

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2023р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології екологічної безпеки»
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
на тему: «Рефрактометричний прилад для визначення типу моторної
оливи»

Виконав :

студент IV курсу, групи ПН-91

Жидков Владислав Віталійович _____

Керівник:

асистент, PhD

Дорожинська Ганна Василівна _____

Рецензент:

професор, д.т.н.

Куц Юрій Васильович _____

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

Студент _____

Київ – 2023 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

				ДП 152. 9102.003.ПЗ		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.	Жидков В.В.				1	1
Керівн.	Дорожинська Г.В.				КП ім. Ігоря Сікорського Каф. ІВТ Гр. ПН-91	
Н/контр.						
Зав.каф.	Єременко В.С.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «РЕФРАКТОМЕТРИЧНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ТИПУ МОТОРНОЇ ОЛИВИ»**

Київ – 2023 року

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

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційні вимірювальні технології екологічної безпеки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Жидкову Владиславу Віталійовичу

1. Тема проєкту «Рефрактометричний прилад для визначення типу моторної оливи», керівник проєкту Дорожинська Ганна Василівна асистент, PhD, затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. № 2057-с.
2. Термін подання студентом проєкту «10» червня 2023 р.
3. Вихідні дані до проєкту:
 - 3.1. Конструктивні вимоги до приладу і його складових частин.
Габаритні розміри та маса виробу – мінімальні.
 - 3.2. Умови експлуатації:
 - Атмосферний тиск: 84-106,7кПа;
 - Відносна вологість: 30-80% при 25°C;
 - діапазон робочих температур: 20-30°C;

- Напруга живлення: $+19 \pm 0,5$ В;

3.3.Вимоги безпеки:

Прилад повинен відповідати вимогам безпеки згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75.

За способом захисту людини від ураження електричним струмом - клас III з живленням від вторинного джерела живлення напругою +19 В.

3.4.Характеристики приладу:

- Діапазон вимірювання критичних кутів моторної оливи: 60-70 градусів;
- Межі відносної похибки вимірювання кутів, не більше ± 1 %;
- Довжину хвилі опромінення зразка оливи з діапазону 600-850 нм;
- Споживана приладом потужність, не більше 30 Вт;
- Об'єм проби досліджуваної оливи, не більше: 0,25 мл.

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

4.1. Характеристика об'єкту аналізу.

4.2. Розглянути способи визначення типу моторних олив.

4.3. Виконати огляд сучасних аналогів

4.4. Обґрунтувати структуру приладу.

4.5. Виконати опис конструкції.

4.6. Виконати розрахунок схеми електричної принципової та обґрунтувати вибір елементної бази.

4.7. Виконати розрахунок похибок.

4.8. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема, схема електрична принципова з переліком елементів, презентація доповіді.

6. Дата видачі завдання "1" березня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Характеристика об'єкту аналізу.	13.03.2023р.	
2.	Розглянути способи визначення типу моторної оливи.	27.03.2023 р.	
3.	Виконати огляд сучасних аналогів	10.04.2023 р.	
4.	Обґрунтувати структуру приладу	24.04. 2023 р.	
5.	Виконати опис конструкції	08.05. 2023 р.	
6.	Виконати розрахунок схеми електричної принципової та обґрунтувати вибір елементної бази	15.05. 2023 р.	
7.	Виконати розрахунок похибок	22.05. 2023 р	
8.	Підготувати креслення до дипломного проєкту	29.05. 2023р.	
9.	Підготувати презентацію та доповідь на захист дипломного проєкту	10.06. 2023р.	
10.	Надання ДП (електронний варіант) відповідальному на кафедрі для перевірки на наявність запозичень (плагіату)	10.06.23 р	
11.	Остаточна перевірка ДП керівником, надання відгуку	10.06.23 р.	
12.	Попередній захист ДП	12.06.23 р.	
13.	Рецензування	14.06.23 р.	
14.	Надання роботи відповідальному за організацію дипломного проєктування на кафедрі (друкований варіант)	16.06.23 р.	
15.	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	21.06.23 р.	

Студент

Владислав ЖИДКОВ

Керівник

Ганна ДОРОЖИНСЬКА

АНОТАЦІЯ

Метою дипломного проєкту є створення приладу для визначення типу моторних олив внаслідок їх експлуатації в двигуні автомобіля.

Об'єкт дослідження – моторна олива різних типів для двигунів внутрішнього згорання.

Предметом дослідження – створення приладу для експресного визначення типу моторних олив.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Розглянути способи визначення типу моторних олив.
- Виконати огляд аналогів.
- Обґрунтувати структуру приладу.
- Виконати опис конструкції.
- Виконати розрахунок схеми електричної принципової та обґрунтувати вибір елементної бази.
- Виконати розрахунок похибок.

Методи дослідження: рефрактометричний метод, теорія похибок.

Для проєктування приладу застосовано: вторинне джерело, стабілізатори напруги та струму, підсилювачі, кроковий двигун, аналогово-цифровий перетворювач з мікроконтролером та цифровий індикаторний пристрій.

Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, 26 рисунків, 12 таблиць, списку використаних джерел із 17 позицій.

Загальний обсяг роботи – 83 сторінки, з яких основна частина викладена на 72 сторінках.

Ключові слова: моторна олива, рефрактометрія, показник заломлення, критичний кут.

ANNOTATION

The goal of the diploma project is to create a device for determining the type of motor oils due to their use in a car engine.

The object of research is motor oil of various type in an internal combustion engine.

The subject of the research is the creation of a device for the express determination of the type of motor oils.

To fulfill the set goal, the following tasks must be solved:

- Consider methods of determining the type of motor oils.
- Review analogues
- To justify the structure of the device.
- Complete the design description.
- Perform the calculation of the electrical principle diagram and justify the choice of element base.
- Calculate errors.

Research methods: refractometric method, uncertainty theory.

For the development of the device, the following was used: a secondary source, voltage and current stabilizers, amplifiers, a stepper motor, an analog-to-digital converter with a microcontroller, and a digital indicator device.

The work consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, 26 figures, 12 tables, a list of used sources with 17 items. The total volume of the work is 83 pages, of which the main part is laid out on 72 pages.

Key words: motor oil, refractometry, reflective index, critical angle.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТОРНИХ ОЛИВ.....	12
1.1 Моторні оливи та їх типи.....	12
1.2 Параметри якості моторних олив	13
1.3 Методи визначення різних типів моторних олив	17
Висновки до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2 ВИБІР МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1 Рефрактометричний метод.....	25
2.2 Обґрунтування вибору діапазону кутового сканування	26
Висновки до розділу 2.....	30
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ	31
3.1 Розробка схеми електричної функціональної.....	31
3.2 Розробка схеми електричної принципової.....	32
3.3 Опис елементів схеми електричної принципової.....	34
3.4 Розрахунок споживаної потужності приладом	59
Висновки до розділу 3.....	62
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ	63
4.1 Розрахунок похибки струму лазера.....	63
4.2 Розрахунок похибки трансїмпедансного підсилювача.....	64
4.3 Розрахунок похибки для аналогово-цифрового перетворювача.....	65
4.4 Розрахунок похибки для крокового двигуна	66
4.5. Розрахунок похибки вимірювання критичних кутів	70
Висновки до розділу 4.....	73
ВИСНОВОК	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛАТЕРАТУРИ	75
ДОДАТОК А. Функціональна схема приладу для визначення типу моторної оливи.	78
ДОДАТОК Б. Схема електрична принципова приладу для визначення типу моторної оливи	79
ДОДАТОК В. Перелік елементів схеми електричної принципової	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння

ІЧ – інфрачервоний

ІЧФС – інфрачервона Фур'є спектроскопія

ККД – коефіцієнт корисної дії

МО – моторна олива

ПЗ – показник заломлення

ППР – поверхневий плазмонний резонанс

ТЗ – технічне завдання

ТПП – трансімпедансний підсилювач

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

У роботі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) моторна олива (МО) виконує важливу роль, впливаючи на процес зносу деталей і термін експлуатації. Це ставить підвищенні вимоги до якості та відповідності олив заявленим виробником експлуатаційних характеристик. Ефективне використання ДВЗ залежить від оперативного контролю цих характеристик. Існують різні типи моторних олив, включаючи мінеральні, напівсинтетичні та синтетичні.

Існуючі методи та прилади для визначення типу моторної оливи мають свої обмеження та недоліки. Наприклад, використання хімічних аналізів вимагає складних лабораторних умов та спеціальних реагентів. Це призводить до збільшення вартості та тривалості аналізу, а також ускладнює його виконання в умовах виробничих масштабів. Також деякі методи не дозволяють здійснювати швидке визначення типу моторної оливи, що може впливати на якість експлуатації автомобілів. З урахуванням зростаючих вимог щодо якості та екологічної безпеки, розробка або модернізація рефрактометричного приладу для визначення типу моторної оливи стає особливо актуальною.

Експресне визначення типу моторної оливи є важливим для виявлення фальсифікату. Показана можливість визначення типу моторної оливи за допомогою вимірювань її рефрактометричних характеристик. Тип моторної оливи було запропоновано визначати з використанням рефрактометричного методу, заснованого на вимірюванні критичного кута. Було визначено необхідний діапазон кутового сканування та довжини хвилі, що використовується в процесі вимірювання. Результати проєкту позитивно вплинуть на роботу багатьох галузей промисловості, де активно застосовується моторна олива, а саме: автомобільна промисловість, вантажна та комерційна авіація, морська промисловість, енергетика, а також військова промисловість.

РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТОРНИХ ОЛИВ

1.1 Моторні оливи та їх типи

Моторні оливи - це оливи [1], які є невід'ємною частиною для ДВЗ, і відіграють роль змащування як для роторних, так і поршневих двигунів. На сьогоднішній день вони складаються з присадок та базових олив. У свою чергу присадки виконують функцію покращення фізико-хімічних властивостей олив, а також підвищувати потужність двигуна. Моторні оливи здатні виконувати багатофункціональні функції, зокрема:

1. Забезпечення стабільної роботи при окисненні;
2. Високий захист від корозії деталей двигуна;
3. Захист двигуна від утворення різних видів забруднення;

Великою перевагою моторної оливи є її низька витрата при роботі двигуна, що дозволяє нам використовувати її впродовж довгого часу. Разом з тим, на роботу ДВЗ впливають такі фактори як тиск та температура. Через те, що моторні оливи взаємодіють з вузлами тертя двигуна, то в цих вузлах утворюється тиск. Тиск в діапазоні $0,2 \div 2$ МПа утворюється між стінкою циліндра та поршковими кільцями, а у підшипника колінчастого вала досягає $20 \div 30$ МПа. З приводу температури, то в картері двигуна вона досягає $80 \div 100^{\circ}\text{C}$, що є робочою температурою. Температура підшипника колінчастого вала складає 150°C . Якщо говорити про дизельні двигуни, то в них температура може досягати $500 \div 700^{\circ}\text{C}$, для карбюраторних вона становить $150 \div 450^{\circ}\text{C}$.

До типів моторних олив відносять:

- синтетичні;
- напівсинтетичні;
- мінеральні.

Синтетичні моторні оливи [2] отримують завдяки хімічному процесу, під час якого відбувається синтез однорідних молекул речовин. Серед переваг можна виділити: чудове змащування, відсутність зміни в'язкості в

температурному діапазоні, стійкість до окислення, застигання при низькій температурі, а також задовільні робочі характеристики при високих температурах.

Напівсинтетичні моторні оливи виготовляються на основі суміші мінеральної та синтетичної оливи. Завдяки такому поєднанню вдається зберегти основні властивості синтетичних моторних оливи. Даний вид моторних оливи містить дещо гірші показники окиснення та в'язкості, але водночас має досить низьку ціну, завдяки чому має значну перевагу над синтетичними.

Мінеральні моторні оливи отримуються в результаті переробки нафти. Даний вид оливи має меншу ефективність через значну кількість недоліків серед представлених видів. Мінеральні оливи сильно уразливі як до низьких, так і до високих температур. З огляду на те, що вони містять природні компоненти, це свідчить про погіршення робочих характеристик при високих температурах, а при низьких починається процес згущення. Також є небезпечним взаємодія з повітрям, оскільки це може призвести до скупчення усякого непотребу всередині ДВЗ при хімічних реакціях.

1.2 Параметри якості моторних оливи

Якість моторної оливи є важливою складовою для ДВЗ. Параметри якості можуть вказати нам, як саме буде працювати двигун. В'язкість, забруднення, корозія, температура спалаху і застигання є фізико-хімічними властивостями, які характеризують якість моторних оливи. Під час експлуатації двигуна дані властивості відіграють роль у визначенні використання допустимої кількості моторної оливи.

В'язкість – це її [3] властивість, яка визначає ступінь опору течії в струменевому потоці. В'язкість впливає на експлуатаційні характеристики вузлів та на режим змащування двигуна. Важливо дотримуватися балансу даного параметра, оскільки недостатня в'язкість може спричинити

збільшення тертя і посилення зносу пар тертя, бо захисна плівка не в змозі захистити від взаємного контакту поверхні тертя. При високій в'язкості призводить до зниження ККД двигуна через втрату потужності на боротьбу з внутрішнім тертям. Кінетична та динамічна в'язкість використовуються для оцінювання самої в'язкості оливи.

Динамічну в'язкість можна охарактеризувати як здатність чинити опір взаємному переміщенню шарів з певною швидкістю під впливом зовнішніх сил, що представляє собою мірою внутрішнього тертя. Дана в'язкість має і іншу назву – коефіцієнт внутрішнього тертя, який вимірюється в Н·с/м² (Па·с) і визначається за формулою:

$$\eta = \frac{dv}{Dx} \quad (1.1)$$

Кінетична в'язкість застосовується у гідродинамічних розрахунках, і являє собою питомий коефіцієнт внутрішнього тертя. Вимірюється в мм²/с та розраховується наступним чином:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.2)$$

де v – питомий коефіцієнт внутрішнього тертя,

η – динамічна в'язкість оливи,

ρ – густина.

Інтенсивність зниження в'язкості для всіх моторних оливи можна розрахувати наступним чином:

$$v_t = v_{100} \cdot C_t \quad (1.3)$$

де v_t – кінетична в'язкість при температурі визначення, мм,

v_{100} – кінетична в'язкість при 100°C, мм,

C_t – усереднений в'язкісно-температурний коефіцієнт.

На в'язкість моторної оливи також впливає тиск. В'язкість починає зростати з 5 МПа. Наприклад, у колінчастих валах тиск досягає в діапазоні 20 – 35 МПа. Отже, чим більше тиск, тим більше зростає в'язкість. Тому варто враховувати цей факт при проектуванні систем фільтрації та вузлів тертя, які

працюють на перепаді тиску перед фільтром і після нього. Формула для залежності в'язкості від тиску наступна:

$$\nu_p = \nu_a \cdot \beta^p \quad (1.4)$$

де ν^p - в'язкість оливи при тиску Р,

ν^a - в'язкість оливи при атмосферному тиску,

β – постійний коефіцієнт 1,002,

Р – тиск, при якому визначають в'язкість.

В таблиці 1.1 наведено приклад зростання в'язкості оливи в залежності від тиску

Таблиця 1.1 - Залежність в'язкості моторної оливи від тиску[4]

Тиск, МПа	7	20	40	60
Підвищення в'язкості, % від вихідної	20...25	50...60	120...160	250...350

Забруднення – це [5] природний процес, який утворюється в результаті багатогранних процесів. Через процес неповного згорання оливи утворюється сажа, що є однією з причин забруднення моторних олив. Забруднення може утворитись внаслідок потрапляння з атмосфери різного виду домішок, наприклад, під час заправлення автотранспорту. Через тривалу [6] експлуатацію двигуна можуть утворюватися механічні домішки, адже з часом відбувається знос поршневих деталей. Моторна олива втрачає свої властивості при взаємодії з водою, тому що при взаємодії утворюється сірчана кислота, яка збільшує кислотну агресивність. Допустимий об'єм води не повинен перевищувати 0,03 – 0,05%. Перевищення допустимих значень може привести до негативних наслідків, таких як: гідроліз присадок, порушення колоїдної стабільності забруднень, через що відбувається блокування оливних фільтрів, а також пришвидшення окислюваності олив.

Антикорозійна властивість в моторних оливах відноситься до їх здатності запобігання пошкодженню металевих поверхонь. У моторних

оливах наявні антикорозійні добавки, які утворюють захисну плівку на металевій поверхні. Ця функція дозволяє запобігати контакту поверхні з корозійним середовищем і це є великою перевагою для ДВЗ, де металеві деталі мають тісний контакт з моторною оливою та високими температурами, що може сприяти корозії. Корозійна стійкість моторної оливи є важливою складовою, адже корозійний процес може призвести до зниження ефективності двигуна та зменшення терміну його експлуатації

Температура спалаху – температура внаслідок нагрівання оливи таким чином, що пари у взаємодії з повітрям утворюють суміш, яка спалахує при піднесенні до неї вогню. Температура спалаху свідчить про високу горючість самої оливи, що може супроводжуватись наявністю низькокиплячих фракцій або інших домішок. ДВЗ працює завдяки компресійному нагріванню повітря в циліндрі, а також іскровому запалюванню. Якщо домішка становить 0,5% бензину, то вона здатна понизити температуру спалаху з 180° до 80°C. Це є вкрай небезпечним процесом, бо температура спалаху оливи має становити не менше 135°C. При надто низькій температурі спалаху може відбуватися процес випаровування моторної оливи та втрати мастильних властивостей.

Температура застигання – це така температура, при якій моторна олива застигає. Дана температура є досить важливим параметром, оскільки показує те, як захищає двигун в холодну пору року моторна олива. Причиною поганого захисту відбувається за умови низької температури застигання. Як результат, це призводить до проблематичного запускання двигуна та зношення деталей двигуна під час тривалого прогрівання, поломки двигуна.

Змащувальні властивості впливають [7] безпосередньо на експлуатацію двигуна: зношення поверхонь, процес тертя. Ці властивості є важливою характеристикою при виборі моторної оливи. Вони забезпечують зменшення тертя між рухомими деталями, що гарантує більш ефективну роботу двигуна. Крім того змащування дозволяє зменшити знос деталей (поршні, колінчасті вали, підшипники) та збільшити їх термін експлуатації.

Також дана властивість дає змогу зменшити шум двигуна. Забезпечення найменшого тертя та зносу деталей двигуна відбувається за умови граничного змащування оливи. Завдяки змащуванню моторна олива не дає можливість контактувати між собою металевим поверхням.

1.3 Методи визначення різних типів моторних олив

Оптичні методи

Рефрактометричний метод – це метод [8] контролю моторної оливи, який базується на вимірюванні показника заломлення рідини. Показник заломлення - безрозмірна величина, яка описує швидкість поширення світла. Суть методу полягає у вимірюванні кута заломлення світла, яке проходить через оливу та повертається по приладу.

Рефрактометричний метод надає інформацію про показник заломлення оливи та опосередковано концентрацію домішок. Вимірювання показника заломлення дає можливість оцінити питому вагу моторної оливи, що залежить від складу та концентрації компонентів оливи. Також цей параметр впливає на здатність оливи до змащення, охолодження та захисту від корозії двигуна. У визначенні концентрації домішок суть полягає у наступному: чим більше домішок, тим більше буде показник заломлення.

Серед переваг даного методу можна виділити наступне:

- Простота використання;
- Висока швидкість вимірювання;
- Задовільна точність вимірювання.

Серед недоліків варто виділити залежність від температури. Оскільки показник заломлення залежить від температури, то цей фактор не варто ігнорувати. Також варто зазначити, що цей метод є обмеженим у застосуванні для визначення домішок. Варто звернути увагу, що рефрактометричний метод має недостатню чутливість для аналізу концентрації певних компонентів моторної оливи.

Флуоресцентний аналіз – це метод [9] дослідження моторної оливи, в якому використовується флуоресцентні властивості спеціальних маркерів, які додаються до оливи. В основі флуоресцентного аналізу лежить використання даного методу для дослідження стану оливи та визначення концентрації домішок. Щодо маркерів, які використовуються в даному методі, то вони поглинають світло певної довжини хвилі.

Функцією флуоресцентного аналізу є виявлення та визначення концентрації різноманітних речовин. При додаванні маркера, який поглинає світло в певному діапазоні довжин хвиль, маємо змогу дослідити моторну оливу на наявність певних сполук. До переваг флуоресцентного аналізу можна віднести:

- Висока чутливість: можливість виявлення низьких концентрацій речовин завдяки високій чутливості маркера до різноманітних сполук;
- Висока специфічність: дозволяє диференціювати різні види сполук;
- Простота використання: даний метод не потребує складного обладнання. Достатньо мати звичайну флуоресцентну лампу для виконання досліджень.

Серед недоліків можна виділити:

- Обмежене число маркерів: флуоресцентний аналіз може мати обмеження малий вибір маркерів, які можна придбати;
- Вимоги зберігання: на результати аналізу зразків може вплинути той факт, що під впливом температури або світла маркери можуть розкладатися.

Інфрачервона Фур'є спектроскопія є методом [10] дослідження фізичних і хімічних властивостей моторної оливи. Суть методу полягає у тому, що через зразок оливи проходить інфрачервоне світло. Деяка частота світла поглинається цим зразком, а сама частота залежна від хімічних зв'язків. По частоті можна відтворити інфрачервоний спектр, який містить інформацію про структуру, а також склад зразка оливи.

Основною функцією методу є ідентифікація хімічних зв'язків та функціональних груп, що містяться в зразку моторної оливи. Інфрачервона Фур'є спектроскопія дає можливість встановити кількість певних компонентів і їх співвідношення в зразку, який виражається у відсотках. Крім цього, цей метод може визначити такі фізичні властивості, як показник заломлення та в'язкість.

