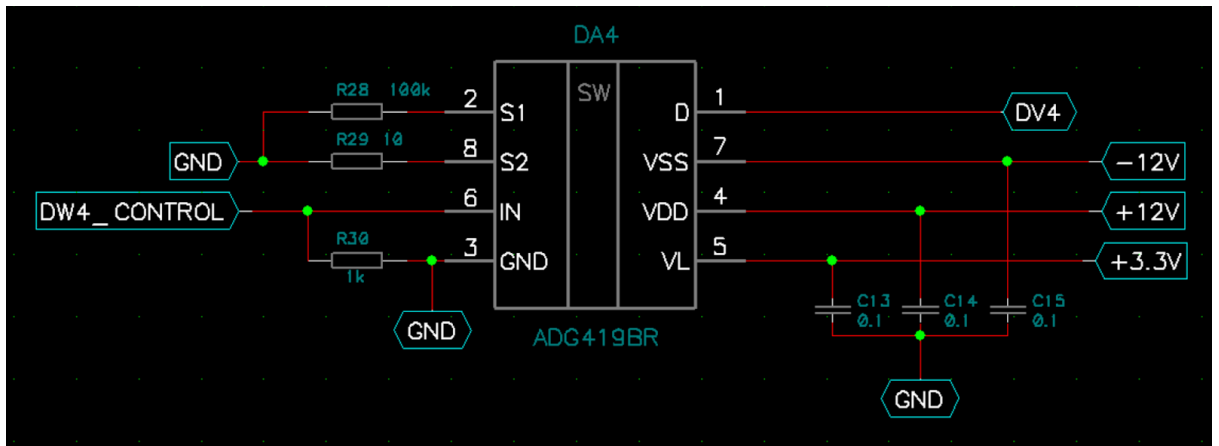


Рис. 3.5d. Електрична схема імітатора датчику обертання.

З рисунків 3.5a, 3.5b, 3.5c, 3.5d видно, що запропоновані електричні схеми імітатори датчиків повороту є аналогічними одне до одного. На цих рисунках ADG419BR - аналогові ключі, що працюють від напруги  $\pm 12V$ , відповідно величина отриманого сигналу також в цих мажах.

На рисунку 3.6 зображено електричну схему імітатора розгонних котушок та вибору режиму роботи.

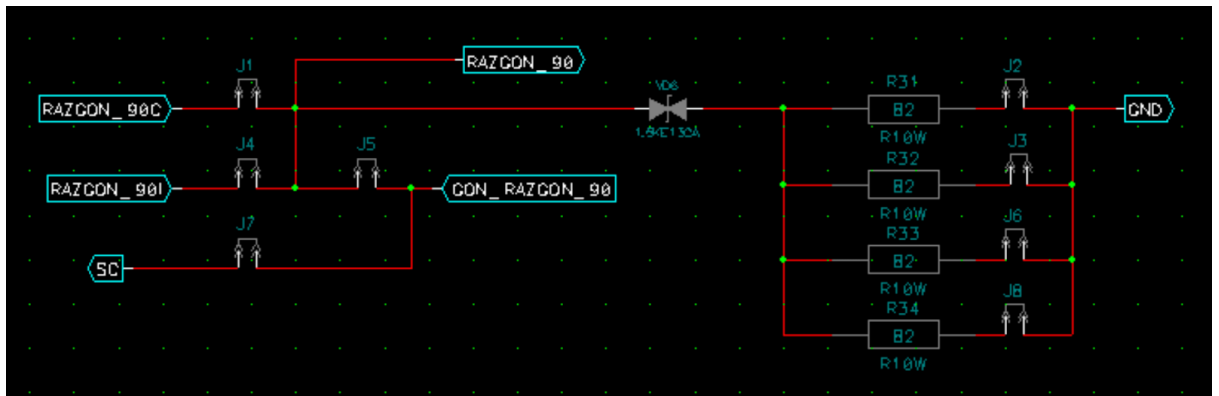


Рис. 3.6. Імітатор розгонних котушок та вибір режиму роботи.