Серед переваг методу є можливість проведення аналізу в режимі реального часу, а також аналіз одночасно одразу декількох зразків оливи, при цьому зразки оливи можуть бути різних типів. Це дає можливість проводити якісний контроль виробництва. Також до переваг можна віднести те, що інфрачервона Фур'є спектроскопія не вимагає попереднього розчинення зразка. Це дозволяє провести аналіз рідин не руйнуючи їх. З приводу недоліків, то можна виділити той факт, що деякі речовини можуть не поглинати достатньої кількості світла в інфрачервоній області, що ускладнює процес ідентифікації. До того ж, інфрачервоне випромінювання може поглинатись поверхневими домішками на зразку, що виявляється на спектрі. Іншим недоліком є відсутність можливості до визначення абсолютної кількості оливи у зразку. У даному методі є можливість визначити тільки відносну кількість речовини.

Поверхневий плазмонний резонанс є ще одним із оптичних методів, який використовується для дослідження фізико-хімічних властивостей моторної оливи [11]. Суть методу полягає у вивченні взаємодії світла з металевою плівкою, яка знаходиться на поверхні матеріалу, що досліджується. Світло проходить через призму та падає на поверхню металевої плівки під кутом. При певних умовах, відбувається зміна показника заломлення досліджуваного зразка, що спричиняє зміну кута відбиття світла.

Метод поверхневого плазмонного резонансу використовувався для визначення показника заломлення оливи на поверхні та вимірювання концентрації домішок у моторній оливі. Перевагою поверхневого

плазмонного резонансу у порівнянні з іншими методами є широкий спектр практичного застосування, адже можна здійснювати аналіз рідких, газоподібних середовищ та тонких у нанометровому діапазоні плівок, а також вимірювання у режимі реального часу. Чутливість даного методу є також високою, оскільки даним методом можна виявляти навіть несуттєві зміни властивостей оливи. Завдяки такій чутливості є чудова можливість для дослідження багатьох параметрів моторної оливи. Безпечність даного методу є також його перевагою, адже він не потребує взаємодії з маркерами або іншими хімічними речовинами. Але серед усіх цих переваг є вагомий недолік – ціна. Також недоліком методу є дослідження взаємодій в межах невеликої відстані від чутливої поверхні сенсора, на якій розміщується досліджуваний зразок, як результат провести аналіз в усьому об'ємі зразка є проблематичним, якщо цього вимагає дослідження.

Хімічні методи

Хроматографічний метод є одним [12] з найбільш поширених методів дослідження моторної оливи. Це метод аналізу різних компонентів, які містить моторна олива, а також визначення відсоткового вмісту цих речовин: води, присадок та продуктів окислення. Щодо суті методу, то він полягає у наступному: різні компоненти зразка диференціюються в динамічних умовах між рухомою і нерухомою фазами за рахунок різних хімічних властивостей цих компонентів. На розподіл впливають хімічна структура, молекулярна маса, розмір, полярність. Серед переваг даного методу порівняно з іншими можна виділити:

- Швидкість аналізу;
- Точність вимірювання;
- Інформативність отриманих результатів;
- Здатність розділення різних компонентів зразка.

Разом із тим, він має суттєві недоліки, а саме:

- Висока ціна через потребу в спеціальному обладнанні;

- Залежність результатів дослідження від характеристик матеріалу, який використовується для розділення компонентів моторної оливи.

Метод летких речовин є методом аналізу [13] моторних олив, який полягає у випаровуванні летких компонентів з оливи та визначення їх кількості. Даний метод є досить нетиповим у порівнянні з іншими, адже він може виступати у ролі самостійного аналізу, або у комбінації з іншим методом, наприклад, інфрачервона спектроскопія. Завдяки такій особливості, маємо можливість отримати детальну інформацію про склад моторної оливи.

Завдяки повній інформації про стан моторної оливи можна своєчасно проаналізувати стан моторної оливи, які засоби вона потребує для очищення, при яких умовах варто її зберігати.

Перевагами методу є:

- Точність;
- Висока чутливість;
- Висока швидкість аналізу;
- Можливість залучення для дослідження різних типів моторних олив.

Недоліки методу полягають у тому, що він не дозволяє проаналізувати наявність певних компонентів. Це створює додаткові проблеми, адже для отримання повної інформації про склад оливи знадобиться використання додаткових методів.

Метод кислотного числа [14] являє собою широко використовуваний метод аналізу моторних олив, який базується на дослідженні кількості кислот в оливі. Даний метод дає можливість визначити ступінь зносу деталей двигуна, ступінь забруднення моторної оливи та встановити її відповідність до встановлених норм.

Функцією методу є оцінка кількості кислот, які містяться у моторній оливі. Крім цього, він здатний виявляти відмінності в складі оливи, а також оцінювати ступінь зносу та забруднення оливи.

Перевагою даного методу над іншими є змога проаналізувати кількість кислот низької молекулярної маси. Це є вагомою перевагою, оскільки інші

методи не мають можливості виконати подібний аналіз. Окрім цього, до переваг можна віднести:

- Швидкість аналізу якості моторної оливи;
- Його доступність;
- Простота використання.

Попри всі переваги, він має певні недоліки. На жаль, цей метод не здатний досліджувати конкретні типи кислот, які присутні в самій оливі. Точність також є слабкою стороною методу кислотного числа. На результати вимірювань може вплинути той факт, що олива може містити у своєму складі інші речовини, які у свою чергу, здатні вплинути на хімічну реакцію.

Електричні методи

Кондуктометричним методом дослідження [15] називається одним із електричних методів дослідження моторної оливи, суть якого полягає у вимірюванні електричної провідності оливи. Провідність моторної оливи буде залежати від того, чи присутні в ній певні домішки такі як металеві іони, сірки, води. Працює це наступним чином: чим більше різноманітних домішок знаходиться в оливі, тим вищою буде її провідність.

Кондуктометричний метод використовується для наступних цілей:

1. Контроль якості оливи;
2. Контроль якості оливи під час їх виробництва та зберігання;
3. Виявлення домішок і забруднень в оливі.

Перевагами кондуктометричного методу вимірювання якості моторних олив є:

- Швидкість вимірювання;
- Висока чутливість.

Недоліком даного методу є точність. Результати вимірювань дуже залежать від різноманітних факторів, а саме: на точність результатів може вплинути температура або вплив терміну її використання на провідність оливи.

Метод діелектричної проникності [16] називається електричним методом, який застосовується для визначення вмісту води та інших некласифікованих домішок. На практиці даний метод набув поширення у сервісних центрах для контролю якості та стану оливи.

Основна ідея полягає у тому, що моторна олива має певну діелектричну проникність, тобто здатність пропускати електричний заряд. На діелектричні властивості мають вплив як різного роду домішки, так і вода. Наявність різних компонентів у зразку можуть впливати на загальну діелектричну проникність моторної оливи.

Метод діелектричної проникності виконує функції:

1. Оцінка якості оливи;
2. Контроль зносу моторної оливи;
3. Визначення вмісту некласифікованих домішок та води.

До переваг даного методу відносять:

- Швидкий спосіб вимірювання;
- Висока чутливість до незначних змін діелектричної проникності, що дозволяє виявити невеликі забруднення оливи;
- Низька ціна.

Попри всі позитивні моменти діелектричного методу, він також має достатньо негативних, зокрема:

- Нездатність до виявлення твердих часток та нерозчинних домішок;
- Необхідність корекції результатів вимірювань через чутливість методу до температурних змін.

- Неточність результатів у тих випадках, якщо моторна олива містить речовини зі схожими діелектричними властивостями, які не можуть бути виявлені цим методом.

Висновки до розділу 1

У даному розділі було показано основні характеристики та показники якості моторних олив. Розглянуто сучасні оптичні (рефрактометричний, флуоресцентний аналіз, інфрачервона Фур'є спектроскопія, поверхневий плазмонний резонанс), хімічні (хроматографічний, летких речовин, кислотне число) та електричні (кондуктометричний, діелектричної проникності) методи дослідження характеристик моторних олив.

Проаналізовано переваги і недоліки існуючих методів та обрано рефрактометричний метод для проектування приладу, який не потребує коштовного обладнання, а також дозволяє здійснювати розрізнення типів моторних олив за таким параметром як показник заломлення.

РОЗДІЛ 2 ВИБІР МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Рефрактометричний метод

Для дослідження типів моторних олив існує чимало методів. Серед багатьох методів більше уваги привертають саме оптичні. Оптичні методи є багатофункціональними. Вони мають високу чутливість, достатньо швидкі та прості у використанні. Але серед усіх представлених оптичних методів найбільш широко використовуваний для дослідження оптичних параметрів досліджуваних рідин є рефрактометричний.

Даний метод базується на вимірюванні показника заломлення оливи. Суть методу полягає у наступному: рефрактометр містить призму, на поверхню якої наноситься зразок оливи. Світло, яке пройшло через зразок оливи, заломлюється під певним кутом. Кут заломлення світла залежить від показника заломлення оливи.

Для вимірювання показника заломлення моторної оливи застосовують рефрактометри зі спеціальною шкалою, яка дозволяє визначити показник заломлення на певній довжині хвилі випромінювання видимого діапазону. Результати вимірювань можна використовувати для визначення в'язкості моторної оливи, що є одним із важливих показників для оцінки її якості, а також придатності для використання в двигуні.

Слід зазначити, що рефрактометричний метод має деякі обмеження, оскільки показник заломлення рідини залежить не тільки від її складу та концентрації, але й від температури та тиску. Тому для точного вимірювання показника заломлення моторної оливи необхідно враховувати ці фактори та коригувати результати вимірювань.

Рефрактометричний метод має достатньо переваг. Серед них можна виділити швидкість та точність. Рефрактометр дає можливість достатньо швидко провести вимірювання протягом декількох секунд, що значно економить час у порівнянні з іншими методами. Також варто звернути увагу, що він не потребує великого об'єму зразка. Для проведення аналізу

достатньо всього декількох крапель моторної оливи. Ще варто виділити такий пункт як низька вартість обладнання. У порівнянні з іншими методами, рефрактометри є досить доступними інструментами. До недоліків можна віднести такі параметри, як:

1. Залежність від температури. Даний метод залежить від температури, адже показник заломлення також залежить від неї;
2. Обмеженість використання. Рефрактометричний метод може бути обмеженим у використанні при дослідженні різних типів рідин, які мають різні властивості та склад;
3. Вплив забруднень. При дослідженні моторної оливи, яка містить різноманітні домішки і компоненти, необхідно застосовувати додаткові методи.

Отже, рефрактометричний метод дослідження моторних олив дає змогу швидко виміряти показник заломлення моторної оливи та здійснити контроль її якості за обраними параметрами.

2.2 Обґрунтування вибору діапазону кутового сканування

Для проведення дослідження було використано 9 зразків моторної оливи різних типів [17]. Серед них були: синтетичні (Motul5w-40, CastrolMagnatec5w-40, GM Genuine5w-30), напівсинтетичні (ELF10w-40, ЛЕОЛ10w-40, Akvilon EXTRA10w-40) та мінеральні (BARS 15w-40, LUX 15w-40, AkvilonClassic 15w-40). Значення критичного кута безпосередньо пов'язане з показником заломлення оливи. Оскільки точне визначення критичного кута вимагає наявності монохроматичного когерентного джерела випромінювання, ним може бути лазер, було вирішено застосувати довжину хвилі відмінну від спектральної лінії D (589,3 нм – жовтий лазер) і перейти на червоний лазер з довжиною хвилі 650 нм, який є комерційно доступним та широко розповсюдженим.

Значення показників заломлення для зразків моторної оливи для спектральної лінії D були виміряні на рефрактометрі RL-3 (рис. 2.1), який має

діапазон вимірювання показника заломлення від 1,3 до 1,7, а абсолютна похибка вимірювань показника заломлення становить $\delta n_D = \pm 2 \cdot 10^{-4}$.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд рефрактометра RL-3

З виміряних значень показників заломлення були розраховані відповідні значення критичних кутів θ_c для призми, розроблюваного рефрактометра, зі скла марки Ф1 з показником заломлення $n_D = 1,6128$ (таблиця 2.1).

Також було враховано дисперсію показника заломлення матеріалу призми, де показник заломлення для довжини хвилі 650 нм становить $n_{650} = 1,6041$. З урахуванням дисперсії показника заломлення моторної оливи були проведені нові розрахунки критичних кутів.

В результаті вимірювань та розрахунків було встановлено діапазон критичних кутів для різних типів моторних оливи: 1,45-1,48.

Таблиця 2.1 - Результати вимірювань та розрахунків параметрів
досліджуваних моторних олив

№ п.п.	Тип МО	Марка МО	n_D	$\theta_c(n_D)$, град.	n_{650}	$\theta_c(n_{650})$, град.
1	синтетична	Motul	1,4645	65,236	1,456506	65,229
2	синтетична	CastrolMagnatec	1,4650	65,279	1,45701	65,272
3	синтетична	GM Genuine	1,4670	65,449	1,458995	65,442
4	напівсинтетична	ELF	1,4705	65,751	1,462488	65,744
5	напівсинтетична	ЛЕОЛ	1,4795	66,542	1,471458	66,536
6	напівсинтетична	Akvilon EXTRA	1,4860	67,132	1,477946	67,125
7	мінеральна	BARS	1,4850	67,037	1,476954	67,034
8	мінеральна	LUX	1,4865	67,174	1,478446	67,171
9	мінеральна	AkvilonClassic	1,4885	67,358	1,480426	67,354

З використанням спеціального програмного забезпечення були побудовані рефрактометричні характеристики повного внутрішнього відбиття для значень показників заломлення досліджуваних зразків моторних олив на краях діапазонів показників заломлення відповідних типів моторних олив для довжини хвилі опромінення 650 нм на межі поділу скло-моторна олива (рисунк 2.2).

З огляду на те, що форма реальної рефрактометричної характеристики в околі критичного кута не має екстремумів і згладжена через неоднорідність межі скло-моторна олива, тому було прийнято рішення виконувати вимірювання не безпосередньо кутового положення критичного кута, а порівнювати моторні оливи за величиною кута відбиття на рівні 0,7 від максимуму інтенсивності відбитого світла. У такому випадку діапазон сканування становив майже 2 кутові градуси від 65,16 до 67,28 градуси.

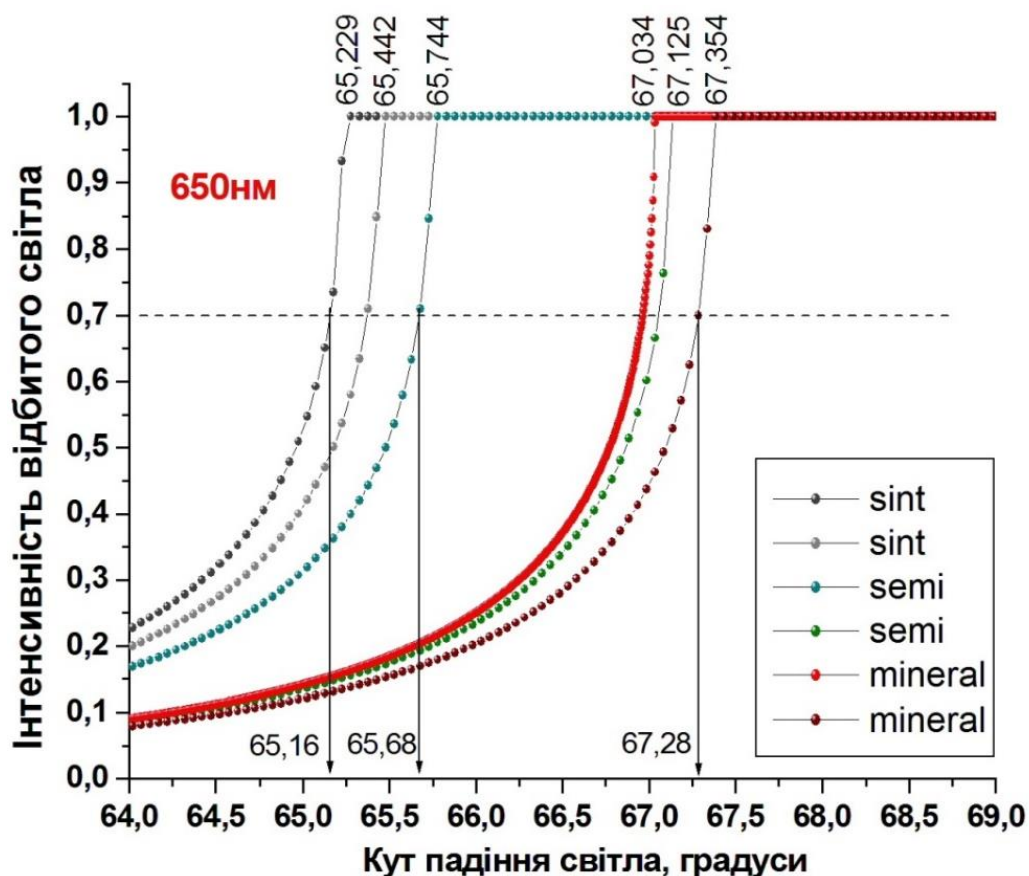


Рисунок 2.2 - Розраховані характеристики відбиття зразків моторної оливи різних типів: синтетичної (sint), напівсинтетичної (semi) та мінеральної (mineral) для довжини хвилі 650 нм

Для можливості калібрування розроблюваного приладу діапазон сканування було попередньо розширено до 7,5 градусів: від 61,25 до 68,75 градуси. В результаті вимірювань та розрахунків було встановлено необхідний діапазон сканування для автоматизованого рефрактометра, а також обрана оптимальна довжина хвилі, а саме 650 нм. Отримані результати дослідження будуть застосовані при розробці відповідного пристрою для визначення типу моторної оливи.

Висновки до розділу 2

У даному розділі було обрано метод для дослідження типу моторної оливи, а саме рефрактометричний. Обґрунтовано доцільність використання даного методу для визначення типу моторної оливи шляхом вимірювання критичного кута. Також було обґрунтовано вибір діапазону кутового сканування та вибір довжини хвилі лазера – 650 нм.

Проведено дослідження 9 зразків моторних олив різних типів, розраховано значення показника заломлення та були розраховані відповідні значення критичних кутів для призми, розроблюваного рефрактометра.

Було встановлено діапазон критичних кутів для різних типів моторних олив та побудовані рефрактометричні характеристики повного внутрішнього відбиття для значень показників заломлення досліджуваних зразків моторних олив на краях діапазонів показників заломлення відповідних типів моторних олив для довжини хвилі опромінення 650 нм на межі поділу скло-моторна олива.

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ

3.1 Розробка схеми електричної функціональної

Для проєктування будь-якого приладу необхідна розробка функціональної схеми. Було обрано необхідні елементи. На рисунку 3.1 зображено функціональну схему приладу.

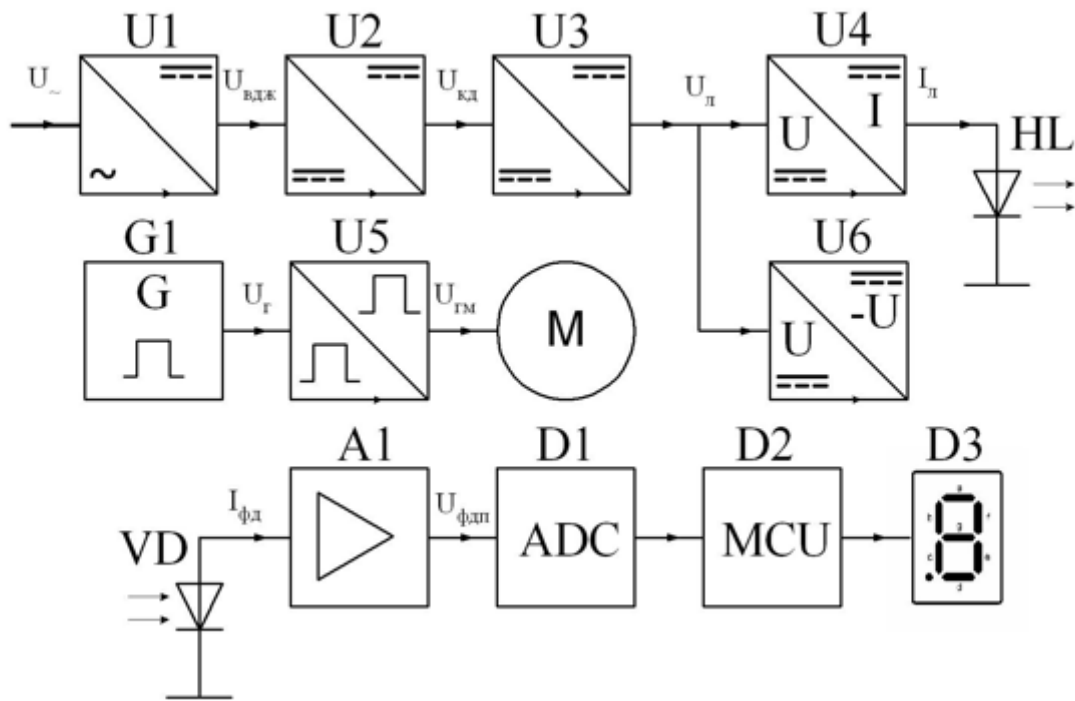


Рисунок 3.1– Електрична функціональна схема приладу

Схема функціональна складається з U1– вторинного джерела живлення, U2 – стабілізатора напруги крокового двигуна, U3 – стабілізатора напруги підсилювачів та лазера, U4 – стабілізатора струму лазера, U5 – формувача імпульсів керування крокового двигуна (драйвер крокового двигуна), U6 – інвертора полярності напруги живлення підсилювачів, бо вони потребують двохполярного живлення, G1 – генератора тактових імпульсів для драйвера крокового двигуна M, що задає швидкість обертання валу, HL – світлодіодного лазера, VD – фотодіоду, що генерує фотострум $I_{фд}$, A1 – трансімпедансного підсилювача (перетворює струм у напругу: $I_{фд} \rightarrow U_{фдп}$), D1 – аналогово-цифровий перетворювач, D2 – мікроконтролера, D3 – цифрового індикаторного пристрою. Схема працює наступним чином. Вторинне

джерело живлення U_1 подає напругу у розмірі 19 В згідно з ТЗ. Стабілізатор напруги крокового двигуна U_2 понижує постійну напругу $U_{вдж}$ до величини робочої напруги $U_{кд}$ крокового двигуна М. Для живлення вузла ARDUINO стабілізатор напруги підсилювачів та лазера U_3 понижує напругу до величини напруги $U_{жп}$. Arduino вміщує одночасно аналого-цифровий перетворювач ADC та мікроконтролер MCU. Трансїмпедансний підсилювач А1 живиться цією напругою. Стабілізатор струму U_4 формує напругу $U_{л}$ живлення лазера HL, а за допомогою драйвера крокового двигуна U_5 стабілізує струм $I_{л}$, що протікає через лазер. Сам драйвер керується від мікроконтролера. Генератор G1 виконує роль подачі прямокутних імпульсів заданої частоти амплітудою $U_{г}$ і живиться від напруги лазера. Світло лазера, яка падає на робочу поверхню фотодіоду VD генерує фотострум $I_{фд}$. Цей фотострум завдяки трансїмпедансному підсилювачу А1 перетворює у пропорційну за амплітудою напругу $U_{фд}$. На аналого-цифровий перетворювач вузла ARDUINO подається вихідна напруга $U_{фд}$. В результаті виконується процес цифрової обробки інформації, яка відображається на цифровому індикаторному пристрої D3.

3.2 Розробка схеми електричної принципової

Електрична принципова схема (рисунок 3.2) розроблюваного приладу складається з 4 окремих вузлів: приймально-передавального, електромеханічного, обчислювального та індикаторного. Елементи, які входять до складу приймально-передавального вузла:

- Стабілізатор напруги крокового двигуна U_2 ;
- Стабілізатор напруги підсилювачів U_3 ;
- Стабілізатор напруги лазера U_4 ;
- Стабілізатор струму лазера U_5 ;
- Інвертор полярності підсилювачів U_6 ;
- Трансїмпедансний підсилювач А1;
- Генератор тактових імпульсів G1.

До складу електромеханічного вузла входять такі елементи функціональної схеми, як кроковий двигун М, драйвер крокового двигуна та кінцеві датчики (верхній та нижній).

Щодо обчислювального вузла, то до нього входять мікроконтролер D21та аналогово-цифровий перетворювач.

Кожен з представлених вузлів виконаний на окремій платі. Для таких елементів схеми, як драйвер крокового двигуна, обчислювальний вузол та індикаторний вузол було обрано готові в межах доступності виробів, зокрема модуль на основі мікросхеми DRV8825, ARDUINO UNO rev3 та цифровий семисегментний чотирьох розрядний індикатор на мікросхемі TM1637, відповідно. Варто зазначити, що кожний модуль схеми має різну напругу живлення: для ARDUINO UNO від +7,5 В до +12 В, а для TM1637 від +5 до +7 В. Водночас струм споживання: ARDUINO не перевищує 24 мА, а модулем TM1637 щонайменше 80 мА.

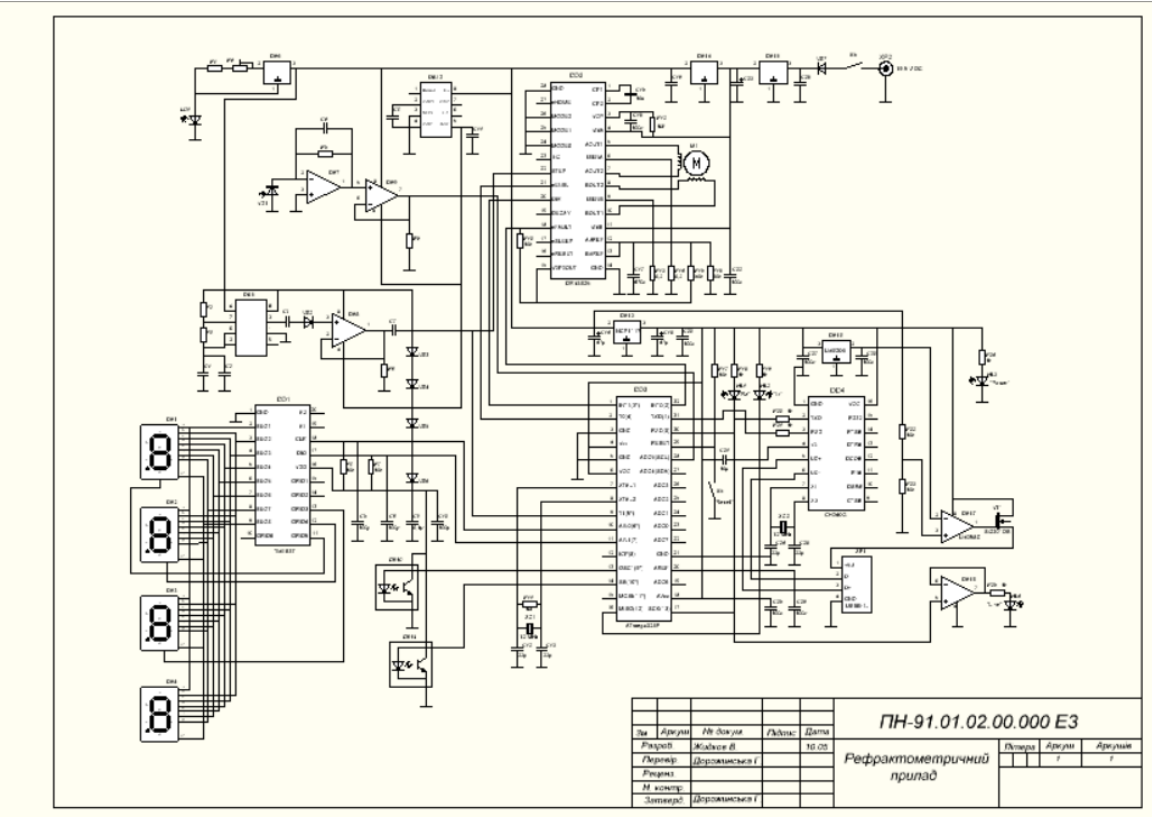


Рисунок 3.2 – Електрична принципова схема приладу

Даний прилад вміщує в собі такі елементи як: стабілізатори напруги та струму лазера, перетворювач полярності, генератор, драйвер крокового двигуна, кроковий двигун, трансімпедансний підсилювач з фотодіодом, плату ARDUINO UNO та цифровий індикаторний пристрій.

Спочатку виконаємо аналіз та опис схем готових модулів DRV8825, ARDUINO UNO rev3 та цифровий семисегментний чотирьохрозрядний індикатор на мікросхемі TM1637, а потім розрахунок та вибір елементної бази елементів приймально-передавального вузла.

3.3 Опис елементів схеми електричної принципової

Модуль ARDUINO

ARDUINO UNO – це модуль [18] на основі мікроконтролера ATmega328. У нашому випадку було обрано модель ARDUINO UNO rev3 (рисунок 3.3), оскільки вона має простий інтерфейс, що дає змогу швидкої роботи з платформою. Дана модель широко популярна для розробки прототипів електронних проектів. Основний принцип роботи цієї плати полягає у тому, що відбувається процес виконання програмного коду, який контролює різні компоненти для взаємодії з реальними об'єктами. До його складу входить: 14 цифрових входів/виходів (6 з яких відповідають якості ШІМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрішнього схемного програмування (ICSP) і кнопки скидання. Для початку роботи з пристроєм достатньо подати напругу живлення від AC/DC-адаптера або батарейки. Також його можливо підключити за допомогою кабелю USB до комп'ютера.

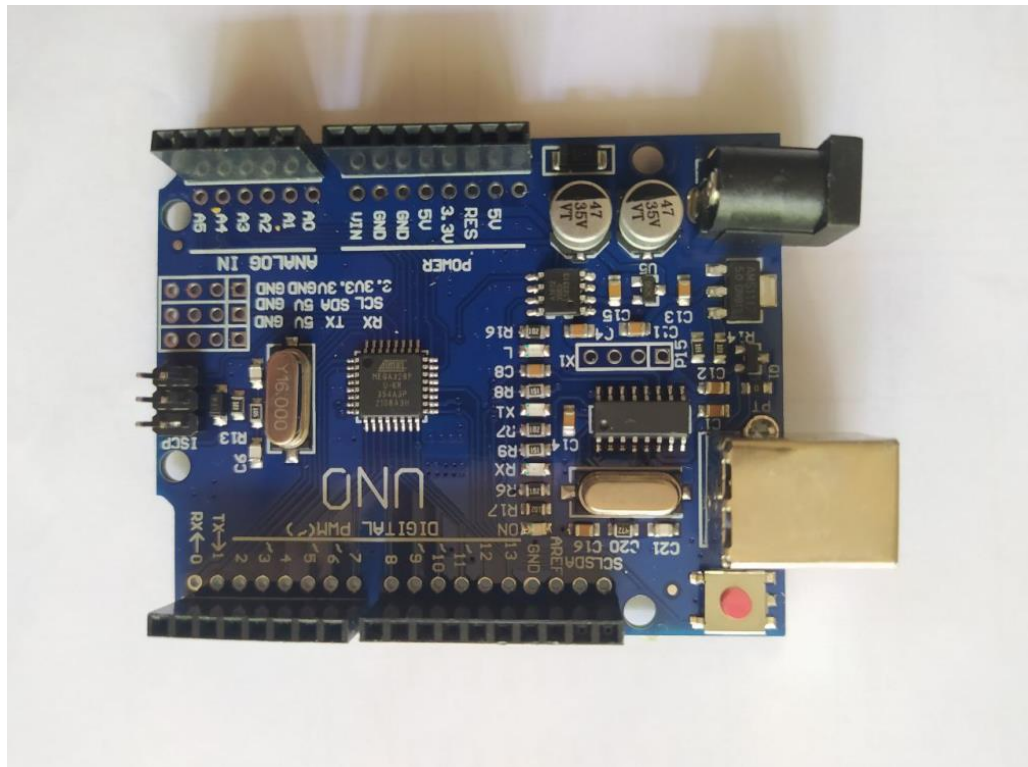


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд плати ARDUINO UNO rev3

Схема електрична принципова модуля наведена на рисунку 3.4.

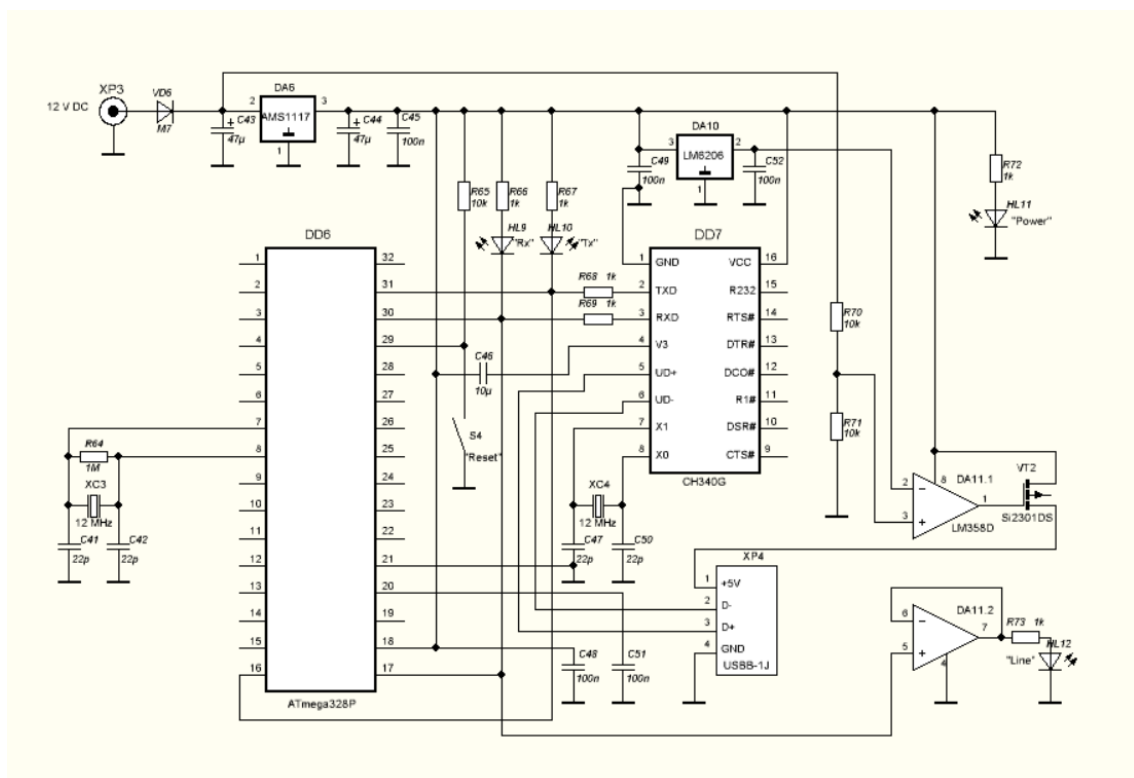


Рисунок 3.4 – Електрична принципова схема вузла ARDUINO UNO

В Таблиці 3.1 наведено основні характеристики цієї плати.

Таблиця 3.1 - Характеристики вузла ARDUINO UNO

Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5В
Напруга живлення	7-12В
Напруга живлення (гранична)	6-20В
Максимальний струм одного висновку	40 мА
Максимальний вихідний струм виведення 3.3V	50 мА
Тактова частота	16 МГц
Аналогові входи	6
Цифрові входи/виходи	14 (з них 6 можуть бути ШІМ-виходами)
Flash-пам'ять	32 КБ (ATmega328) з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем
SRAM	2 КБ (ATmega328)
EEPROM	1 КБ (ATmega328)

Вузол ARDUINO UNO підключається до живлення через його вхід U_{in} , який подає живлення в місце з'єднання діоду VD1, конденсатору C3 та мікросхеми DA1. Тому із загальної схеми електричної принципової можна виключити діод VD1 та роз'єм XP1. Живиться модуль ARDUINO UNO напругою від 7.5 до 12 В. ARDUINO UNO rev3 містить достатню кількість компонентів. Мікроконтролер ATmega328 є важливою складовою плати, оскільки він виконує функцію обчислювання. Він виконує програмний код, керує підключенням компонентів та обмінюється даними із зовнішніми пристроями. USB-порт забезпечує з'єднання з комп'ютером для завантаження програмного коду. Це дає можливість результати вимірювань виводити безпосередньо на комп'ютер. Також не варто забувати про аналогові та цифрові входи та виходи, які здатні підключатись до різних сенсорів та інших зовнішніх пристроїв.

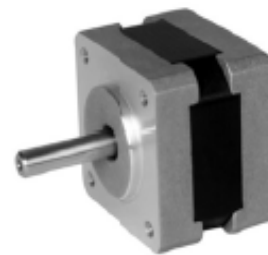
Вибір крокового двигуна

Кроковим двигуном називається синхронний електричний двигун, який використовується для крокового керування рухом об'єкта. Магнітне поле статора визначає збалансовану позицію ротора. При зміні [19] магнітного

поля статора, ротор автоматично встановлюється у відповідну позицію. Принцип роботи базується на використанні електромагнітів. До конструкції крокового двигуна входить ротор і статор. Ротор може обертатися завдяки тому, що він може складатися з магнітів або магнітопроводу. Статор має котушки, які генерують магнітне поле.

Особливість роботи двигуна полягає у наступному: він працює завдяки послідовному включенню і відключенню котушок статора. Магнітне поле притягує до себе ротор внаслідок того, що воно утворюється під час включення котушки. Якщо ж виникає відключення котушки, тоді магнітне поле зникне. Внаслідок цього ротор буде переходити до іншого положення під впливом зовнішнього навантаження. Важливою складовою крокового двигуна є його кутова величина кроку та кількість кроків, які він робить за один оберт. Найбільш розповсюджені двигуни з кроками $1,8^\circ$ та $0,9^\circ$. В якості крокового двигуна було обрано прецизійний двигун PHB35W28-408 з напругою живлення $U_{\text{кд}} = 12 \dots 24 \text{ В}$ і струмом споживання $I_{\text{кд}} = 0,8 \text{ А}$ та кутовою величиною кроку $0,9^\circ$ (Рис.3.5).

Step Angle	0.9°
Step Angle Accuracy	±5% (full step, no load)
Resistance Accuracy	±10%
Inductance Accuracy	±20%
Temperature Rise	80 °C Max.(rated current, 2 phase on)
Ambient Temperature	-20 °C ~ +50 °C
Insulation Resistance	100 MΩ Min., 500VDC
Dielectric Strength	500 VAC for one minute
Shaft Radial Play	0.02 Max. (450 g-load)
Shaft Axial Play	0.08 Max. (450 g-load)



■ Specifications

Model	Current	Resistance	Inductance	Holding Torque	Detent Torque	Rotor Inertia	Bi/Unipolar	Weight	Length
	A/φ	Ω/φ	mH/φ	N.cm	N.cm	g.cm ²	# of Leads	g	mm
PHB35W28-408	0.8	4.5	4.5	9	0.3	12	Bi (4)	130	28

Рисунок 3.5 - Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики обраного крокового двигуна PHB35W28-408\

Цей двигун виконує 400 кроків за один повний оберт валу. Також необхідно враховувати похибку кроку, яка становить $\pm 5\%$, що відповідає $\pm 0,045^\circ$ або 2,7 кут.хв.

Модуль драйвера крокового двигуна

Драйвер на мікросхемі DRV8825 (рисунок 3.6) працює з напругою в діапазоні 8,2–40 В. Необхідно розрахувати співвідношення резисторів R15 та R16 для того, щоб задати струм двигуна.

$$I_{\text{кд}} = U_{\text{REF}} / (5 \cdot R13) \quad (3.1)$$

Подільник R15 та R16 використовуються для зниження напруги з виводу V3P3OUT з 3,3 В до значення U_{REF} . Зазвичай на готових платах драйверів замість резисторів R15 та R16 встановлюються підстроювальний резистор, який можна регулювати для зміни напруги U_{REF} . Резистори R13 та R14 є однаковими, але їх значення можуть відрізнятися в залежності від моделі драйвера.

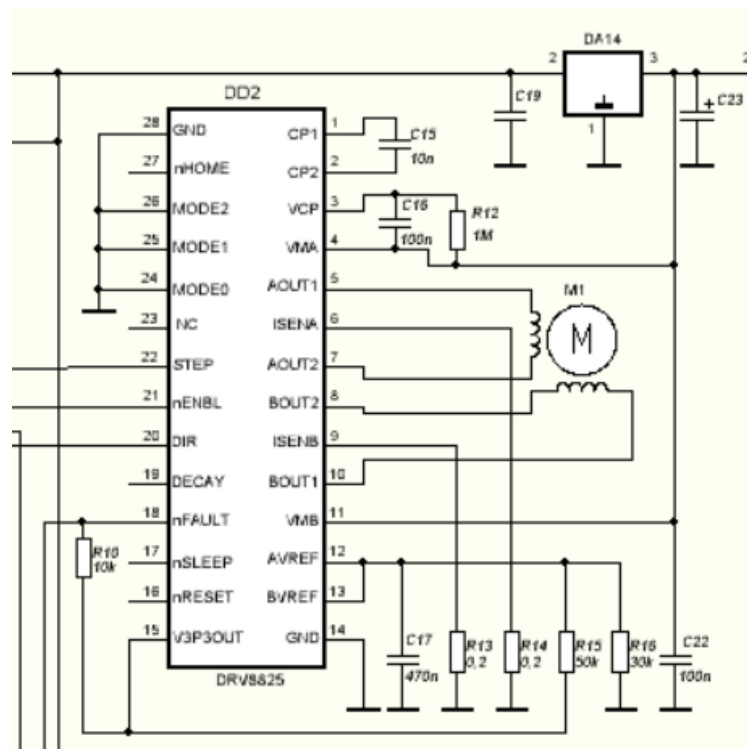


Рисунок 3.6 - Електрична принципова схема драйвера крокового двигуна

Для розрахунку необхідні наступні вихідні дані: струм двигуна $I_{\text{кд}}$, опір резистора шунта R13 та загальний опір резисторів R15 та R16, який еквівалентний опору підстроювального резистора. Наприклад, для драйвера на мікросхемі DRV8825 значення резисторів R13 та R14 становить 0,2 Ом, а опір підстроювального резистора складає 7 кОм. За відомим струмом крокового двигуна обчислюється значення опорів резисторів R15 та R16 відповідно до пропорцій. Спочатку визначається значення U_{REF} , а потім обчислюються опори.

$$U_{\text{REF}} = 0,8 \cdot 5 \cdot 0,2 = 0,8 \text{ В}$$

Подільник знижує напругу з 3,3 В до 0,8 В. Таким чином, розрахуємо опір резистора R16:

$$R16 = (U_{\text{REF}}/3,3) \cdot (R15+R16) \quad (3.2)$$

$$R16 = (0,8/3,3) \cdot 7000 = 1697 \text{ Ом}$$

Найближче менше значення $1,69 \pm 0,017 \text{ кОм}$. Опір R15 дорівнює:

$$R15 = 7000 - 1690 = 5310 \text{ Ом}$$

Найближче менше значення $5,36 \pm 0,054 \text{ кОм}$. Резистори обираємо smd з типорозміром 0805 (2×1,25мм).

Зовнішній вигляд драйвера – на мікросхемі DRV8825 на рисунку 3.7.