Вимоги до активного навантаження імітатора котушки RAZGON\_90C:

- Струм споживання RAZGON\_90C не більше 1,1 А, але не менше 950 мА;
- Потужність не менше 25 Вт;
- Потужність набирається із послідовно з'єднаних резисторів.

Вимоги до активного навантаження імітатора котушки RAZGON\_90I:

- Струм споживання RAZGON\_90I не більше 1,15 А, але не менше 980 мА;
- Потужність не менше 25 Вт;
- Потужність набирається із послідовно з'єднаних резисторів.

На рис. 3.7 зображено електричну схему що використовується як захисний компонент від перенапруги для імітатора ЕРС.

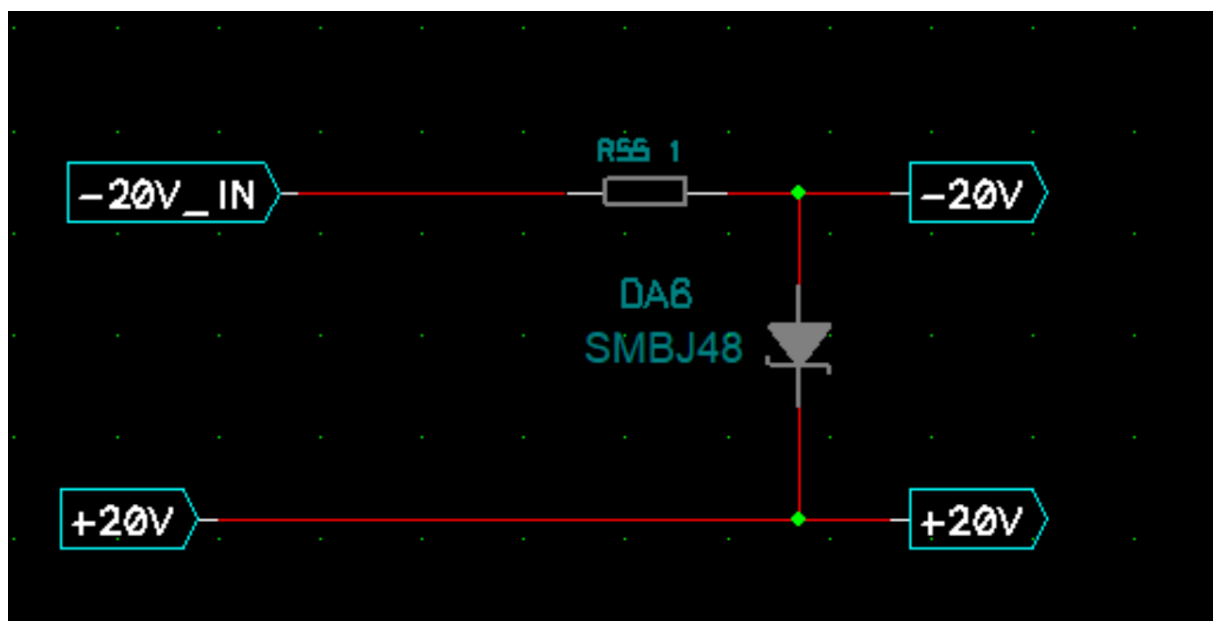


Рис. 3.7. Електрична схема що є елементом захисту від сплесків напруг.

На рис. 3.8 зображена електрична схема імітатора ЕРС.