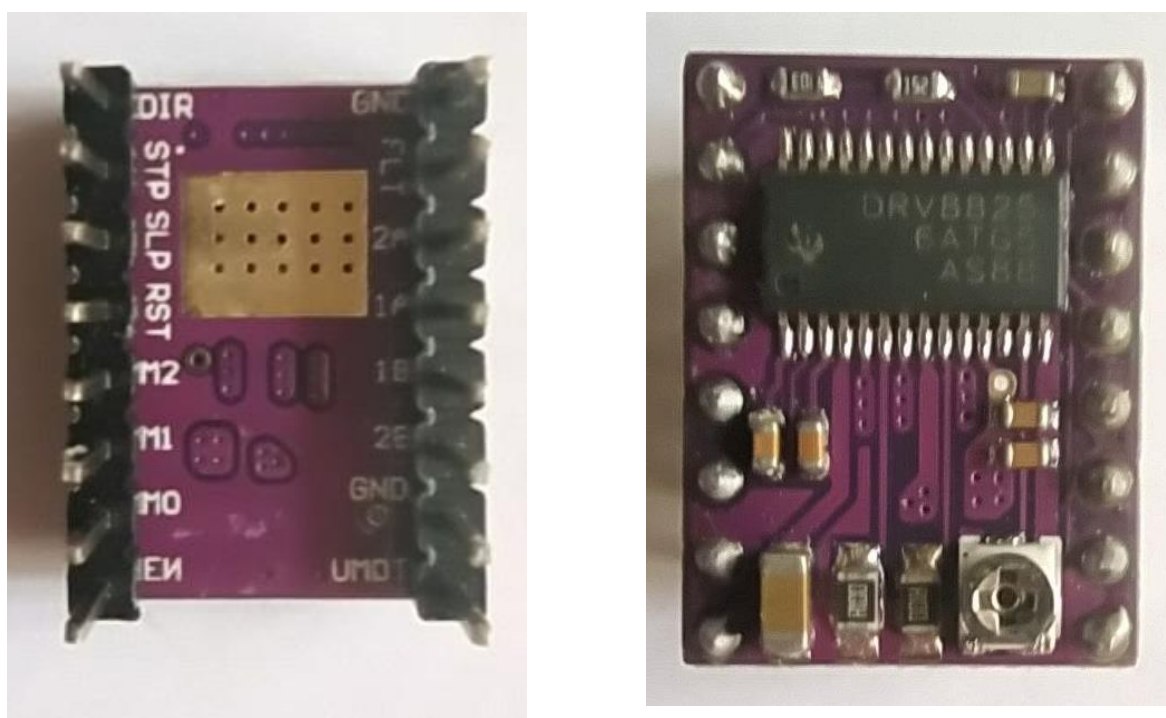


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд драйвера крокового двигуна

Драйвер крокового двигуна DRV8825 побудований на чіпі від TIDRV8825. Даний модуль працює з кроковими двигунами від 8,2 до 40 В та струмом до 1,5А на фазу (до 2,2 А при примусовому повітряному охолодженні), що повністю задовольняє потреби електричної принципової схеми приладу. Основні характеристики модулю наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Характеристики драйвера крокового двигуна DRV8825

Мікросхема драйвера	DRV8825
Робоча напруга живлення	8,2-40 В
Довготривалий робочий струм двигуна	1,2 А
Максимальний струм двигуна	2,2 А
Дроблення кроку	повний крок , півкроку, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 крока.
Максимальна частота кроку	250 кГц
Мінімальна ширина імпульсу	1,9 мкс

Драйвер крокового двигуна представляє собою потужний напівпровідниковий пристрій з вбудованим найпростішим інтерфейсом [20], призначений для керування кроковим двигуном, який забезпечує обробку

вхідних імпульсів напруги. Він працює наступним чином: отримує сигнали від контролера і починає генерувати необхідні сигнали живлення для крокового двигуна. Самі сигнали встановлюють положення та швидкість обертання валу. В якості такого драйверу було обрано модель на мікросхемі DRV8825, оскільки він працює в діапазоні від 8,2 до 40 В. Принцип роботи драйвера полягає у послідовному керуванні фазами обмоток двигуна, адже кроковий двигун складається з набору обмоток, які створюють магнітні поля, через що виникає рух ротору. Сам драйвер керує струмом, який проходить через кожну фазу двигуна. Така особливість дозволяє встановити точний крок, а також напрямок обертання.

Модуль цифрового індикаторного пристрою

Схема електрична принципова модуля цифрового індикаторного пристрою розроблюваного приладу наведена на рисунку 3.8. Індикаторний пристрій складається чотирьох семисегментних світлодіодних індикаторів DA1...DA4, мікросхеми TM1637, підтягуючих резисторів R40 та R41 опорами по 10 кОм і фільтруючих керамічних конденсаторів C36 і C37 ємністю по 100 пФ на шинах передачі даних DIO та синхроімпульсів CLK. Також паралельно до виводу живлення мікросхеми підключені фільтруючі конденсатори: C38 та C39 ємністю 0,1 мкФ та 100 мкФ.

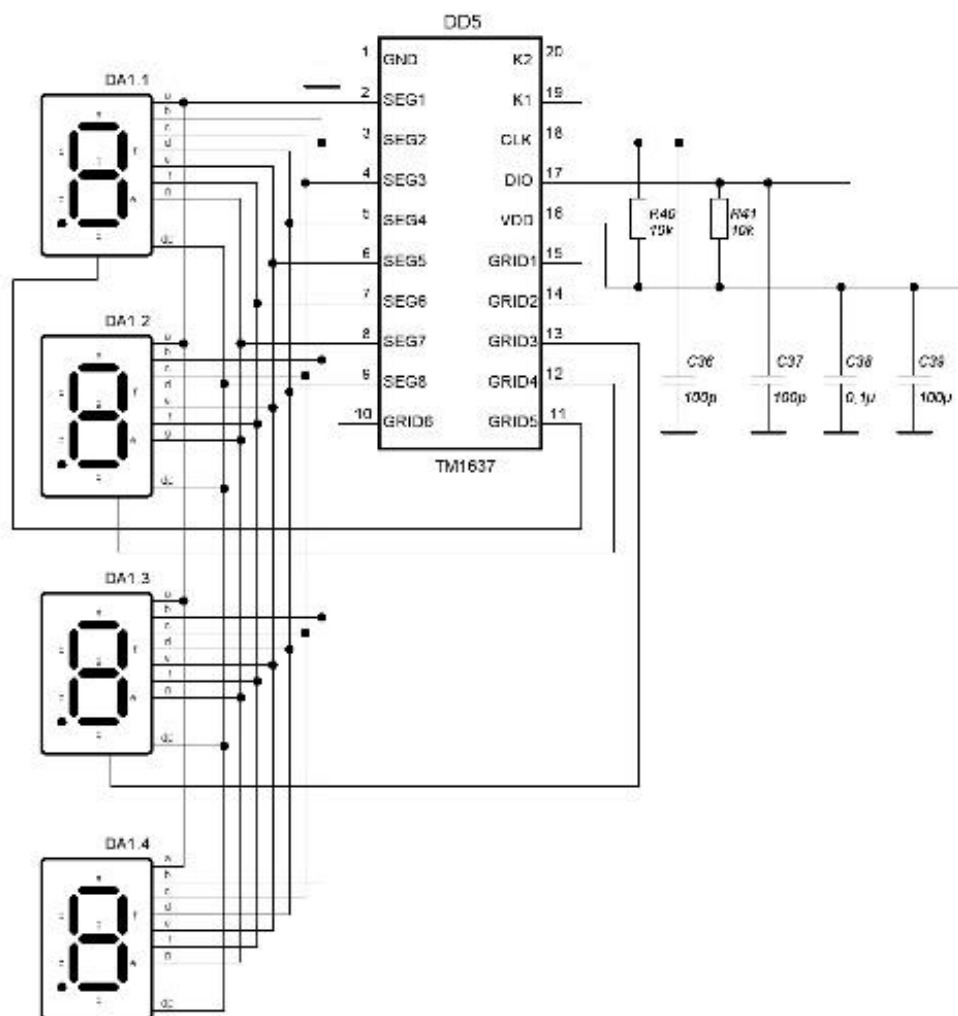


Рисунок 3.8 – Схема електрична принципова модуля цифрового індикаторного пристрою на мікросхемі TM1637

Передача даних від мікроконтролера ATmega328 модуля ARDUINO UNO здійснюється за допомогою протоколу I²C. Зовнішній вигляд модуля показано на рисунку 3.9.

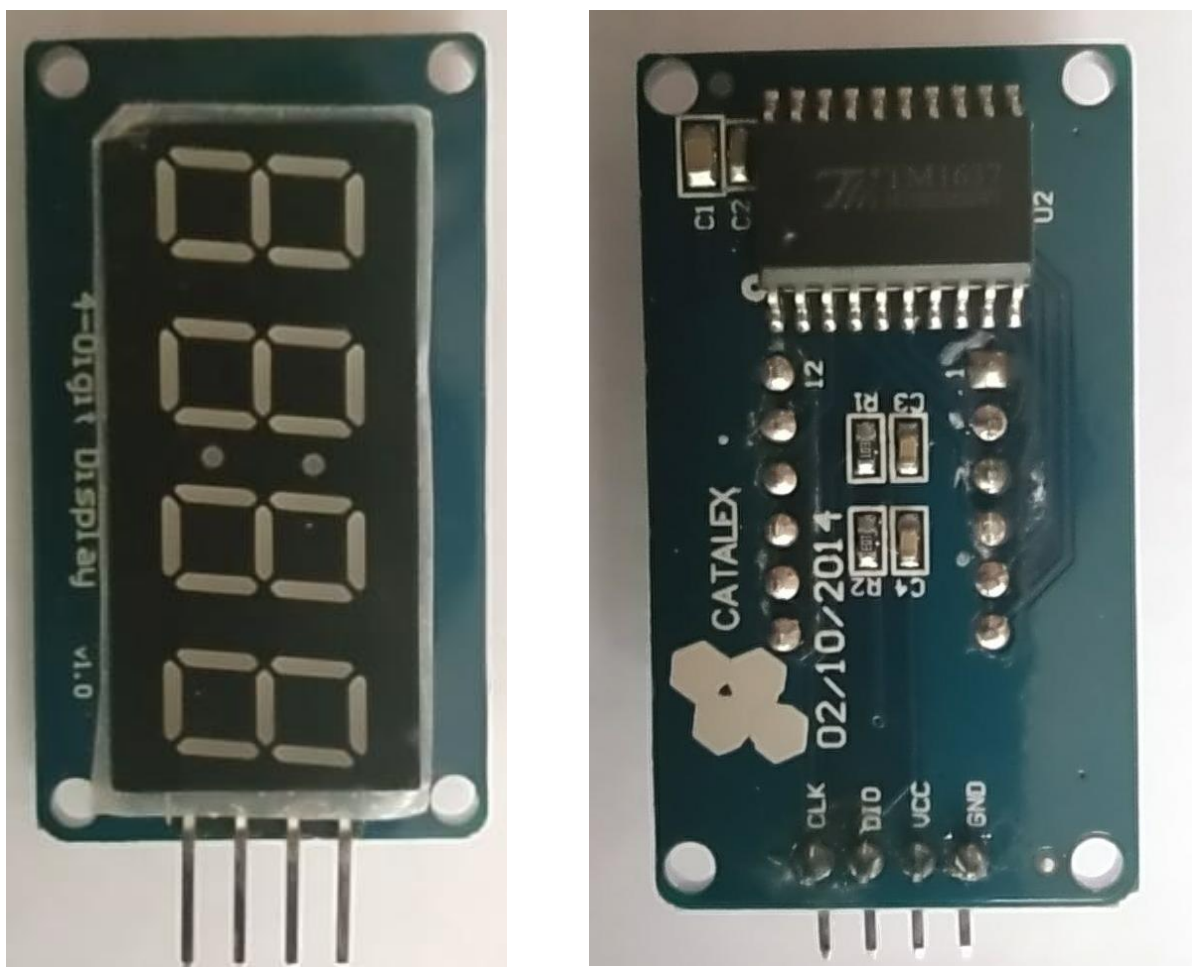


Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд модуля цифрового індикаторного пристрою на мікросхемі TM1637.

Сегменти використовуються для відображення чисел. Кожній цифрі відповідає своя комбінація сегментів. Для прикладу, цифрі 0 буде відповідати лише сегмент “А”, а для цифри 1 вже буде відповідати сегмент “В” і т.д.

Стабілізатор струму лазера

Стабілізатор струму лазера є компонентом [21], який призначений для забезпечення сталого значення струму, які живлять лазер. Головним завданням стабілізатору є забезпечення стабільної роботи лазера і запобігання впливу змін входної напруги або струму на його продуктивність та якість випромінювання.

Принцип роботи полягає у наступному: стабілізатор використовує систему замкненого зворотного зв'язку. Така система призначена для

вимірювання вихідного струму або напруги лазера і порівнює його із заданими значеннями. Завдяки такому порівнянню стабілізатор контролює потік електроенергії, що живить лазер для забезпечення сталого вихідного значення струму або напруги.

З переваг даного виду стабілізатора можна виділити наступне:

- Стабілізатор забезпечує постійне значення струму та напруги. Це дозволяє забезпечити стабільність інтенсивності випромінювання лазера;
- Захист лазера від перенапруги та перевантаження за напругою і струмом. Також варто зазначити, що даний стабілізатор має захист від теплового перевантаження, захист від короткого замикання.

Електрична принципова схема включення стабілізатора напруги в режимі стабілізатора струму наведена на рисунку 3.10. Для вибору номіналів компонентів стабілізатора струму лазера, а також самого стабілізатора, враховуємо тип лазера і його режим роботи з постійним струмом. Для лазера з довжиною хвилі 650 нм працює при робочому струмі $I_L = 70$ мА, при цьому напруга на лазері складає 2,55 В. Для стабілізації струму лазера можна використовувати на мікросхемі DA6 стабілізатор напруги LM217LD13TR у встановленому режимі стабілізації струму. Максимальний допустимий вихідний струм цієї мікросхеми складає 200 мА.

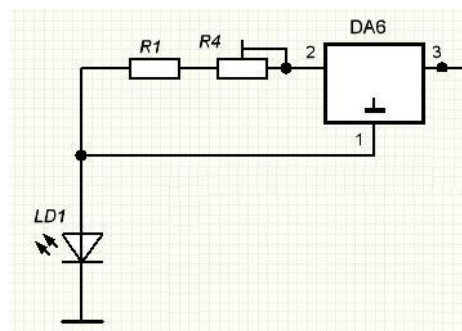


Рисунок 3.10 - Електрична принципова схема стабілізатора струму лазера

Вихідна напруга цієї мікросхеми становить $1,25 \pm 0,05$ В, а струм споживання не перевищує 0,1 мА та рівний струму виводу налаштування мікросхеми LM217LD13TR, а саме I_{adj} . Струм лазера визначається сумою опорів R1 та R4 (рисунок.3.10).

$$I_{cd} = (U_{st}/R_{\Sigma}) + I_{adj}, \quad (3.3)$$

де, I_{cd} – стабілізований струм світлодіода, А;

U_{st} – вихідна напруга мікросхеми LM217LD13TR, В;

R_{Σ} – сумарний обмежуючий опір, Ом, $R_{\Sigma} = R1 + R4$;

I_{adj} – струм виводу налаштування мікросхеми LM217LD13TR.

Максимальний струм лазера визначається резистором R1, тоді як резистор R4 дозволяє регулювати струм лазера в певних межах. Для розрахунку опору резистора R1 для максимального струму лазера 0,07 А при опорі R4 = 0, то можна використати формулу:

$$R_{\Sigma} = R1 = U_{st} / I_{cd} \quad (3.4)$$

$$R_{\Sigma} = 1,25/0,07 = 17,86 \text{ Ом}$$

Потужність, яку розсіює резистор R1 розраховується, як $P1 = R1 \cdot I_{cd}^2 = 90$ мВт. Мінімальний струм лазера буде значно менший за максимальний, а саме 0,07 А. У цьому випадку, сумарний опір буде дорівнювати:

$$R_{\Sigma} = R1 + R4 = U_{st} / I_{cd\min} \quad (3.5)$$

$$R_{\Sigma} = 1,25/0,007 = 178,6 \text{ Ом}$$

Опір резистора R4 обчислюється наступним чином:

$$R4 = R_{\Sigma} - R1 \quad (3.6)$$

$$R4 = 178,6 - 17,86 = 160,7 \text{ Ом}$$

Розсіяна потужність становить $P4 = R4 \cdot I_{\text{сдмін}}^2 = 8 \text{ мВт}$. При виборі номіналів опорів округлюємо у більшу сторону. У такому випадку для резистора R1 опір становить $18 \pm 0,18 \text{ Ом}$ smd резистора типорозміром 0805 ($2 \times 1,25 \text{ мм}$) і номінальною потужністю до 125 мВт, $R4 = 200 \text{ Ом}$ потужністю 0,25 Вт.

В якості такого стабілізатору було обрано мікросхему LM217LD13TR фірми STMicroelectronics (рисунок 3.11) є інтегральні схеми в корпусах SO-8, які призначені для використання їх в якості позитивних стабілізаторів напруги.

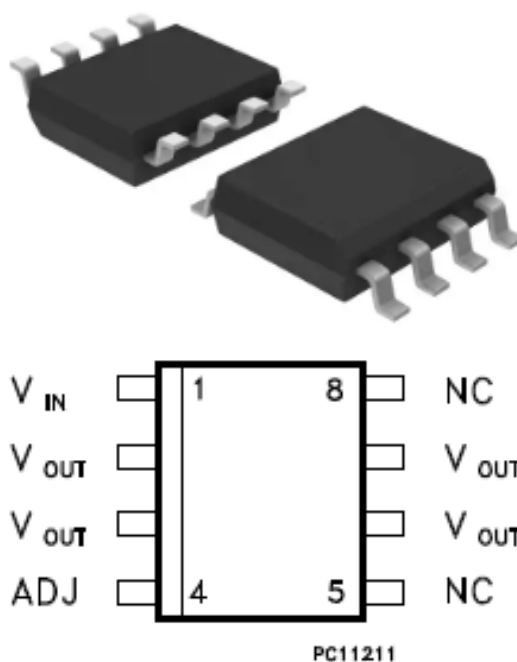


Рисунок 3.11 - Зовнішній вигляд та положення виводів мікросхеми LM217LD13TR

Основні характеристики стабілізатора наведені в Таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Основні характеристики стабілізатора

(Refer to the test circuits, $T_J = -40$ to 125°C , $V_I - V_O = 5\text{ V}$, $I_O = 40\text{ mA}$, unless otherwise specified)

Table 4. Electrical characteristics of LM217L

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
ΔV_O	Line regulation	$V_I - V_O = 3$ to 40 V , $I_O = 20\text{ mA}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.01	0.02	%V
				0.02	0.05	
ΔV_O	Load regulation	$V_O \leq 5\text{ V}$, $I_O = 5$ to 100 mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$	5	15	mV
				20	50	
		$V_O \geq 5\text{ V}$, $I_O = 5$ to 100 mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$	0.1	0.3	%
				0.3	1	
I_{ADJ}	Adjustment pin current			50	100	μA
ΔI_{ADJ}	Adjustment pin current	$V_I - V_O = 3$ to 40 V , $I_O = 5$ to 100 mA $P_d < 625\text{ mW}$		0.2	5	μA
V_{REF}	Reference voltage	$V_I - V_O = 3$ to 40 V , $I_O = 10$ to 100 mA $P_d < 625\text{ mW}$	1.2	1.25	1.3	V
$\Delta V_O/V_O$	Output voltage temperature stability			0.7		%
$I_{O(min)}$	Minimum load current	$V_I - V_O = 40\text{ V}$		3.5	5	mA
$I_{O(max)}$	Maximum output current	$V_I - V_O = 3$ to 13 V	100	200		mA
		$V_I - V_O = 40\text{ V}$		50		
eN	Output noise voltage	$B = 10\text{ Hz}$ to 10 KHz , $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003		%
SVR	Supply voltage rejection ⁽¹⁾	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $f = 120\text{ Hz}$	$C_{ADJ} = 0$	65		dB
			$C_{ADJ} = 10\text{ }\mu\text{F}$	66	80	

1. C_{ADJ} is connected between adjust pin and ground.

Напруга на вході мікросхеми LM217LD13TR дорівнює:

$$U_{st} = U_{\text{лазер}} + U_{st} + U_{\text{drop}} \quad (3.7)$$

$$U_{st} = 2,55 + 1,25 + 3 = 6,8\text{ V}$$

Напруга живлення двигуна має відповідати стандартним напругам існуючих стабілізаторів з ряду: 2,7;3,3;5;5,2;6;8;9;10;12;15;18;24. Крім того стабілізатор має витримувати робочий струм двигуна з подвійним запасом. При виборі стабілізатора напруги враховують падіння напруги U_{drop} на ньому на рівні щонайменше 1,7 В, обирають із запасом напругу $U_{\text{кд}} = U_{\text{вдж}} - U_{\text{drop}} - U_{\text{запас}}$, величина $U_{\text{запас}} = 0,3 \dots 1\text{ V}$. Тому обираємо найближчу напругу 8 В.

Стабілізатор напруги підсилювачів, ARDUINO та лазера

Стабілізатор напруги підсилювачів є компонентом [22], призначений для забезпечення сталої вихідної напруги. Цей процес не залежить від коливань вхідної напруги або навантаження. Не дивлячись на те, що дані пристрої позиціонують себе як фіксовані стабілізатори, їх також можна використовувати із зовнішніми компонентами для отримання регульованої напруги чи струму. Було обрано мікросхему L7808C (рисунок 3.12, таблиця 3.4.) з номінальною вихідною стабілізованою напругою $U_{st} = 8 \pm 0,16$ В.