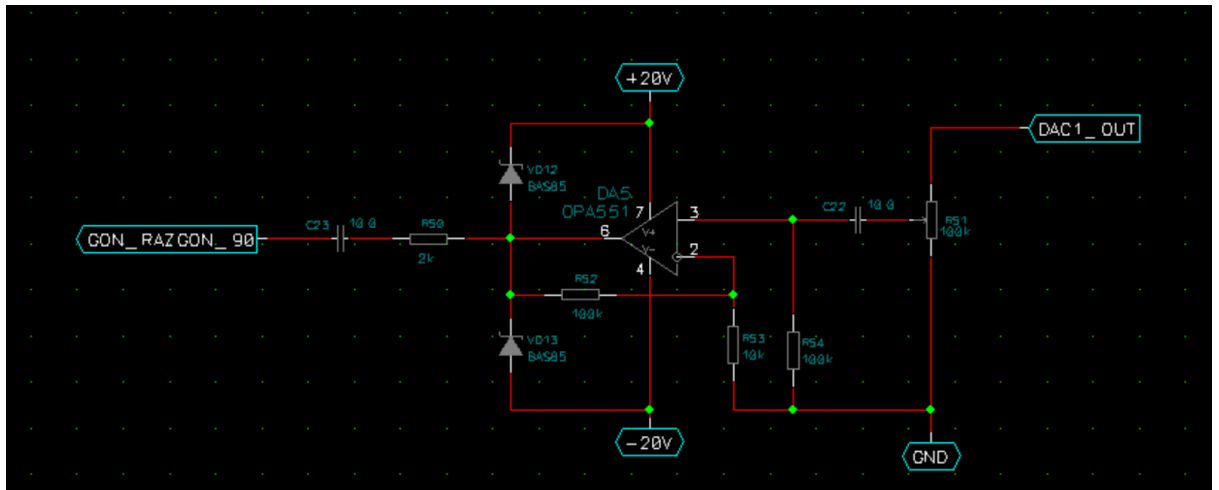


Рис. 3.8. Електрична схема імітатора ЕРС.

На рис. 3.8 зображено електричну схему що формує вихідний сигнал з виходу цифро-аналогового перетворювача контролера.

Код керування розробленим імітатором наведено у ДОДАТКУ А.

## РОЗДІЛ 4: ОГЛЯД ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Створення друкованої плати (РСВ) є ключовим етапом у розробці нового електронного пристрою. Цей процес вимагає ретельного планування та врахування багатьох факторів, таких як електричні характеристики, теплові умови, механічна стійкість та бюджет виробництва. Проектування плати виконувалося з урахуванням електричних характеристик компонентів, вимог до теплового режиму та механічної стійкості. Також в процесі виготовлення друкованої плати було дотримано всіх вимог та стандартів, зазначених у нормативних документах ІРС та ДСТУ [14-17]. Відповідно було спроектовано, проведено трасування та тестування РСВ плати.

Розробка відбувалась згідно На рис. 4.1 зображено схему розведення друкованої плати для розробленого імітатора гіровузла.

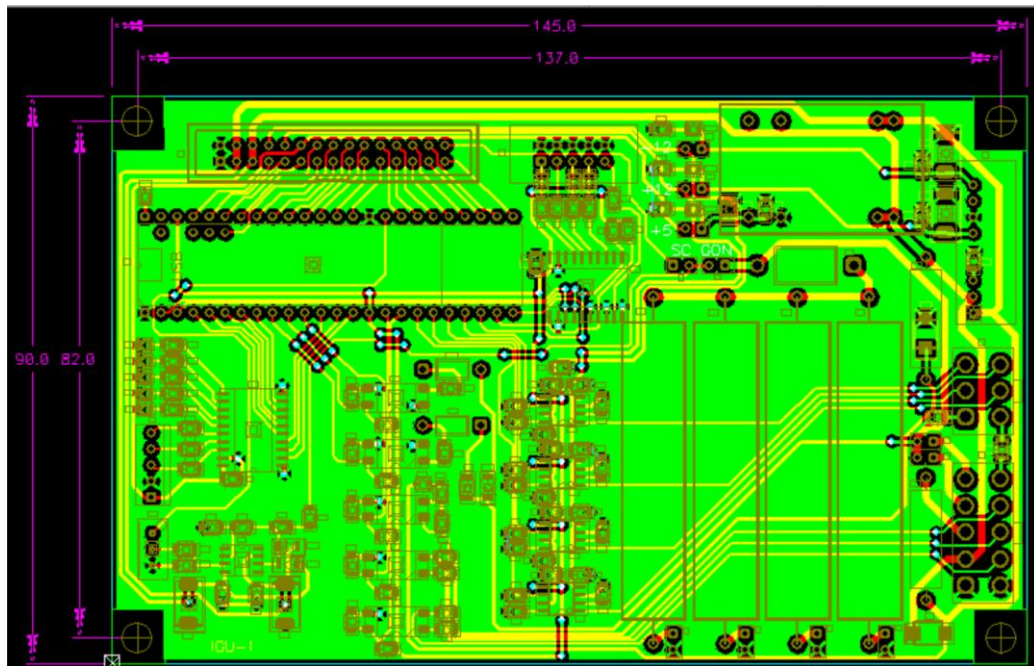


Рис. 4.1. Розведена друкована плата

Розведення друкованої плати відбувалось у середовищі P-CAD PCB. Габаритні розміри плати складають 145.0 мм (довжина) 90.0 мм (ширина), з

позначеними отворами для кріплення в кутах. Роз'єм живлення позначений як +5V. Жовті лінії позначають мідні доріжки, які з'єднують компоненти плати.

Монтаж відбувався вручну. Після розташування та паяння було проведено візуальний огляд кожного з'єднання, перевірка на відсутність холодних паяльних точок, містків або інших дефектів.

На рис. 4.2 та 4.3 зображено друковану плату з усіма встановленими компонентами, що отримана в результаті виконаних робіт.