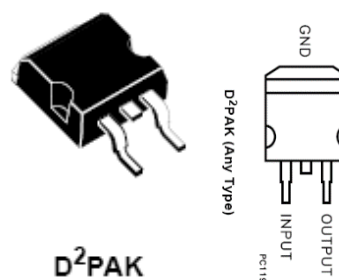


Рисунок 3.12 - Зовнішній вигляд та положення виводів мікросхеми L7808C в корпусі D²PAK

Таблиця 3.4 - Основні характеристики стабілізатора підсилювачів

Table 15: Electrical Characteristics Of L7808C (refer to the test circuits, $T_J = 0$ to 125°C , $V_I = 14\text{V}$, $I_O = 500$ mA, $C_I = 0.33$ μF , $C_O = 0.1$ μF unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	7.7	8	8.3	V
V_O	Output Voltage	$I_O = 5$ mA to 1 A $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 10.5$ to 25 V	7.6	8	8.4	V
$\Delta V_O(^*)$	Line Regulation	$V_I = 10.5$ to 25 V $T_J = 25^\circ\text{C}$			160	mV
		$V_I = 11$ to 17 V $T_J = 25^\circ\text{C}$			80	
$\Delta V_O(^*)$	Load Regulation	$I_O = 5$ mA to 1.5 A $T_J = 25^\circ\text{C}$			160	mV
		$I_O = 250$ to 750 mA $T_J = 25^\circ\text{C}$			80	
I_d	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			8	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_O = 5$ mA to 1 A			0.5	mA
		$V_I = 10.5$ to 25 V			1	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5$ mA		-0.8		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$		52		$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 11.5$ to 21.5 V $f = 120\text{Hz}$	56			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_O = 1$ A $T_J = 25^\circ\text{C}$		2		V
R_O	Output Resistance	$f = 1$ KHz		16		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_I = 35$ V $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.45		A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2		A

(*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Дана мікросхема споживає струм 8 мА, а максимальний струм навантаження 1,5 А. Падіння напруги на мікросхемі L7808С залежить від струму навантаження, який у нашому випадку складається з суми струмів лазера (70 мА), підсилювачів (≈ 10 мА), генератора (≈ 15 мА), модулів індикатора (≈ 80 мА) та ARDUINO (≈ 24 мА) і становить 200 мА. При цьому падіння напруги становить $U_{\text{drop}} = 1,6$ В. Тому напруга на вході цієї мікросхеми повинна бути більша за $U_{\text{in}} > U_{\text{drop}} + U_{\text{st}} = 1,6 + 8 = 9,6$ В.

Принцип роботи полягає у використанні зворотного зв'язку, в якому вихідна напруга порівнюється з опорною напругою. За умови, якщо вихідна напруга змінюється, то стабілізатор починає коригувати її. Така особливість можлива завдяки використанню операційного підсилювача і зворотного зв'язку через резистори. Коефіцієнт згладжування пульсацій вхідної напруги повинен бути щонайменше 56 дБ.

Стабілізатор напруги крокового двигуна

Стабілізатор крокового двигуна застосовують [23] для підтримки сталого рівня напруги живлення крокового двигуна. Завданням такого стабілізатора є забезпечення стабільної та точної роботи крокового двигуна.

Діапазон напруги живлення обраного крокового двигуна становить від 12 В до 24 В, а робочий струм – 0,8 А. Отже, необхідно обрати напругу живлення між крайніми значеннями, оскільки при мінімальній напрузі двигун може працювати нестабільно, пропускаючи кроки, а при максимальній буде перегріватись. Напруга живлення двигуна має відповідати стандартним напругам існуючих стабілізаторів, які мають значення 12,15,18 та 24 В. Тому краще обрати напругу 15 В, оскільки напруга живлення приладу відповідно до ТЗ становить 19 В і необхідно врахувати запас мінімум 2 В. Стабілізатор повинен мати достатній запас для сумарного струму двигуна (0,8 А) та інших навантажень (0,2 А) з запасом. Для цього було обрано мікросхему L7815С (Рисунок.3.13), яка має вихідну напругу $15 \pm$

0,3 В. Мікросхема споживає струм в розмірі 8 мА (Таблиця 3.5.), а максимальний струм навантаження становить 1 А.

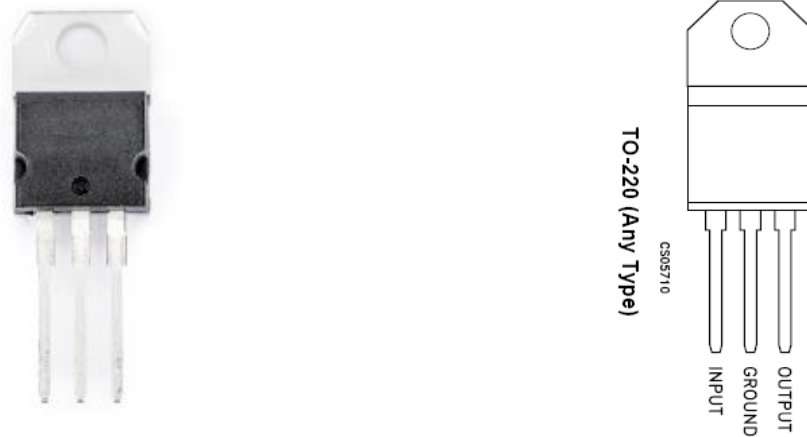


Рисунок 3.13 - Зовнішній вигляд та положення виводів мікросхеми L7815C в корпусі TO-220

Таблиця 3.5 – Основні характеристики стабілізатора напруги L7815C

Table 20: Electrical Characteristics Of L7815C (refer to the test circuits, $T_J = 0$ to 125°C , $V_I = 23\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\text{ }\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\text{ }\mu\text{F}$ unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	14.5	15	15.6	V
V_O	Output Voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 17.5\text{ to }30\text{ V}$	14.25	15	15.75	V
$\Delta V_O(^*)$	Line Regulation	$V_I = 17.5\text{ to }30\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			300	mV
		$V_I = 20\text{ to }26\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			150	
$\Delta V_O(^*)$	Load Regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			300	mV
		$I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			150	
I_d	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			8	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
		$V_I = 17.5\text{ to }30\text{ V}$			1	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5\text{ mA}$		-1		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	$B = 10\text{Hz to }100\text{KHz}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		90		$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 18.5\text{ to }28.5\text{ V}$ $f = 120\text{Hz}$	54			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_O = 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		2		V
R_O	Output Resistance	$f = 1\text{ KHz}$		19		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_I = 35\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.23		A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2		A

(*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Падіння напруги на мікросхемі залежить від струму навантаження. У нашому випадку, при струмі навантаження 1 А, падіння напруги $U_{\text{drop}} = 2\text{ V}$.

Тому вхідна напруга цієї мікросхеми має бути $U_{in} > U_{drop} + U_{st} = 2 + 15 = 17$ В, що відповідає ТЗ, оскільки вхідна напруга становить $U_{in} = 19$ В. Коефіцієнт згладжування пульсацій становить 53 дБ.

Обидва розглянуті стабілізатори з'єднані послідовно (рисунок 3.14.).

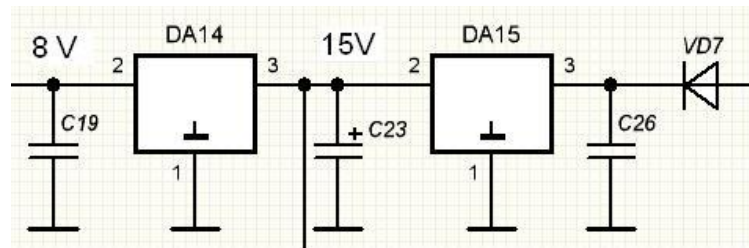


Рисунок 3.14 – Схема електрична принципова включення стабілізаторів напруги L7808C (DA14) та L7815C (DA15)

Потужність, яку розсіюють мікросхеми в такому режимі роботи обчислюються за формулою:

$$P = (U_{in} - U_{st}) \cdot I \quad (3.8)$$

Для мікросхеми стабілізатора L7808C:

$$P = (15 - 8) \cdot 0,2 = 1,4 \text{ Вт.}$$

Для мікросхеми стабілізатора L7815C:

$$P = (19 - 15) \cdot 1 = 4 \text{ Вт}$$

Оскільки для мікросхеми L7815C розсіювана потужність перевищує 2 Вт, то її слід встановлювати на радіатор для збільшення відводу від неї тепла. Серія мікросхем L78 можуть надати локальну стабілізацію, усуваючи проблеми розподілу, які пов'язані з одноточковим регулюванням. Кожний такий тип містить внутрішнє обмеження струму, термовідключення та надійний захист. Вони можуть надавати вихідний струм понад 1,5 А при достатньому тепловідведенні. Струм, який споживає мікросхема становить 8 мА, а максимальний струм навантаження для цієї мікросхеми 1,5 А.

Генератор для драйвера крокового двигуна

Генератор для драйвера крокового двигуна [24] представляє собою компонент, який встановлює послідовність керуючих сигналів для крокового

двигуна. Головним завданням для нього є виконання алгоритмів або вхідних команд, які визначають швидкість, напрямок руху та кількість кроків, які мусить зробити двигун.

Принцип роботи генератора якраз полягає у виконанні вхідних команд. Подача вхідних команд свідчить про те, як буде рухатись кроковий двигун. Після цього генератор провидить обчислення необхідної послідовності кроків. Згенерована послідовність сигналів подається на драйвер двигуна, який виконує їх керування кроковими моторами. Варіант реалізації генератора прямокутних імпульсів на базі мікросхеми NE555 у вигляді окремого модуля наведено на рисунку 3.15.



Рисунок 3.15 - Генератор прямокутних імпульсів на мікросхемі NE555

Даний модуль генерує послідовність прямокутних імпульсів, які подаються на кроковий двигун і визначаються RC-ланцюгом, який дозволяє використовувати його на мікроконтролерах для налаштування параметрів вихідних імпульсів. На мікросхемі генератора розміщений світлодіодним індикатором червоного кольору. При малій вихідній частоті цей індикатор блимає. Основні характеристики даного модуля наведені в Таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Основні характеристики генераторного модуля

Форма імпульсів	прямокутна
Діапазон регулювання частоти	1 Гц – 200 кГц
Напруга живлення	5-15 В
Вихідний струм	35мА
Робоча температура	0...+70°C
Регулювання шпаруватості	50-100%
Типорозмір	31×22×14 мм

У нашому випадку вона не є окремим модулем, а виконана у складі приймально-передавального вузла. Сама мікросхема складається з частотно-задаючими ланками, випрямляючого діоду та операційного підсилювача в режимі повторювача. Схема електрична принципова наведена на рисунку 3.12.

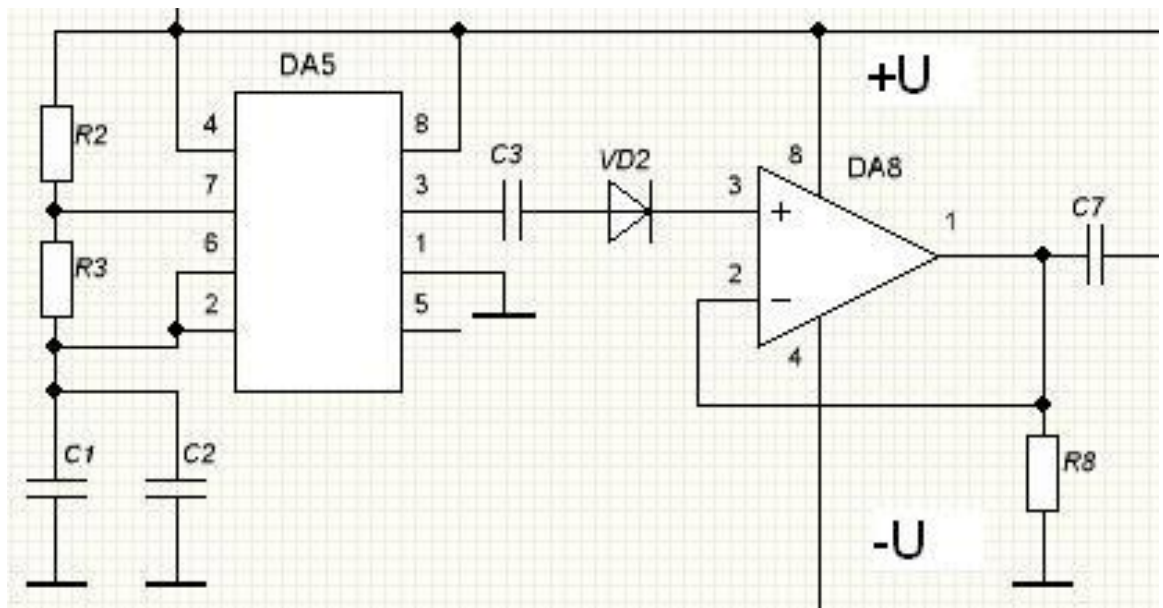


Рисунок 3.16 - Електрична принципова схема генератора для драйвера крокового двигуна

Мікросхема NE555 живиться від напруги 5-15 В. У нашому випадку вона живиться напругою 8 В. Період прямокутного сигналу T обчислюється за формулою:

$$T=0,693 \cdot (R2+2 \cdot R3) \cdot C \quad (3.9)$$

Тривалість імпульсу дорівнює:

$$t_H = 0,693 \cdot (R_2 + R_3) \cdot C \quad (3.10)$$

Тривалість паузи становить:

$$t_L = 0,693 \cdot R_3 \cdot C \quad (3.11)$$

Загальна тривалість періоду T складається з тривалості імпульсу t_H та тривалості паузи t_L , тобто $T = t_H + t_L$. Ємність конденсатора може бути вибрана з діапазону 0,001-100 мкФ, а резистори повинні мати опір не менше 1 кОм (за рекомендацією виробника мікросхеми). У нашому випадку мікросхема живиться від стабілізатора напруги лазерного діоду. Якщо сигнал має шпаринність 2 (тип сигналу меандр), то тривалість імпульсу t_H приблизно дорівнює тривалості паузи t_L . У такому випадку виконується умова $R_2 < R_3$.

Частота прямокутного сигналу $F = 1/T$ визначається потрібною кількістю імпульсів за секунду. Наприклад, якщо потрібно, щоб кроковий двигун здійснював один оберт валу за секунду і має крок повороту $0,9^\circ$ (400 кроків на оберт), то на нього треба подавати імпульси з частотою 400 імпульсів на секунду, що відповідає частоті 400 Гц. Кожен імпульс повертає вал на один крок. За відомою частотою можна розрахувати період прямокутного сигналу T , який у нашому випадку дорівнює 2,5 мс.

Пауза між імпульсами становить t_L встановлюється на рівні 0,001 с, а тривалість імпульсу t_H дорівнює 0,0015 с. Тоді за формулою $R_3 \cdot C = 0,001443$ с. При прийнятій ємності $C = 1$ мкФ, опір R_3 становить 1443 Ом. Обираємо опір з наявних номіналів найближчий значенню: $R_3 = 1,47 \pm 0,0147$ кОм smd резистора типорозміром 0805 (2×1,25 мм).

Розрахований за формулою для t_H опір R_2 становить 694,5 Ом. Знову обираємо опір з наявних номіналів найближчий значенню: $R_2 = 681 \pm 6,8$ Ом smd резистор типорозміром 0805 (2×1,25 мм).

Для корегування ємності конденсатора C_3 а формулою для T : $C = 1,68 \text{ мкФ}$. Обираємо ємність з наявних номіналів найближчу значенню: $C_1 = 680 \pm 34 \text{ нФ}$ та $C_2 = 1 \pm 0,1 \text{ мкФ}$. Ці конденсатори з'єднанні паралельно типу smd типорозмірами 0805 ($2 \times 1,25 \text{ мм}$).

Мікросхема генератор NE555 наведена на рисунку 3.17.

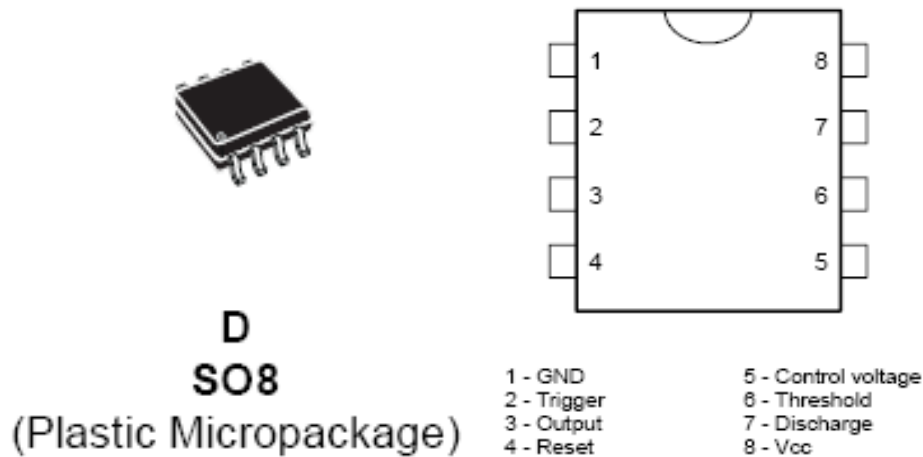


Рисунок 3.17 - Зовнішній вигляд та положення виводів мікросхеми

NE555D в корпусі SO-8

Конденсатор C_3 обирається таким чином, щоб його опір на частоті F був менше 10 Ом , а саме $39,8 \text{ мкФ}$. Причому $C_7 = C_3$. Обираємо ємність з наявних номіналів, найближчу та найбільшу: $C_3 = 47 \pm 9 \text{ мкФ}$ конденсатор smd на напругу $6,3 \text{ В}$ типорозмірами 0805 ($2 \times 1,25 \text{ мм}$).

Трансїмпедансний підсилювач та фотодіод

ТІП представляє собою інвертуючий операційний підсилювач FR[25], що має на своєму вході джерело струму. Джерелом струму такого підсилювача у нашому випадку є фотодіод VD1. Фотодіод у трансїмпедансному підсилювачі виконує роль перетворювача світлового сигналу на електричний. Принцип його роботи полягає у використанні фотоефекту. Трансїмпедансний підсилювач перетворює струмовий сигнал фотодіода у сигнал вихідної напруги. На рисунку 3.18 зображено трансїмпедансний підсилювач з фотодіодом.

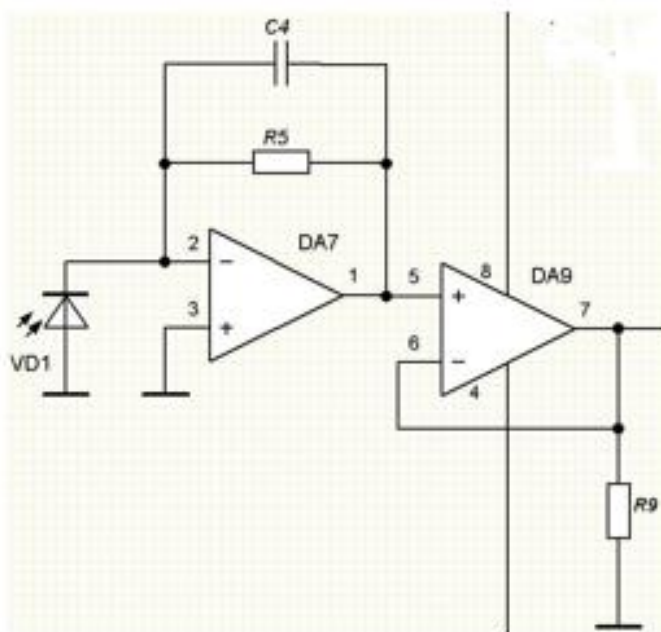


Рисунок 3.18 - Схема електрична принципова трансімпедансного підсилювача приладу

Для розрахунку трансімпедансного підсилювача на мікросхемі DA7 потрібно визначитися з використанням фотодіоду VD1. В якості фотодіоду для трансімпедансного підсилювача було обрано модель BPW-34 (Рисунок 3.19). Він є високошвидкісним і високочутливим фотодіодом в плоскій пластиковій упаковці. Завдяки прозорій епоксидній смолі пристрій чутливий до видимого та інфрачервоного випромінювання. Велика активна площа у поєднанні з плоским корпусом дає високу чутливість при широкому куті огляду.

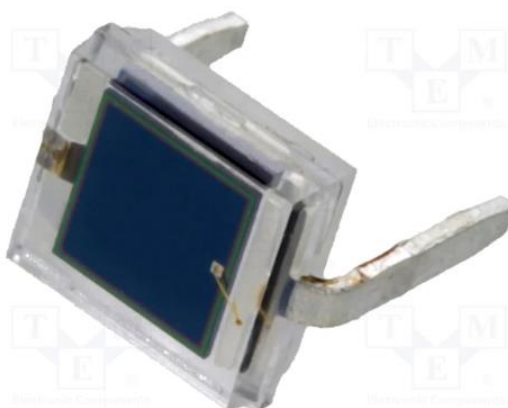


Рисунок 3.19 - Зовнішній вигляд фотодіоду BPW-34

Спектральний діапазон фотодіоду становить 350...820 нм, а максимальна зворотна напруга дорівнює 60 В, що є більша за напругу живлення приладу. Максимальна чутливість фотодіоду досягається на довжині хвилі 950 нм (Рисунок 3.20.).