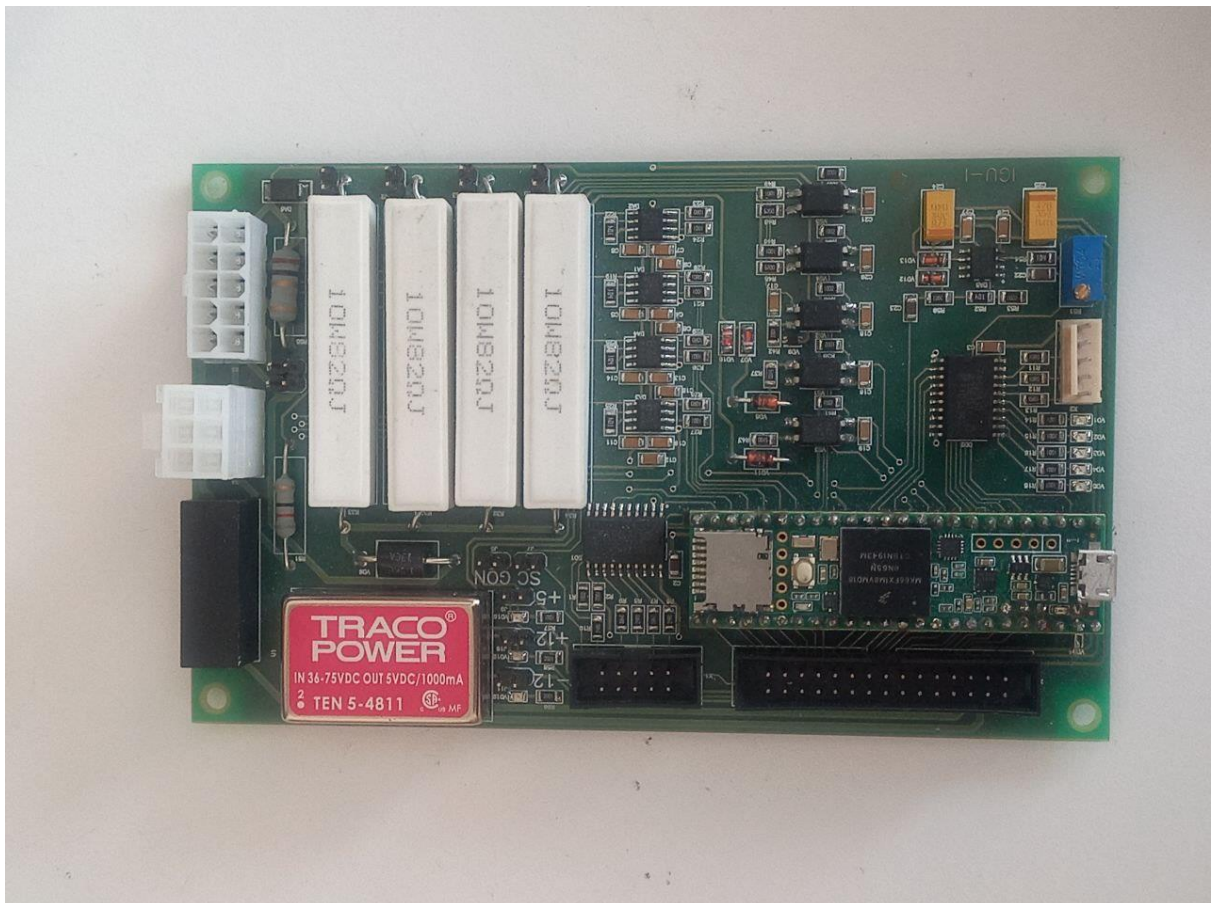


Рис. 4.2 Отримана друкована плата, вид зверху.

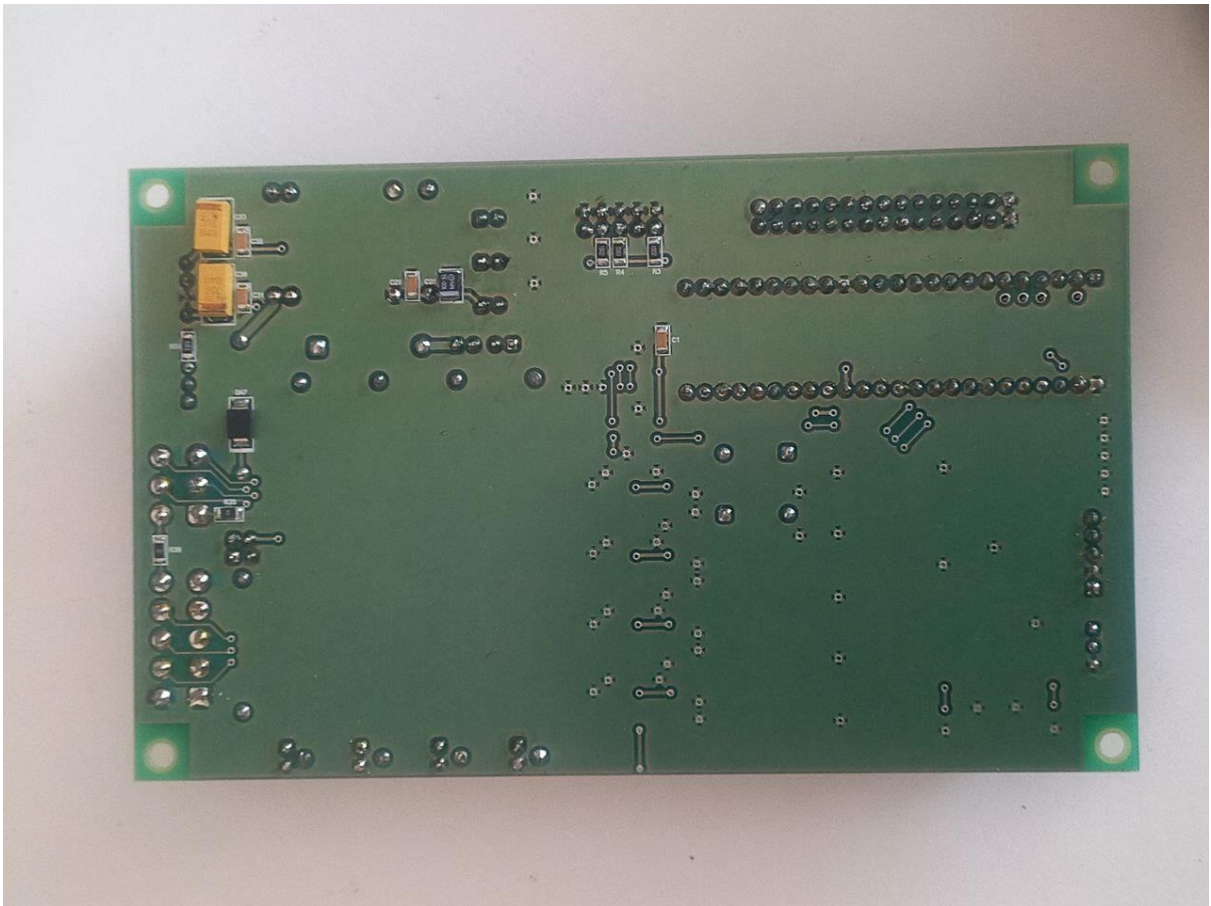


Рис. 4.3 Отримана друкована плата, вид ззаду.

З датчиків руху розробленого імітатора гіроскопу було знято осцилограми. Через конструктивні особливості імітатора та пускового механізму, зняття осцилограм з котушок обертання виявилось неможливим. Процес зйомки осцилограм зображено на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Підключення імітатора гіроскопу (відладочної плати) до пускового механізму.

На рис. 4.4 зображено процес отримання осцилограм з датчиків обертання імітатора гіроскопу.

На окремому знімку (рис. 4.5) представлені самі осцилограми, які описують поведінку датчиків обертання під час роботи.



Рис. 4.5. Осцилограми отримані із датчиків обертання розробленого імітатора гіровузла.

Через особливості розробленого імітатора гіровузла, отримати сигнали з котушок розгону неможливо, тому перевірка працездатності відбувалась як перевірка калібрування ПЗРК, налаштованого за допомогою запропонованого імітатора. Результати виявились задовільними, ПЗРК було налаштовано коректно.

Для запропонованого імітатора гіровузла було розроблено металевий корпус, що зображено на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Розроблений корпус для запропонованого імітатора гіровузла

На рис. 4.7 Зображено розроблений імітатор гіровузла та механічний гіроскоп для порівняння.



Рис. 4.7. Розроблений імітатор гіровузла та механічний гіроскоп.

## ВИСНОВКИ

Удосконалений імітатор гіровузла відповідає вимогам до точності та адаптивності в тестуванні і калібруванні гіроскопічних систем, які використовуються у різних галузях від авіації до космічної промисловості. Актуальність питання зумовлена потребою підвищення надійності та збільшенням гарантованого терміну роботи імітаторів гіровузла шляхом заміни його механічних складових на електронні.

У роботі вирішено науково-технічне завдання, яке полягало у розробленні структурної та принципової схем гіровузла і виготовленні дослідного зразка удосконаленого імітатора гіровузла.

Результатами роботи є розроблені структурна та принципова схеми гіровузла і виготовлений дослідний зразок удосконаленого імітатора гіровузла.

Використання отриманих результатів на практиці надасть можливість замінити гіровузла його електронним імітатором. Така заміна дозволить зберегти ресурс оригінального гіровузла на заданому рівні під час технічної експлуатації електронних засобів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лакоза С.Л. Навігаційні системи. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021  
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9da07181-5ef5-463b-96e2-e774190a3364/content>
2. Іванов І.І. Інерціальні системи навігації. - Київ: Наукова думка, 2018
3. Петров П.П. Розробка та тестування інерціальних систем. - Харків: Техніка, 2019
4. Сидоренко С.С. Основи гіроскопічних приладів. - Львів: Світ, 2020
5. Мельник М.М. Імітатори гіроскопів: конструкція та застосування. - Дніпро: Дніпрокнига, 2021
6. Дмитренко О.О. Відладочні плати для інерціальних систем. - Одеса: Вища школа, 2022
7. Коваленко К.К. Технології моделювання руху. - Запоріжжя: Поліграф, 2019
8. Підручник сержанта: зенітних підрозділів військ ППО СВ. – Київ: Наш Формат, 2022 <https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/12/%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA-%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B0-%D1%96%D0%B3%D0%BB%D0%B0-.pdf>
9. ПЕРЕНОСНИЙ ЗЕНІТНИЙ РАКЕТНИЙ КОМПЛЕКС “СТРІЛА-2М” (9К32М) ТЕХНІЧНИЙ ОПИС ТА ІНСТРУКЦІЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ 9К32М ТО. Розсекречено на підставі перемир'я (Вх №93-97с) 17.07.97. Зав. секретної бібліотеки “Пилипчук”. ВІЙСЬКОВЕ ВИДАВНИЦТВО МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ, 1971
10. Мала гірнична енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. – Дніпро: Донбас, 2004. – Т. 1: А – К. – 640 с.