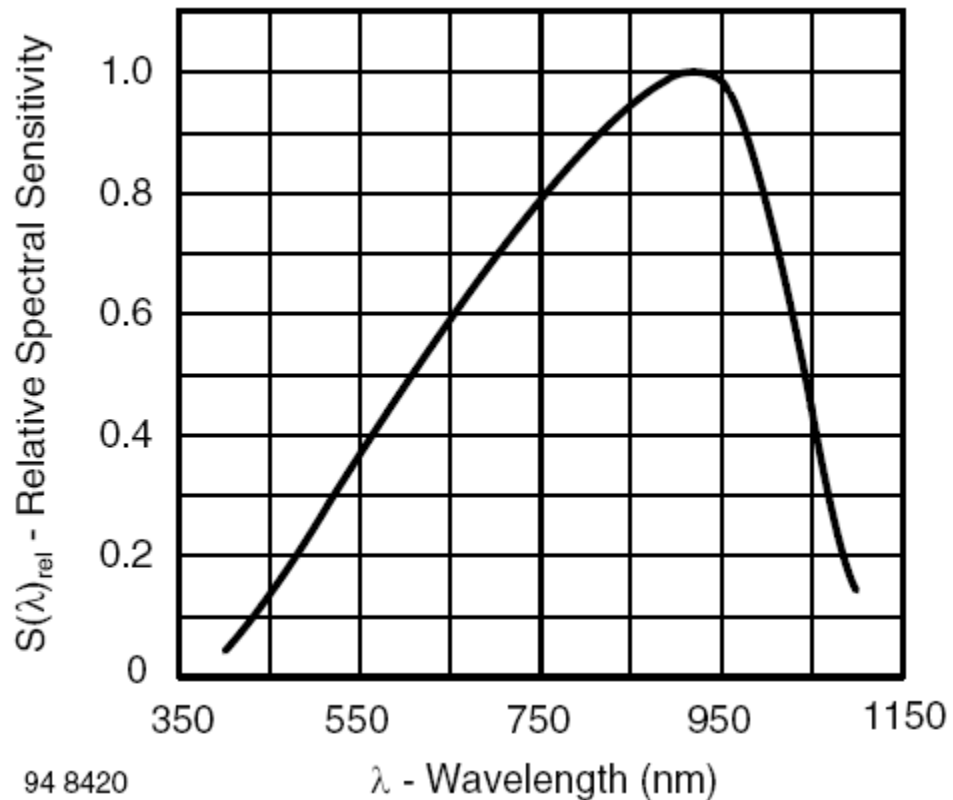


Рисунок 3.20 - Відносна спектральна чутливість фотодіоду BPW-34

За умови, що освітленість становить 1 мВт/см^2 , то напруга холостого ходу буде 350 мВ для 950 нм. Струм короткого замикання при такій освітленості становить 47 мкА. Фотострум становить 50 мкА для довжини хвилі 950 нм при 1 мВт/см^2 . При довжині хвилі 650 нм чутливість складає 0,6 від максимуму, тому фотострум менший, а саме 30 мкА. Основні характеристики наведені у Таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Основні характеристики фотодіода

 $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Breakdown Voltage	$I_R = 100 \mu\text{A}, E = 0$	$V_{(BR)}$	60			V
Reverse Dark Current	$V_R = 10 \text{ V}, E = 0$	I_{ro}		2	30	nA
Diode Capacitance	$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}, E = 0$	C_D		70		pF
	$V_R = 3 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}, E = 0$	C_D		25	40	pF
Open Circuit Voltage	$E_e = 1 \text{ mW/cm}^2, \lambda = 950 \text{ nm}$	V_o		350		mV
Temp. Coefficient of V_o	$E_e = 1 \text{ mW/cm}^2, \lambda = 950 \text{ nm}$	TK_{V_o}		-2.6		mV/K
Short Circuit Current	$E_A = 1 \text{ klx}$	I_k		70		μA
	$E_e = 1 \text{ mW/cm}^2, \lambda = 950 \text{ nm}$	I_k		47		μA
Temp. Coefficient of I_k	$E_e = 1 \text{ mW/cm}^2, \lambda = 950 \text{ nm}$	TK_{I_k}		0.1		%/K
Reverse Light Current	$E_A = 1 \text{ klx}, V_R = 5 \text{ V}$	I_{ra}		75		μA
	$E_e = 1 \text{ mW/cm}^2, \lambda = 950 \text{ nm}, V_R = 5 \text{ V}$	I_{ra}	40	50		μA
Angle of Half Sensitivity		φ		± 65		deg
Wavelength of Peak Sensitivity		λ_p		900		nm
Range of Spectral Bandwidth		$\lambda_{0.5}$		600...1050		nm
Noise Equivalent Power	$V_R = 10 \text{ V}, \lambda = 950 \text{ nm}$	NEP		4×10^{-14}		W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Rise Time	$V_R = 10 \text{ V}, R_L = 1 \text{ k } \Omega, \lambda = 820 \text{ nm}$	t_r		100		ns
Fall Time	$V_R = 10 \text{ V}, R_L = 1 \text{ k } \Omega, \lambda = 820 \text{ nm}$	t_f		100		ns

Будемо вважати, що на виході DA7 має бути максимальна напруга 5 В при максимальному значенні освітленості фотодіода. Напруга на виході підсилювача залежить від добутку фотоструму на опорі резистора зворотного зв'язку R5. Конденсатор C4 застосовується для фільтрації шумів і забезпечення стабільної роботи підсилювача. Бажано використовувати опір резистора зворотного зв'язку не менше 1 кОм. Опір резистора R9 повинен бути значно більший за опір резистора R5, краще на порядок. Операційний підсилювач DA7 не повинен шунтувати струм фотодіода, тому вхідний струм DA7 повинен бути значно менший за мінімальний струм фотодіода. Нехай мінімальний фотострум буде на два порядки менший, наприклад, 300 нА, тоді вхідний струм DA7 повинен бути меншим за 30 нА. Для розрахунку опору резистора зворотного зв'язку за максимальним значенням фотоструму використовуємо формулу:

$$R5 = U_{\text{фд}} / I_{\text{фд}} \quad (3.12)$$

$$R5 = 5 / (30 \cdot 10^{-6}) = 166,7 \text{ кОм}$$

Обираємо резистор з опором $165 \pm 1,6$ кОм, типорозмір 0805 ($2 \times 1,25$ мм). Резистор R9 буде мати опір $1 \pm 0,01$ МОм того ж типорозміру. Конденсатор з ємністю $10 \pm 0,5$ пФ smd на напругу 50 В типорозмір 0805 ($2 \times 1,25$ мм). Для підсилювача можна використати двохканальну мікросхему LM358 (Рисунок 3.21) з наступними характеристиками:

1. Вхідний струм $I_{вх} = 5 \dots 45$ нА;
2. Наруга живлення $U_{ж} = \pm 2,5 \dots \pm 15$;
3. Коефіцієнт підсилення за напругою $K_u = 100$ дБ;
4. Струм споживання загальний $I_{сп} = 3 \cdot 2 = 6$ мА (по 3 мА канал);
5. Максимальна амплітуда вихідної напруги $U_{вих} = U_{ж} - 1,5 = 8 - 1,5 = 6,5$ В;
6. Максимальна амплітуда вхідної напруги $U_{вх} = U_{ж} - 2,5 = 8 - 2,5 = 5,5$ В.

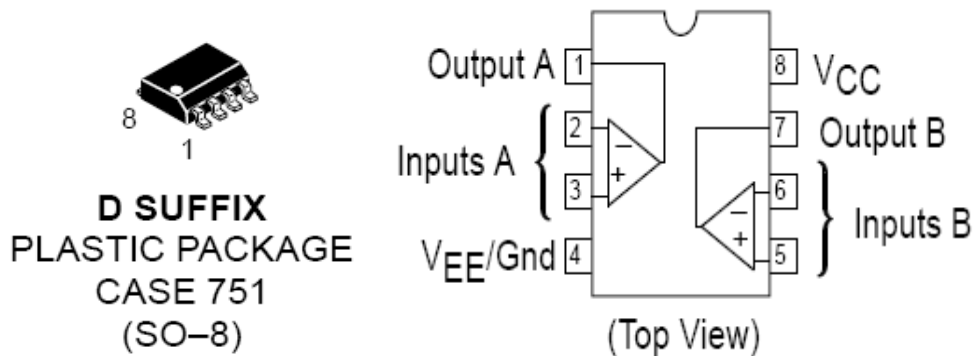


Рисунок 3.21 - Зовнішній вигляд та положення виводів мікросхеми LM358 в корпусі SO-8.

Підсилювач виконано в корпусі типу SO-8. Підсилювач-повторювач генератора DA8 можна обрати таку ж мікросхему.

3.4 Розрахунок споживаної потужності приладом

Визначають загальну споживану приладом потужність як добуток сумарного струму на напругу живлення, та порівнюють отримане значення з вказаним у технічному завданні. Розраховані струми, що протікають через елементи схеми наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Характеристики елементів схеми електричної

Позначення	Номинал, тип	Тип корпусу	Напруга, В	Струм, мА	Потужність, мВт	Допустима Р, мВт
R1	18 Ом	0805	1,26	70	88	125
R2	681 Ом	0805	-	-	-	125
R3	1,47 кОм	0805	-	-	-	125
R4	200 Ом		1,25	5,7	7,2	250
R5	165 кОм	0805	4,6	0,046	0,2	125
R8	100 кОм	0805	-	-	-	125
R9	1МОм	0805	5	0,005	0,025	125
VD2	1N4148WS	SOD-323	-	-	-	350
VD3...VD6	1N4001G	SOD57	0,75	120	90	1000
VD7	B230A	SMA	0,5	1130	565	1250
DA5	N555D	SO-8	8	15	120	
DA6	LM217LD13TR	SO-8	4,2	70	294	
DA7...DA9	LM358	SO-8	16	12	192	
DA12	ICL7660A	SOIC	8	12	96	20 мА
DA14	L7808C	D ² PAK	7	200	1400	2000
DA15	L7815C	TO-220	4,5	1000	4500	10000
C1	680 нФ	0805	8			50 В
C2	1 мкФ	0805	8			50 В
C3, C7	47 мкФ	0805	5			6,3 В
C4	10 пФ	0805	4,6			50 В
C6, C11	10 мкФ (10%)	0805	8			50 В
C19	0,15 мкФ (10%)	1206	19,5			35 В
C23	100 мкФ (10%)	Size D	15			25 В
C26	0,47 мкФ (10%)	Size A	8			25 В

В таблиці наведені крім протікаючи через елементи схеми струмів також розсіювані ними потужності, а також допустимі потужності та напруги відповідно до документацій на відповідні компоненти. Зображення схеми електричної принципової з напрямом і значеннями протікаючи струмів наведено на рисунку 3.22. Струм кінцевих вимикачів DA10 та DA11 наведено максимальний 20 мА, оскільки номінальний становить 13 мА. Також на схемі показані додаткові елементи діоди VD3...VD6, призначені для зменшення напруги живлення індикаторного пристрою та кінцевих вимикачів з 8В до 5В за рахунок падіння напруги на діодах при номінальному струмі споживання.

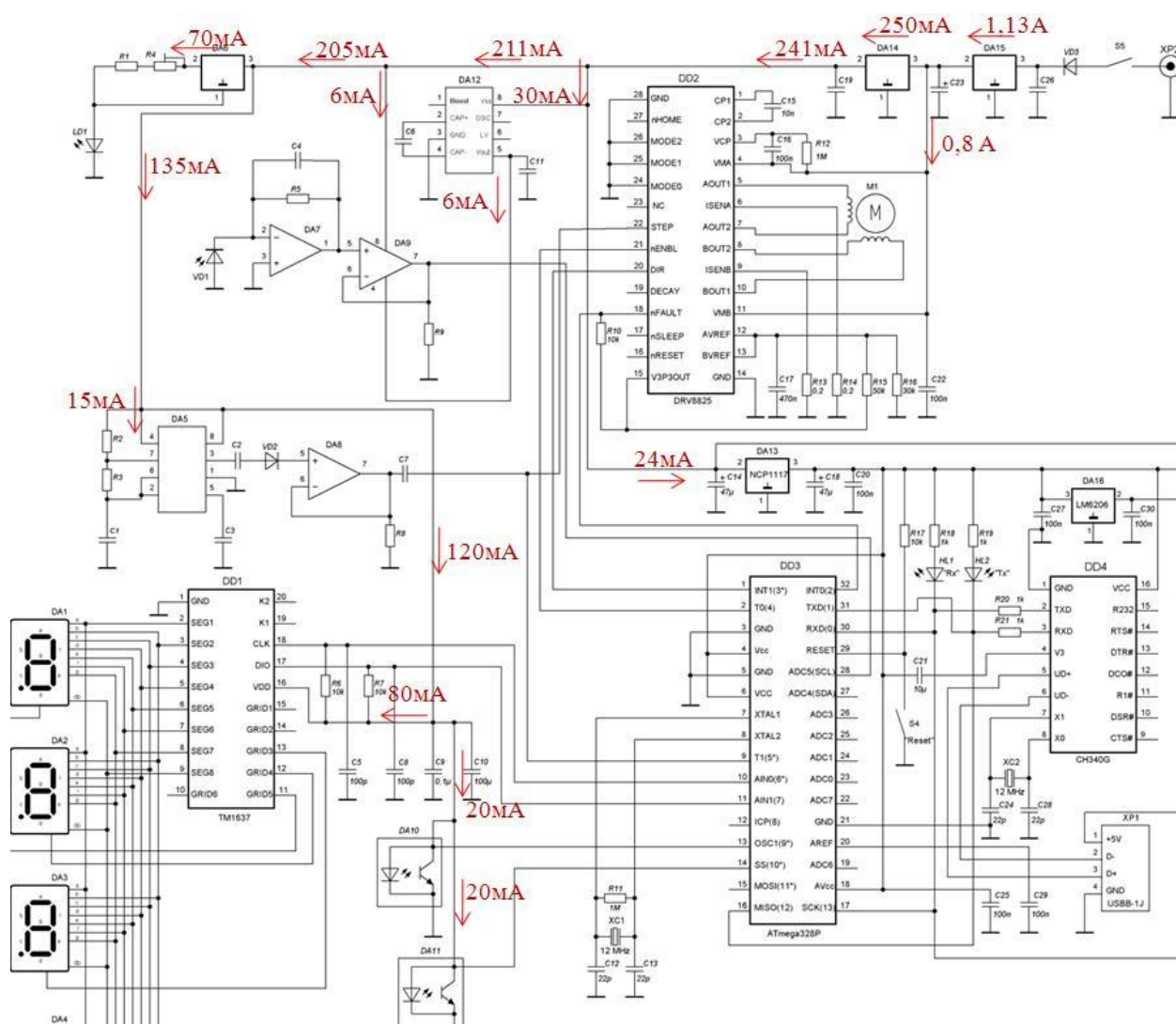


Рисунок 3.22 – Протікаючі струми на схемі електричній принциповій

Сумарний струм становить 1,13 А, що при напрузі живлення у 19 В визначає споживану потужність приладом у 22 Вт, що задовольняє ТЗ, оскільки менше за 30 Вт.

Висновки до розділу 3

У даному розділі було розроблено функціональну схему приладу, до складу якої входить: стабілізатор струму лазера, трансїмпедансний підсилювач, та фотодіод ARDUINO UNO, стабілізатор напруги підсилювачів, ARDUINO та лазера, цифровий індикатор пристрою, кроковий двигун, драйвер крокового двигуна, генератор та стабілізатор напруги крокового двигуна. Проведено детальний опис цих елементів. Розроблено схему електричну принципову та виконано її розрахунок. Проведено розрахунок споживаної потужності приладу.

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

4.1 Розрахунок похибки струму лазера

Похибка вимірювання кута визначається як сума похибок кроку двигуна та оптичної системи позиціонування. Це означає, що враховуються похибки пов'язані з кінцевими вимикачами, драйвером і коефіцієнтом перетворення механічного вузла. Останній визначається як співвідношення зміни кута падіння лазерного променя на межі скло-олива до зміни кута повороту валу крокового двигуна, що призводить до відповідної зміни кута падіння.

Розглянемо ці фактори створення похибок по черзі: спочатку для визначення інтенсивності світла, а потім для визначення кута. Розрахуємо відповідні невизначеності. Невизначеність знаходять за формулою:

$$U = \pm x_i / \sqrt{\alpha_i}, \quad (4.1)$$

де α_i – коефіцієнт прийнятого закону розподілу для симетричних границь відносної похибки $\pm x_i$.

При відсутності інформації про закон розподілу вхідної величини невизначеність знаходять при $\alpha_i=3$.

Для визначення похибки струму лазера – абсолютної ΔI_L та відносної δI_L , а також відповідної невизначеності U_{I_L} використаємо табличні дані параметрів мікросхеми LM217LD13TR, яка виконує функцію стабілізатора струму.

Оскільки опорна напруга мікросхеми змінюється в межах $\pm 0,05$ В і має середнє значення 1,25 В, то розрахуємо абсолютну похибку за формулою:

$$\Delta I_L = \frac{U_{оп} + \Delta U_{оп}}{R_{об} - \Delta R_{об}} - \frac{U_{оп}}{R_{об}}, \quad (4.2)$$

де $U_{оп}$ – опорна напруга мікросхеми LM317, $U_{оп} = 1,25$ В;

$\Delta U_{оп}$ – абсолютна похибка опорної напруги, $\Delta U_{оп} = 0,05$ В;

$R_{об}$ – опір обмежувального резистора, $R_{об} = 18 \text{ Ом}$ для номінального струму лазера 70 мА ;

$\Delta R_{об}$ – абсолютна похибка опору обмежувального резистора, $\Delta R_{об} = 0,18 \text{ Ом}$ для резистора з допуском 1% .

$$\Delta I_{л} = \frac{1,25 + 0,05}{18 - 0,18} - \frac{1,25}{18} = \frac{1,3}{17,82} - 0,0694 = 3,6 \text{ мА}.$$

Відносна похибка при цьому дорівнює:

$$\delta I_{л} = (\Delta I_{л} / I_{л0}) \cdot 100\% = 5,14\%.$$

При цьому невизначеність струму лазера рівна $U_{I_{л}} = 0,0297$. Тому, $I_{л} = 70 \pm 3,6 \text{ мА}$.

4.2 Розрахунок похибки трансїмпедансного підсилювача

У зв'язку з тим, що на вході ТПІ струм фотодіода пропорційний інтенсивності випромінювання, то можна стверджувати, що відносна похибка фотоструму пропорційна інтенсивності випромінювання лазера дорівнює $\delta I_{фд} = \delta I_{л} = 5,14\%$. Невизначеність струму фотодіода також рівна $U_{I_{фд}} = 0,0297$.

Розрахуємо абсолютну похибку фотоструму на виході фотодіода при струмі лазера 70 мА та величиною фотоструму 30 мкА :

$$\Delta I_{фд} = \frac{\delta I_{фд} \cdot I_{фд}}{100\%} = \frac{5,14 \cdot 30}{100\%} = 1,54 \text{ мкА}.$$

Тому, $I_{фд} = 30 \pm 1,54 \text{ мкА}$. Визначимо абсолютну похибку напруги на виході трансїмпедансного підсилювача:

$$\begin{aligned}
\Delta U_{\text{ТП}} &= (I_{\text{фд}} + \Delta I_{\text{фд}})(R_{33} + \Delta R_{33}) - U_{\text{ТП}} = \\
&= ((30 + 1,54) \cdot 10^{-6}) \cdot (169000 + 1690) - 5 = \\
&= ((31,54) \cdot 10^{-6}) \cdot (170690) - 5 = 384 \text{ мВ}.
\end{aligned}$$

Відносна похибка складає $\delta U_{\text{ТП}} = (\Delta U_{\text{ТП}} / U_{\text{ТП}}) \cdot 100\% = 7,68\%$, а невизначеність $U_{U_{\text{ТП}}} = 0,0443$. Тому, $U_{\text{ТП}} = 5 \pm 0,384 \text{ В}$.

4.3 Розрахунок похибки для аналогово-цифрового перетворювача

ARDUINO UNO має мікроконтролер ATmega328P, який використовує 10-бітний аналого-цифровий перетворювач, що відповідає 1024 градаціям вихідного коду. Виробники мікроконтролерів ATmega328P нормують загальну похибку перетворення АЦП, яка включає інтегральну та диференціальну нелінійність, похибку квантування, похибку коефіцієнта перетворення та похибку зміщення нуля. Загальна похибка АЦП складається з двох компонентів: похибки квантування $\gamma_{\text{кв}}$ та нелінійності $\gamma_{\text{нл}}$, які зазвичай мають приблизно однакові значення. Відносні величини цих похибок можна приблизно обчислити за такими формулами:

$$\gamma_{\text{нл}} = \gamma_{\text{кв}} = \frac{1}{2^n} \cdot 100\% = \frac{1}{1024} \cdot 100\% = 0,1\%$$

де n – розрядність перетворювача.

$$\gamma_{\text{кв}} = \gamma_{\text{нл}}$$

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \gamma_{\text{кв}} + \gamma_{\text{нл}} = 0,2\%;$$

$$U_{\gamma_{\text{АЦП}}} = \frac{0,002}{\sqrt{3}} = 0,0012$$

Якщо врахувати, що похибка аналогово-цифрового перетворювача є величиною молодшого розряду, то для десятирозрядного АЦП похибка квантування та похибка нелінійності перетворення будуть однаковими і становитимуть 4,88 мВ. Тому напруга на виході АЦП буде 4606,24 мВ. У такому випадку абсолютна похибка вихідної величини АЦП складатиме:

$$\Delta U_{\text{ЦП}} = 5000 - 4606,24 = 393,76 \text{ мВ}$$

Відносна похибка матиме значення 7,88%. Невизначеність у цьому випадку матиме значення $U_{\text{ЦП}} = 0,0455$. Тому максимальне значення напруги на цифровому індикаторному пристрої становить $U_{\text{ЦП}} = 5 \pm 0,394 \text{ В}$.