11. Вікіпедія. Пеленг (навігація) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Пеленг\\_\(навігація\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Пеленг_(навігація)). – Назва з екрана.
12. РУХОМИЙ КОНТРОЛЬНИЙ ПУНКТ 9В866 І КОНТРОЛЬНО-ПЕРЕВІРОЧНА АПАРАТУРА 9Ф7. Інструкція з експлуатації 9В866.00.000 ІЕ.1985
13. РУХОМИЙ КОНТРОЛЬНИЙ ПУНКТ 9В837М І КОМПЛЕКТ АПАРАТУРИ 9Ф387М. Інструкція з експлуатації 9В837М.00.000 ІЕ. 1979
14. ДСТУ ГОСТ 2.701-2008: ЄСКД. Правила виконання електричних схем.
15. ДСТУ ГОСТ 23752-79: Елементи друкованих плат. Загальні технічні вимоги.
16. ДСТУ 2147-92: Електронні засоби обчислювальної техніки. Загальні технічні вимоги.
17. ДСТУ 2156-93: Мікроелектронні модулі. Технічні вимоги та методи випробувань.

## ДОДАТОК А

### КОД ДЛЯ РОБОТИ УДОСКОНАЛЕНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ІМІТАТОРА ГИРОВУЗЛА

```
#include <Arduino.h>
#include <Audio.h>
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <SerialFlash.h>

// Pin definitions
#define LED1_PIN 13
#define LED2_PIN 14
#define LED3_PIN 15
#define LED4_PIN 16
#define OUT_IN_CHECKING_PIN 17
#define DW1_CONTROL_PIN 18
#define DW2_CONTROL_PIN 19
#define DW3_CONTROL_PIN 20
#define DW4_CONTROL_PIN 21
#define DAK0_OUT_PIN 22
#define DAK1_OUT_PIN 23
#define RAZGON_0_CHECKING_PIN 24
#define RAZGON_180_CHECKING_PIN 25

// Time constants
#define INITIAL_DELAY 3000 // 3 seconds
#define FINAL_DELAY 1 // 0.001 second
#define DURATION 2460 // 2.46 seconds

// Variables for signal control
unsigned long previousMillis = 0;
int currentDelay = INITIAL_DELAY;
int step = (INITIAL_DELAY - FINAL_DELAY) / (DURATION / 10); // Step calculation

// GUItool: begin automatically generated code (edited)
AudioSynthToneSweep tonesweep; // xy=102,174
AudioAmplifier amp; // xy=324,172
AudioOutputAnalog dac; // xy=452,189

AudioConnection patchCord1(tonesweep, amp);
AudioConnection patchCord2(amp, 0, dac, 0);
// GUItool: end automatically generated code

const float t_ampx = 0.8;
const int t_lox = 10;
const int t_hix = 22000;
const float t_timex = 10; // Length of sweep in seconds
```

```

void setup() {
  // Initialize serial connection
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial && millis() < 3000);

  AudioMemory(8);
  amp.gain(0.5f);

  // Initialize pins
  pinMode(LED1_PIN, OUTPUT);
  pinMode(LED2_PIN, OUTPUT);
  pinMode(LED3_PIN, OUTPUT);
  pinMode(LED4_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OUT_IN_CHECKING_PIN, INPUT);
  pinMode(DW1_CONTROL_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DW2_CONTROL_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DW3_CONTROL_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DW4_CONTROL_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DAK0_OUT_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DAK1_OUT_PIN, OUTPUT);
  pinMode(RAZGON_0_CHECKING_PIN, INPUT);
  pinMode(RAZGON_180_CHECKING_PIN, INPUT);

  // Initialize state
  digitalWrite(LED1_PIN, HIGH); // Device is on
  digitalWrite(LED2_PIN, LOW);
  digitalWrite(LED3_PIN, LOW);
  digitalWrite(LED4_PIN, LOW);
  digitalWrite(DW1_CONTROL_PIN, LOW);
  digitalWrite(DW2_CONTROL_PIN, LOW);
  digitalWrite(DW3_CONTROL_PIN, LOW);
  digitalWrite(DW4_CONTROL_PIN, LOW);
  digitalWrite(DAK0_OUT_PIN, LOW);
  digitalWrite(DAK1_OUT_PIN, LOW);

  // Audio sweep demonstration
  if (!tonesweep.play(t_ampx, t_lox, t_hix, t_timex)) {
    Serial.println("ToneSweep - play failed");
    while (1);
  }

  Serial.println("Tonesweep up started");
  while (tonesweep.isPlaying());

  Serial.println("Tonesweep down started");
  if (!tonesweep.play(t_ampx, t_hix, t_lox, t_timex)) {
    Serial.println("ToneSweep - play failed");
    while (1);
  }

  while (tonesweep.isPlaying());
  Serial.println("Done");
}

void loop() {
  if (digitalRead(OUT_IN_CHECKING_PIN) == HIGH) {

```

```

digitalWrite(LED2_PIN, HIGH); // Start working

unsigned long currentMillis = millis();
if (currentMillis - previousMillis >= currentDelay) {
  previousMillis = currentMillis;
  toggleRotationSignals();
  currentDelay -= step; // Reduce delay

  if (currentDelay <= FINAL_DELAY) {
    currentDelay = FINAL_DELAY;
    digitalWrite(DAK0_OUT_PIN, HIGH);
    digitalWrite(DAK1_OUT_PIN, HIGH);
    digitalWrite(LED4_PIN, HIGH); // Turn on DAK0/1_OUT

    while (true) {
      // Check frequency and turn off
      if (checkFrequency(106)) {
        digitalWrite(DAK0_OUT_PIN, LOW);
        digitalWrite(DAK1_OUT_PIN, LOW);
        break;
      }
    }
  }
} else {
  resetDevice();
}

// Audio sweep demonstration in loop
if (!tonesweep.play(t_ampx, 1000, 1000, t_timex)) {
  Serial.println("ToneSweep - play failed");
  while (1);
}

while (tonesweep.isPlaying());
Serial.println("Done");
delay(2000);
}

void toggleRotationSignals() {
  static int state = 0;
  switch (state) {
    case 0:
      digitalWrite(DW1_CONTROL_PIN, HIGH);
      digitalWrite(DW2_CONTROL_PIN, LOW);
      digitalWrite(DW3_CONTROL_PIN, LOW);
      digitalWrite(DW4_CONTROL_PIN, LOW);
      state = 1;
      break;
    case 1:
      digitalWrite(DW1_CONTROL_PIN, LOW);
      digitalWrite(DW2_CONTROL_PIN, HIGH);
      state = 2;
      break;
    case 2:
      digitalWrite(DW2_CONTROL_PIN, LOW);
      digitalWrite(DW3_CONTROL_PIN, HIGH);

```

```

    state = 3;
    break;
case 3:
    digitalWrite(DW3_CONTROL_PIN, LOW);
    digitalWrite(DW4_CONTROL_PIN, HIGH);
    state = 0;
    break;
}
}

bool checkFrequency(int targetFrequency) {
    // Simulated frequency check
    int currentFrequency = analogRead(RAZGON_0_CHECKING_PIN);
    return currentFrequency >= targetFrequency;
}

void resetDevice() {
    digitalWrite(LED2_PIN, LOW);
    digitalWrite(LED3_PIN, LOW);
    digitalWrite(LED4_PIN, LOW);
    digitalWrite(DW1_CONTROL_PIN, LOW);
    digitalWrite(DW2_CONTROL_PIN, LOW);
    digitalWrite(DW3_CONTROL_PIN, LOW);
    digitalWrite(DW4_CONTROL_PIN, LOW);
    digitalWrite(DAK0_OUT_PIN, LOW);
    digitalWrite(DAK1_OUT_PIN, LOW);
    currentDelay = INITIAL_DELAY;
    previousMillis = 0;
}

```