4.4 Розрахунок похибки для крокового двигуна

Для визначення коефіцієнту перетворення механічного вузла розрахуємо оптичну геометрію виходячи з заданих в ТЗ характеристик (Таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку

№	Параметр	Розмірність	Значення
1	Діапазон $\Delta\phi$ критичних кутів для зразків моторних олив, не менше	градуси	60...70
2	Межі основної відносної похибки вимірювання критичних кутів, не більше	%	± 1

Робоча ось валу має довжину $L=30 \text{ мм}$, різьблення валу має крок $p = 1 \text{ мм}$, кількість кроків двигуна складає $n = 400$. Похибка кроку становить $\pm 5\%$, тобто 0,045 градуси, або 2,7 кут. хвилини, або 162 кут. секунди. Похибка початку відліку визначається шириною оптичного вікна кінцевого вимикача, який у нашому випадку дорівнює 0,4 мм (Рисунок 4.1).

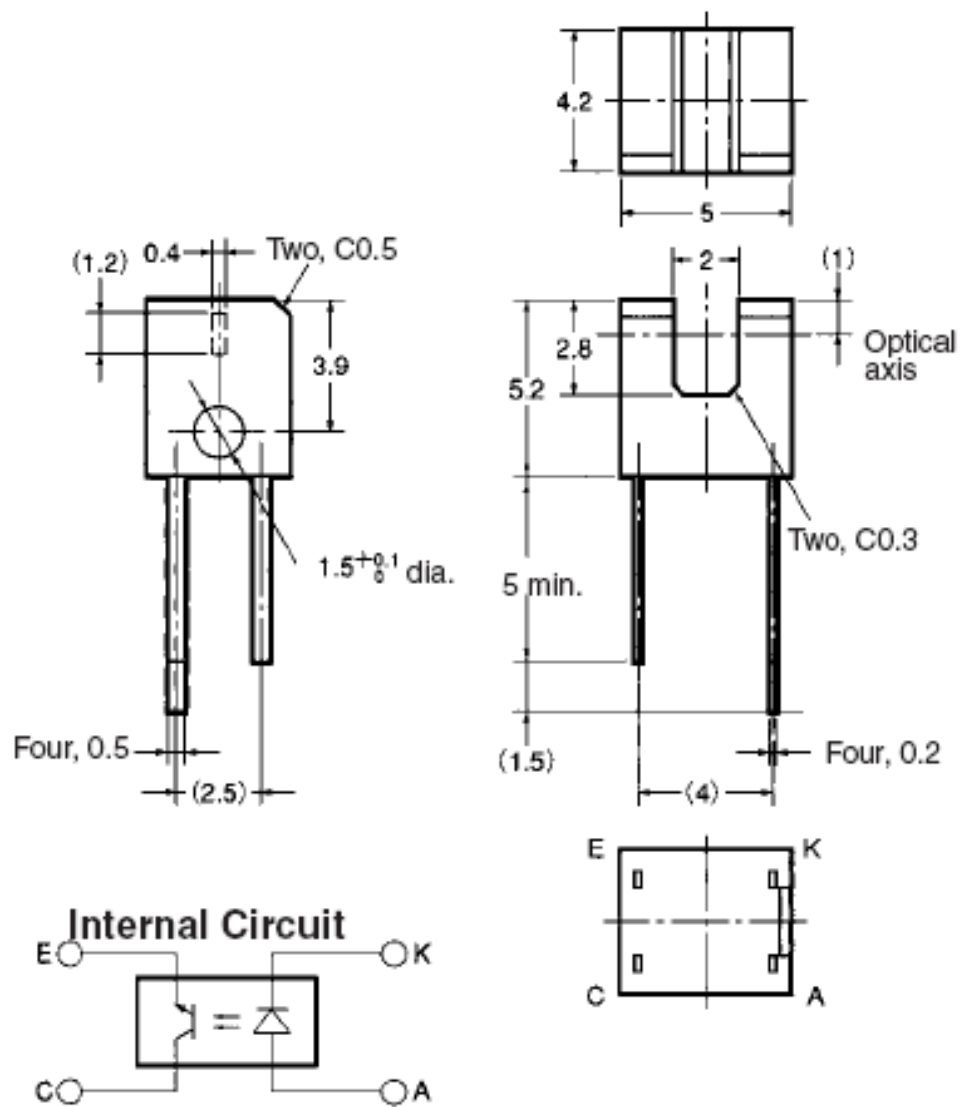


Рисунок 4.1 –Габаритні розміри та схема підключення кінцевого вимикача

Драйвер може пропустити крок на початку роботи, що може призвести до додаткової похибки. Під час обертів валу двигуна штовхач переміщується на один крок різьблення, тобто 360 градусів на 1 мм. Тобто похибка початкового позиціонування виражена в кутовій мірі обертання валу двигуна, що становить $\Delta\theta_{\text{вал}} = 360 \cdot 0,4 = 144$ градуси, що відповідає 160 крокам двигуна або імпульсам генератора.

Так як похибки початкового позиціонування і робота драйвера адаптивні, а похибкою крокового двигуна можна знехтувати, то загальна

похибка початкового позиціонування становить ± 80 крок. Для визначення похибки кута падіння розрахуємо геометрію (Рисунок 4.2).

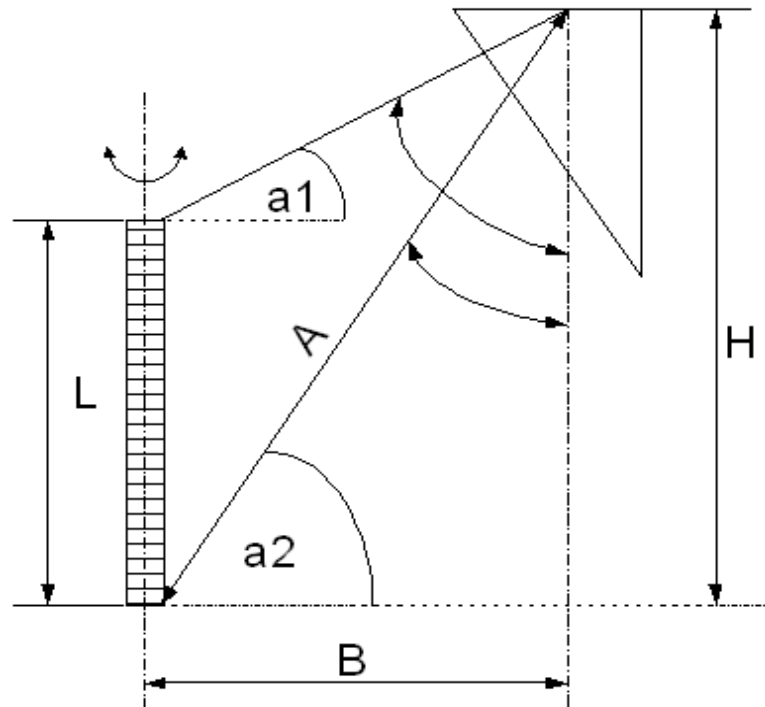


Рисунок 4.2 – Геометрія крокового двигуна

Розраховані значення геометрії наступні:

$H = 81$ мм висота геометрії;

$B = 141$ мм відстань від призми до валу;

$A = 162$ мм відстань до нижньої точки валу;

$A_2 = 150$ мм відстань до верхньої точки валу.

1). Кількість обертів валу на робочій ділянці $N_{\text{вал}} = L/p = 30/1 = 30$ обертів;

2). Кількість кроків двигуна на ділянці L : $N_{\text{двиг}} = N_{\text{вал}} \cdot n = 30 \cdot 400 = 12\,000$ кроків;

3). Крок зміни кута падіння світла на призму:

$N_{\text{призм}} = \Delta\varphi/N_{\text{двиг}} = (70-60)/12000 = 8,33 \cdot 10^{-4}$ градуси; Крок становить 3 кут.секунди. Тобто один крок двигуна рівний 0,9 кут.градуси змінює кут падіння світла на 3 кут. секунди. У цьому разі коефіцієнт перетворення механічного вузла становить $K=9,26 \cdot 10^{-4}$.

Похибку коефіцієнту перетворення обчислюється на основі похибки кроку. Для найбільшого кроку 0,945 кут.градуси, коефіцієнт перетворення складає $8,82 \cdot 10^{-4}$, тоді коефіцієнт з похибкою складає $(9,26 \pm 0,44) \cdot 10^{-4}$. Враховуючи похибку початкового позиціонування, кут падіння можна обчислити так:

$$\theta = \theta_0 + (N \pm \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} \pm \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot K, \quad (4.3)$$

де, θ – абсолютне значення кута повороту оптичної лави, градуси;

θ_0 – початкове початку кутового діапазону, градуси, $\theta_0 = 60^\circ$;

N – кількість поданих імпульсів на драйвер крокового двигуна;

ΔN – похибка початкового позиціонування, $\Delta N \pm 80$ кроків;

$N_{\text{к.д.}}$ – номінальний крок крокового двигуна, $N_{\text{к.д.}} = 0,9^\circ$;

$\Delta N_{\text{к.д.}}$ – похибка кроку двигуна, $\Delta N_{\text{к.д.}} = 0,045^\circ$;

K – коефіцієнт перетворення механічного вузла, $K = 9,26 \cdot 10^{-4}$.

Розрахуємо значення похибки кутів падіння для початку та кінця діапазону критичних кутів відповідно до ТЗ. Для початку діапазону $N=0$:

$$\theta_{\text{begin}} = \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + (0 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4}$$

$$\theta_{\text{begin}} = 60 + 0,07 = 60,07^\circ. \text{ Відносна похибка } 0,12\%.$$

Для кінця діапазону 70° необхідно кількість кроків двигуна $N=12000$:

$$\theta_{\text{end}} = \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + (12000 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4}$$

$$\theta_{\text{end}} = 60 + 10,571 = 70,57^\circ. \text{ Відносна похибка } 0,82\%.$$

Для кінця діапазону $N=6000$:

$$\theta_{\text{mid}} = \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + (6000 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4}$$

$$\theta_{\text{mid}} = 60 + 5,32 = 65,32^\circ. \text{ Відносна похибка } 0,49\%.$$

З розрахунків видно, що величина похибки залежить від кутового положення. Чим ближче до кінця діапазону в напрямку більших кутів, тим більша похибка. У даному випадку, найбільша невизначеність становить $U_{U_{\text{MC}}} = 0,0047$.

4.5. Розрахунок похибки вимірювання критичних кутів

Розглянемо вплив похибки напруги після перетворення АЦП ($U_{ЦП} = 5 \pm 0,394$ В) на величину похибки визначення кута. Визначимо нахил характеристик навколо кута падіння, який відповідає інтенсивності 0,7 від максимуму, тобто при напрузі на вході АЦП $U_{ЦП07} = 0,7 \cdot 5 = 3,5$ В. Тангенс кута нахилу α можна визначити як відношення приросту напруги $\Delta U_{ЦП07}$ до зміни відповідного кута падіння $\Delta \theta_{07}$. У даному випадку маємо однаковий приріст напруги, який становить 1,5 В. Визначимо відповідний приріст кута падіння та тангенс кута нахилу (Таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Характеристики вимірювань типів моторних оли

Тип оливи	Синтетична початок	Напівсинтетична початок	Мінеральна кінець
$\Delta \theta_{07}, \text{град}$	0,069	0,064	0,074
$\text{tg } \alpha$	21,74	23,44	20,27
$N_{\text{к.д.}}$	82,8 $\approx$ 83	76,8 $\approx$ 77	88,8 $\approx$ 89
$\Delta \theta_U, \text{град}$	0,018	0,017	0,019
N	6195	6819	8740
$\theta_{\text{к.}}, \text{град}$	65,579	66,119	67,799
$\theta_{\text{к.зад.}}, \text{град}$	65,229	65,744	67,354
$\delta \theta_{\text{к.}}, \%$	0,54	0,57	0,67

Похибка кутового положення через зміну напруги на виході АЦП:

$$\Delta \theta_U = (\Delta U_{ЦП} \cdot \Delta \theta_{07}) / 0,3 \cdot U_{ЦП0}, \quad (4.4)$$

де, $\Delta \theta_U$ – абсолютна похибка вимірюного кута, градуси;

$\Delta \theta_{07}$ – зміна кута при зменшенні інтенсивності на 0,7, градуси;

$U_{ЦП0}$ – номінальна напруги на виході АЦП, $U_{ЦП0} = 5$ В;

$\Delta U_{\text{ЦП}}$ – абсолютна похибка напруги на виході АЦП, $\Delta U_{\text{ЦП}} = \pm 0,394 \text{ В}$.

Розрахуємо абсолютні похибки вимірювального кута для різних типів моторних олиив відповідно до таблиці. Будемо вважати похибки адаптивними, сумарна абсолютна похибка буде визначена для кута падіння $67,28^\circ$, що відповідає межі діапазону для мінеральної олиив. Діапазон сканування становить $7,28^\circ$, що відповідає числу кроків $N=8736$.

$$\begin{aligned}\theta_{67,28^\circ} &= \pm \Delta \theta_U + \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = \\ &= +0,019 + 60 + (8736 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + 7,73 = 67,73^\circ.\end{aligned}$$

Значення абсолютної похибки для цього випадку $\Delta \theta = 67,73 - 67,28 = 0,45^\circ$, а відносна похибка складає $0,67\%$. Без врахування впливу похибки напруги абсолютна похибка кута становитиме $0,44^\circ$ або $0,65\%$, тобто фактор зміни напруги сигналу незначний і збільшує похибку лише на $0,02\%$. При оцінці максимальної похибки для краю діапазону кутового сканування (70°), це значення можна не враховувати. Тому для оцінки загальної невизначеності використаємо раніше визначене значення відносної похибки $0,82\%$. Вираз для сумарної невизначеності буде наступним:

$$\begin{aligned}U(X_0) &= \sqrt{U_{U_{\text{ЦП}}}^2 + U_{\gamma_{\text{АЦП}}}^2 + U_{\theta_{\text{МС}}}^2 + U_{U_{\text{ТП}}}^2 + U_{I_{\text{ФД}}}^2 + U_{I_{\text{Л}}}^2} = \\ &= \sqrt{0,0455^2 + 0,0012^2 + 0,0047^2 + 0,0443^2 + 0,0297^2 + 0,0297^2} = 0,0763;\end{aligned}$$

Таким чином, сумарна невизначеність становитиме $U(X_0) = 0,0763$, а максимальне значення відносної похибки вимірювання критичного кута за рівнем 70% становить $0,82\%$, що для кута 70° становить $0,574^\circ$. Для екстраполяції значення критичного кута за рівнем 100% можна додати усереднене значення кутового зсуву $\Delta \theta_{07}$, а саме $0,069 \pm 0,005^\circ$ з таблиці. У

цьому випадку для краю діапазону мінеральних олив отримаємо значення критичного кута $\theta_{\text{к.мінерал}} = \theta_{67,28^\circ} + 0,069 = 67,73^\circ + 0,069^\circ = 67,799^\circ$. Абсолютна похибка значення критичного кута у цьому випадку рівна $\Delta\theta_{\text{к.мінерал}} = \theta_{\text{к.}} - \theta_{\text{к.зад.}} = 67,799^\circ - 67,354^\circ = 0,45^\circ$, а відносна похибка 0,67%. Розраховані значення $\theta_{\text{к.}}$ та задані значення $\theta_{\text{к.зад.}}$ критичних кутів та відносні похибки $\delta\theta_{\text{к.}}$ для інших типів олив та кількість кроків двигуна N наведені в таблиці. Так для кута падіння $65,68^\circ$, що відповідає краю діапазону для напівсинтетичної оливи діапазон сканування становить $5,68^\circ$ та відповідає числу кроків $N=6816$.

$$\begin{aligned}\theta_{65,68^\circ} &= \pm\Delta\theta_U + \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = \\ &= +0,017 + 60 + (6816 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + 6,05 = 66,05^\circ.\end{aligned}$$

Значення абсолютної похибки для цього випадку $\Delta\theta = 66,05 - 65,68 = 0,37^\circ$, а відносна похибка складає 0,56%. У цьому випадку для краю діапазону синтетичних олив отримаємо значення критичного кута $\theta_{\text{к.напівсин}} = \theta_{65,68^\circ} + 0,069 = 66,05^\circ + 0,069^\circ = 66,119^\circ$. Абсолютна похибка значення критичного кута у цьому випадку рівна $\Delta\theta_{\text{к.синтет}} = \theta_{\text{к.}} - \theta_{\text{к.зад.}} = 66,119^\circ - 65,744^\circ = 0,375^\circ$, а відносна похибка 0,57%. Для кута падіння $65,16^\circ$, що відповідає краю діапазону для синтетичної оливи діапазон сканування становить $5,16^\circ$ та відповідає числу кроків $N=6192$.

$$\begin{aligned}\theta_{65,16^\circ} &= \pm\Delta\theta_U + \theta_0 + (N + \Delta N) \cdot (N_{\text{к.д.}} + \Delta N_{\text{к.д.}}) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = \\ &= +0,018 + 60 + (6192 + 80) \cdot (0,9 + 0,045) \cdot 9,26 \cdot 10^{-4} = 60 + 5,51 = 65,51^\circ.\end{aligned}$$

Значення абсолютної похибки для цього випадку $\Delta\theta = 65,51 - 65,16 = 0,35^\circ$, а відносна похибка складає 0,54%. У цьому випадку для краю діапазону синтетичних олив отримаємо значення критичного кута $\theta_{\text{к.синтет}} = \theta_{65,16^\circ} + 0,069 = 65,51^\circ + 0,069^\circ = 65,579^\circ$. Абсолютна похибка значення критичного кута у цьому випадку рівна $\Delta\theta_{\text{к.синтет}} = \theta_{\text{к.}} - \theta_{\text{к.зад.}} = 65,579^\circ - 65,229^\circ = 0,35^\circ$, а відносна: 0,54%.

Висновки до розділу 4

У даному розділі Був проведений аналіз похибок вимірювального каналу. Розраховано похибки струму лазера, трансїмпедансного підсилювача, аналогово-цифрового перетворювача, крокового двигуна, а також вимірювання критичних кутів. Розраховано сумарну невизначеність. Межі відносної похибки вимірювання кутів, не більше $\pm 1\%$ згідно ТЗ.

ВИСНОВОК

Підсумовуючи вище сказане, в даній роботі розглянуто основні характеристики та параметри якості моторних олив. Був проведений аналіз існуючих методів дослідження моторних олив, таких, як оптичні, хімічні та електричні.

Було встановлено, що дослідження моторної оливи за допомогою рефрактометричного методу є найкращим серед усіх представлених методів. Даний метод дозволяє зробити швидкий та точний аналіз фізико-хімічних властивостей моторної оливи, що в свою чергу дозволяє забезпечити її ефективну роботу та продовжити термін служби. За результатами вимірювання та розрахунків було визначено, що лазер з довжиною хвилі 650 нм є найефективнішим для дослідження різних типів моторних олив та вимірювання показника заломлення.

Розроблено функціональну схему рефрактометричного приладу, в якій було використано певна кількість елементів, зокрема: стабілізатор струму лазера, ТПІ підсилювач, та фотодіод ARDUINO UNO, стабілізатор напруги підсилювачів, ARDUINO та лазера, цифровий індикатор пристрою, кроковий двигун, драйвер крокового двигуна, генератор та стабілізатор напруги крокового двигуна. Розроблено схему електричну принципову та виконано її розрахунок. Проведено розрахунок споживаної потужності приладу, яка не перевищує значення в ТЗ і становить 22 Вт.

Розраховано похибки для елементів рефрактометричного приладу, а саме: струму лазера, трансїмпедансного підсилювача, аналогово-цифрового перетворювача, крокового двигуна, а також вимірювання критичних кутів. Розраховано сумарну невизначеність. Відносна похибка вимірювання критичного кута для мінеральних моторних олив, що мають найбільший показник заломлення, становила 0,67%, що не перевищує значення, що задане в ТЗ - 1%.

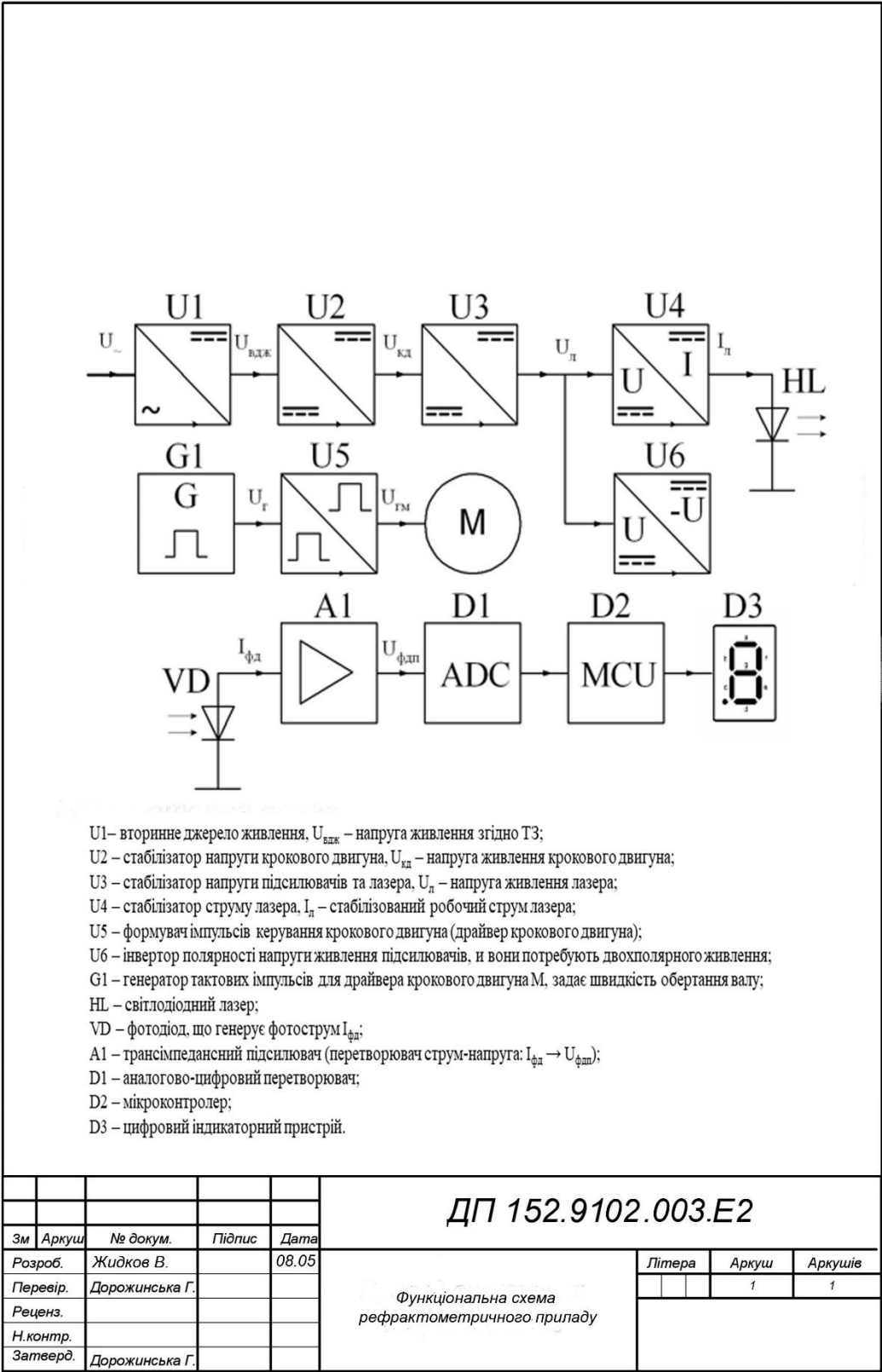
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛАТЕРАТУРИ

1. Адамчук, А.В. Відновлення якості відпрацьованих моторних олив, 2017, 92.
2. Червінський, Т.І., Гринишин, О.Б. та Корчак, Б.О. Регенерація відпрацьованих моторних олив у присутності карбаміду: Вісник Національного університету Львівська політехніка. Хімія, технологія речовин та їх застосування, 2015.
3. Кравець, А.М. та Кравець, В.Г. Моторні оливи, 2012.
4. Пантюхіна, І.М. Вплив фізико-хімічних параметрів відпрацьованих моторних олив на процес їх регенерації, 2020.
5. Журавель, Д.П. Безмоторні методи оцінки якості моторних олив енергетичних засобів, 2020.
6. Шкругаль, О.М. та Челомбытко, Б.С. Дослідження основних факторів, які впливають на швидкість забруднення оливи в двигуні внутрішнього згоряння, 2021.
7. Бойченко, С.В. Оливи. Моторні, турбінні, гідравлічні та трансмісійні: властивості та якість, 2019.
8. Rajakovic-Ognjanovic, Vladana; Aleksic, G.; Rajakovic, Lj. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials. Journal of hazardous materials, 2008.
9. Feudjio, William Mbogning. Characterization of engine lubricants by fluorescence spectroscopy and chemometrics. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021.
10. Bley T., Pignanelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination : Journal of Sensors and Sensor Systems, 2014.
11. Maslov, V. Surface plasmon resonance—a promising method for estimating the quality of motor oil. Trans Motauto World, 2017.
12. Fall, J та Voelkel, A. Inverse gas chromatography and other chromatographic techniques in the examination of engine oils: Journal of Chromatography A, 2002.

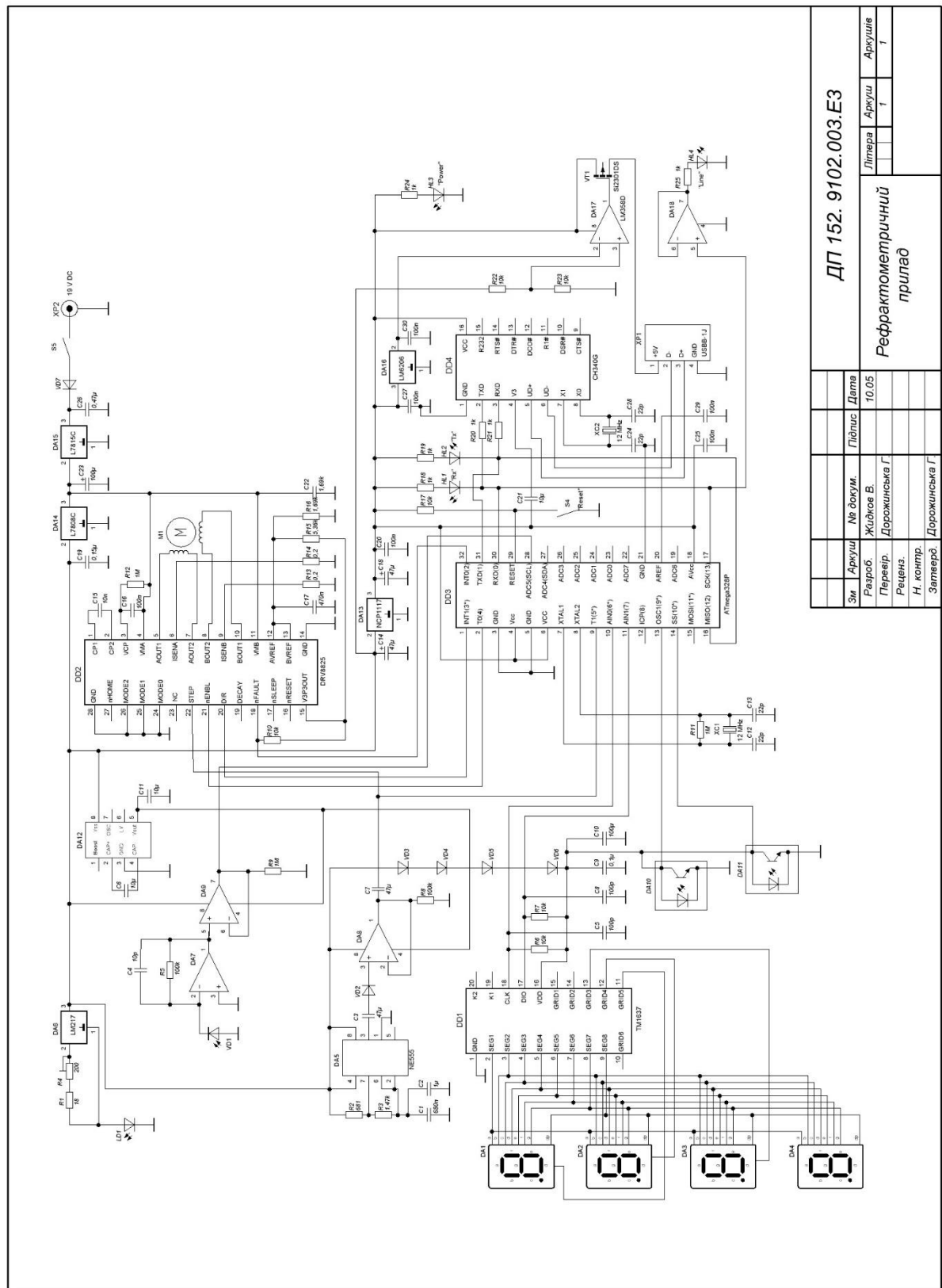
13. Wolak, Artur, et al. Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy, Measurement, 2021.
14. Аулин, В.В., Лысенко, С.В. та Кузик, А.В. Изменение технического состояния основных сопряжений двигателя и моторного масла в процессе его эксплуатации : Проблемы трибологии, 2009.
15. Заренбин, В.Г. Возможность применения кондуктометрического метода для контроля степени загрязнения автомобильных масел: Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2008.
16. Григоров, А.Б. Підвищення ефективності експлуатації автобусів оптимізацією строків заміни моторних оливи : PhD Thesis. Андрій Борисович Григоров. –Харків, 2009.
17. Жидков В.В., Дорожинська Г.В. Оптимізація параметрів рефрактометричного приладу для визначення типу моторної оливи. Збірник матеріалів ХХІІ Міжнародної науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”. 16 – 17 травня 2023 р., м. Київ. НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. С. 154-157.
18. ArduinoUno. Ланжерон. URL: https://langeron.net.ua/arduino-uno-r3-atmega16u2-_usb (дата звернення 22.05.2023).
19. Бачинський, Р. В. Контролер керування кроковими двигунами. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Комп’ютерні системи та мережі, 2013.
20. Голодний, І. М.; Лавріненко, Ю. М.; Торопов, А. В. Силовий драйвер крокового двигуна. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 2016.
21. Drever, Ronald WP. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. Applied Physics, 1983.
22. Choi, Hojong. Bias-voltage stabilizer for HVHF amplifiers in VHF pulse-echo measurement systems. Sensors, 2017.

23. Defoort, Michael. A third-order sliding-mode controller for a stepper motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009.
24. Hasanien, Hany M. FPGA implementation of adaptive ANN controller for speed regulation of permanent magnet stepper motor drives. Energy Conversion and Management, 2011.
25. Lau, K.S. Excess noise measurement in avalanche photodiodes using a transimpedance amplifier front-end. Measurement science and technology, 2006.

ДОДАТОК А. Функціональна схема приладу для визначення типу моторної оливи



ДОДАТОК Б. Схема електрична принципова приладу для визначення типу моторної оливи



ДП 152. 9102.003.ЕЗ			
Рефрактометричний прилад			
Зм.	Архув.	№ докум.	Підпис
Розроб.	Жидков В.		10.05
Перевір.	Дорожинська Г		
Реценз.			
Н. контр.			
Загверб.	Дорожинська Г		

ДОДАТОК В. Перелік елементів схеми електричної принципової

Позначення	Назва	Кількість
	Конденсатори	1
C1	C0805B684K160N3 680nF 10% 16V Hitano	1
C2	CL21B105KAFNNNE 1uF 10% 25V Samsung	1
C3,C7	CL21A476MQYNNNG 47uF 20% 6,3V SAMSUNG	2
C4	B37940-K2100-J62 10pF 5% 200V Epcos	1
C6,C11	CL21B106KPQNNNE 10uF 10% 10V Samsung	2
C19	C1206C154KARACAUTO 0,15uF 10% 250 V KEMET	1
C23	EHV101M25RD sizeD 8x6.5 100uF 10% 25V Hitano	1
C26	EHVR47M50RA sizeA 0,47uF 10% 50V Hitano	1
	Мікросхеми	
DA5	N555D SO-8 TI	1
DA6	LM217LD13TR SO-8 SMD STMicroelectronics	1
DA7, DA9	LM358 SO-8 TI	2
DA12	ICL7660A SOIC Intersil	1
DA14	L7808C D2PAK SMD STMicroelectronics	1
DA15	L7815C TO-220 SMD STMicroelectronics	1
	Лазери	
LD1	Laser Dot Diode Module Head WL Red 650nm 5V	1
	Резистори	
R1	RC0805JR-18R 18 Ohm 5% 0,125W 150V Hitano	1
R2	RC0805FR-07681RL 681 Ohm 1% 0,125W 150V Yageo	1
R3	RC0805FR-1K47R 1,47 kOhm 1% 0,125W 150V Hitano	1
R4	RC0805JR-200R 200 Ohm 5% 0,125W 150V Hitano	1
R5	RC0805FR-165KR 165 kOhm 1% 0,125W 150V Uni-Ohm	1
R8	RC0805FR-100KR 100 kOhm 1% 0,125W 150V Hitano	1
R9	RC0805FR-071M 1 MOhm 1% 0,125W 150V Yageo	1
	Діоди	
VD1	BPW34 Vishay Intertechnology	1
VD2	1N4148WS SOD-323 1N4148WS	1
VD3, VD4, VD5, VD6	1N4001G SOD57 ON Semiconductor	4
VD7	B230A SMA B230A DIODES INCORPORATED	1

					ДП 152.9102.003.E3				
Зм	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	Перелік елементів схеми електричної принципової				
Розроб.	Жидков В.			27.05					
Перевір.	Дорожинська Г.								
Реценз.									
Н.контр.									
Затверд.	Дорожинська Г.								
					Літера	Аркуш	Аркуші		
						1	1		

УДК 665.71

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РЕФРАКТОМЕТРИЧНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ МОТОРНОЇ ОЛИВИ

Жидков В.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: v.zhydkov01@gmail.com

Дорожінська Г.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: annakushnir30@ukr.net

Моторна олива (МО) відіграє важливу функцію у роботі двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), відповідає за процес зносу деталей та термін експлуатації. У свою чергу це пред'являє підвищені вимоги до якості та відповідності олив заявленим виробником експлуатаційним характеристикам, оперативний контроль яких дозволяє найбільш ефективно проводити експлуатацію ДВЗ. Основними критеріями якості олив є значення кінематичної в'язкості, що відповідають роботі ДВЗ в різних температурних режимах: режим пуску і режим прогрітого двигуна. При цьому виділяють мінеральні, напівсинтетичні та синтетичні МО з відповідною класифікацією кінематичної в'язкості за SAE (Society of Automotive Engineers): 15W-40, 10W-40 та 5W-30. Стандартні віскозиметричні методи контролю кінематичної в'язкості (ISO 3104-94 та ін.) не задовольняють критеріям проведення експресного аналізу, оскільки важко піддаються автоматизації, вимагають значних обсягів проб, тривалі за часом та використовують габаритне обладнання. Експресне визначення типу моторної оливи необхідне для виявлення фальсифікату. В роботах [1, 2] показана можливість визначення типу МО шляхом комплексних вимірювань її рефрактометричної та електрофізичної характеристик (показника заломлення і питомого опору) завдяки наявності кореляційних залежностей між типом МО і вказаними параметрами. Обидва параметри були визначені опосередковано за допомогою відповідного математичного апарату. При цьому питомий опір визначали методом спектральної імпедансометрії, а показник заломлення методом поверхневого плазмонного резонансу [3]. Обидва методи є складними і потребують спеціалізованого аналітичного обладнання. Тому нами було запропоновано простіший рефрактометричний метод визначення типу МО за значенням критичного кута, величина якого безпосередньо пов'язана з відповідним її показником заломлення. Дана робота була присвячена оптимізації параметрів автоматизованого рефрактометричного приладу, а саме визначення необхідного діапазону кутового сканування та довжини хвилі.

Об'єктом дослідження були 9 зразків МО різних типів: синтетичні (Motul 5w-40, Castrol Magnatec 5w-40, GM Genuine 5w-30), напівсинтетичні (ELF 10w-40, ЛЕОЛ 10w-40, Akvilon EXTRA10w-40) і мінеральні (BARS 15w-40, LUX 15w-40, Akvilon Classic 15w-40). На рефрактометрі RL3 ($\Delta n_D = 1,32 \dots 1,70$; абсолютна похибка вимірювання $\delta n_D = \pm 2 \cdot 10^{-4}$), були виміряні значення показників заломлення досліджуваних зразків МО та розраховані відповідні значення критичних кутів θ_c для призми розроблюваного рефрактометра зі скла марки Ф1 з показником заломлення $n_D = 1,6128$ (Таблиця 1).

Таблиця 1. Результати вимірювань та розрахунків параметрів досліджуваних МО

№ п.п.	Тип МО	Марка МО	n_D	$\theta_c(n_D)$, град.	n_{650}	$\theta_c(n_{650})$, град.
1	синтетична	Motul	1,4645	65,236	1,456506	65,229
2	синтетична	Castrol Magnatec	1,4650	65,279	1,45701	65,272
3	синтетична	GM Genuine	1,4670	65,449	1,458995	65,442
4	напівсинтетична	ELF	1,4705	65,751	1,462488	65,744
5	напівсинтетична	ЛЕОЛ	1,4795	66,542	1,471458	66,536
6	напівсинтетична	Akvilon EXTRA	1,4860	67,132	1,477946	67,125
7	мінеральна	BARS	1,4850	67,037	1,476954	67,034
8	мінеральна	LUX	1,4865	67,174	1,478446	67,171
9	мінеральна	Akvilon Classic	1,4885	67,358	1,480426	67,354

Оскільки для точного визначення критичного кута необхідно мати монохроматичне когерентне джерело випромінювання, тобто лазер, було прийнято рішення застосовувати довжину хвилі відмінну від спектральної лінії D (589,3 нм – жовтий лазер), а перейти на більш довгохвильове джерело – червоний лазер з довжиною хвилі 650 нм. Також було враховано дисперсію показника заломлення матеріалу призми: показник заломлення для довжини хвилі 650 нм становив $n_{650} = 1,6041$. Враховуючи дисперсію показника заломлення МО було зроблено нові розрахунки значень критичних кутів (Таблиця 1). За результатами вимірювання та розрахунків було встановлено діапазони критичних кутів для відповідних типів моторних оливи, а саме: 1,45-1,48. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення були побудовані рефрактометричні характеристики повного внутрішнього відбиття для значень показників заломлення досліджуваних зразків МО на краях діапазонів для довжини хвилі опромінення 650 нм межі поділу скло-МО (Рис.1). Оскільки форма реальної рефрактометричної характеристики в околі критичного кута [4] не має екстремумів і згладжена через неоднорідність межі скло-МО, тому було прийнято рішення виконувати вимірювання не безпосередньо кутового положення критичного кута, а порівнювати моторні оливи за величиною кута відбиття на рівні 0,7 від максимуму інтенсивності відбитого світла (Рис. 1). У цьому випадку діапазон сканування становив майже 2 кутові градуси від 65,16 до 67,28

градуси. Для можливості калібрування розроблюваного приладу діапазон сканування було розширено до 7,5 градусів: від 61,25 до 68,75 градуси.

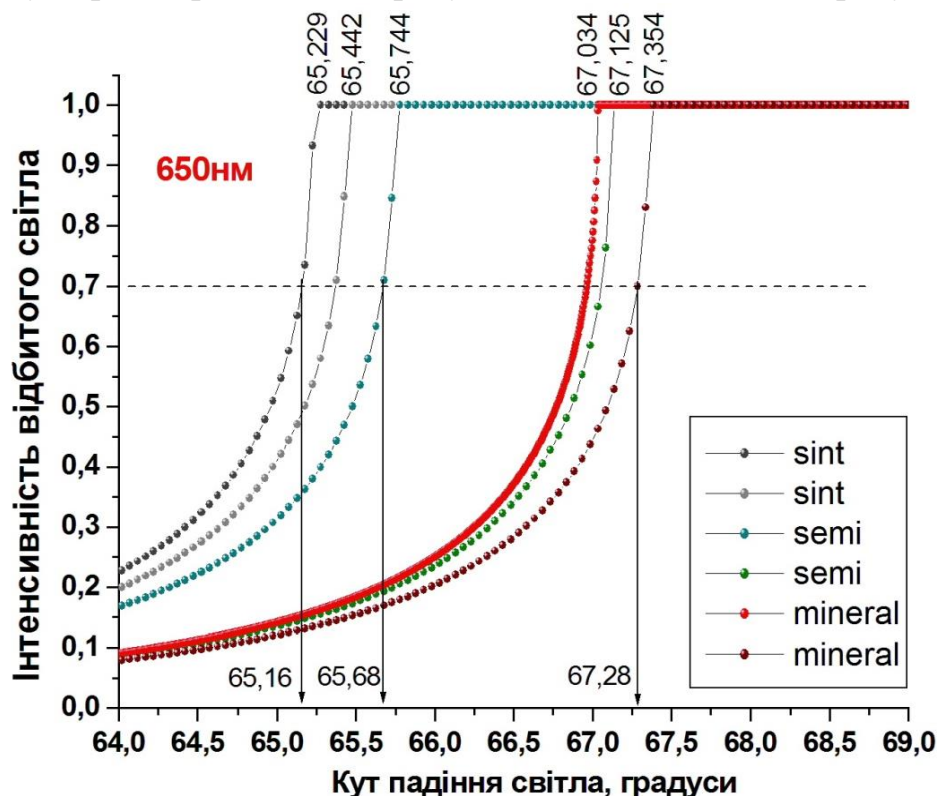


Рис. 1. Розраховані характеристики відбиття для довжини хвилі 650 нм зразків моторної оливи різних типів: синтетичної (sint), напівсинтетичної (semi) та мінеральної (mineral)

Таким чином за результатами вимірювання та розрахунків було визначено необхідний діапазон сканування автоматизованого рефрактометра та обрана довжина хвилі. Результати проведеного дослідження будуть використані у процесі розробки відповідного приладу для визначення типу МО.

Ключові слова: рефрактометрія, моторні оливи, критичний кут.

Пристатейна бібліографія

- [1] Г.В. Дорожинська, Дорожинський Г.В., О.Л. Кукла, Л.М. Матвієнко, А.В. Мамикін, та В.П. Маслов, “Высокоинформативный комплексный метод определение типа моторного масла”, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 3-4, с. 36-44, 2019.
- [2] Г.В. Дорожинська, Г.В. Дорожинський, О.Л. Кукла, А.В. Мамикін, та В.П. Маслов, “Спосіб визначення типу моторної оливи”, *Патент України № 137482*, Жов. 25, 2019.
- [3] A.I. Liptuga, G. V. Dorozinsky, V.I. Gordienko, V.P. Maslov, and V.V. Pidgorny, “Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon”, *Scholars Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, pp. 372–374, 2015.
- [4] К. В. Костюкевич, Ю. М. Ширшов, Р. В. Христосенко, А. В. Самойлов, Ю. В. Ушенин, С. А. Костюкевич, и А. А. Коптюх, Особенности углового спектра поверхностного плазмон-поляритонного резонанса в геометрии Кретчмана при исследовании латексной водной суспензии, *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, Вып. 53, с. 220-239, 2018.