

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО"

Приладобудівний факультет
Кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

"На правах рукопису"
УДК 621.383.51

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
В.о. завідувача кафедри
д.т.н., професор Н.М. Защепкіна

_____ 2019 р.

Магістерська дисертація
зі спеціальності 152– Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

на тему "Вимірювач струму сонячних батарей на датчику Холла"

Виконав: студент ІІ курсу, групи ПН-71мп
Тараюк Микола Михайлович

Науковий керівник **к.т.н. Божко К.М.**

Консультант з стартап проекту:
Кандидат економічних наук, доцент,
Бояринова К.О.

Рецензент _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

Київ – 2019

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет Приладобудівний

Кафедра Наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

Спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Н.М. Защепкіна

«___» «_____» 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію

студ. Тарасюку Миколі Михайловичу

1. Тема дисертації Вимірювач струму сонячних батарей на датчику Холла

затверджена наказом по університету від «___» _____ 2019 р. № _____

- 2. Термін здачі** студентом оформленої дисертації «___» _____ 2019 р.
- 3. Об'єкт дослідження** Об'єктом дослідження є процес вимірювання струму фотоелектричних сонячних батарей
- 4. Предмет дослідження** Предметом дослідження є метод та засіб вимірювання струму сонячних батарей на основі застосування сенсора Холла та цифрового осцилографу
- 5. Перелік питань, які мають бути розроблені**
5.1. Провести аналіз принципу дії сенсорів на ефекті Холла. 5.2. Провести огляд схемних рішень для вимірювання струму. 5.3. Виконати аналіз будови та принципу дії польових транзисторів. 5.4. Опрацювати та надати аналіз міжнародних стандартів, за якими отримують вольт-амперні характеристики сонячних батарей. 5.5. Виконати огляд методів та засобів отримання вольт-амперних характеристик сонячних батарей. 5.6. Обґрунтувати вибір інформаційно-вимірвальної системи на основі цифрового осцилографу Tektronix для отримання вольт-

- амперних характеристик 5.6. Отримати та опрацювати експериментальні дані з вимірювання вольт-амперних характеристик.
- 6. Перелік публікацій** 6.1. Тарасюк М.М. Вимірювання імпульсного струму сонячної батареї датчиком Холла /М.М. Тарасюк, К.М. Божко // Збірник праць 14-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених у приладобудуванні. – 4-5 грудня 2018 р. – м. Київ. – С. 207-209.
- 7. Перелік ілюстративного матеріалу** 7.1. Структурна схема стенду фотоелектронного дослідження електролюмінісцентних дефектів сонячних елементів. 7.2. Схема електрична принципова вимірювача

8. Дата видачі завдання «_____» _____ 2019 р.

Науковий керівник _____ К.М. Божко

Завдання прийняв до виконання _____ М.М. Тарасюк

Календарний план

№ п/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, аналіз методів вимірювання	10.01.2019	
2	Аналіз засобів вимірювання	10.02.2019	
3	Оформлення першого розділу	20.02.2019	
4	Побудова лабораторного макету	14.03.2019	
5	Виконання теоретичних досліджень	25.04.2019	
6	Розробка методики виконання експериментів і виконання експериментальних досліджень	15.04.2019	
7	Виконання розділу стартап-проектів	20.04.2019	
8	Оформлення пояснювальної записки	25.04.2019	
9	Подача дисертації на попередній захист	07.15.2019	

Студент

/М.М. Тарасюк/

Науковий керівник дисертації

/ К.М. Божко/

Анотація

В даній дисертації було досліджено метод вимірювання струму сонячних батарей за допомогою сенсора Холла та цифрового осцилографа.

У першому розділі розглянуто принцип дії польового транзистора, сенсора Холла, та зроблено огляд схемних рішень для вимірювання струму.

В експериментально-конструкторському розділі було проведено дослідження з вимірювання струму сонячних батарей, розроблено пристрій для лінійної розгортки струму, та проведено розрахунок похибок вимірювань.

У третьому розділі було розроблено стартап-проект. Даний розділ включає в себе: опис ідеї, технологічний аудит, аналіз можливостей ринку, розробку ринкової та маркетингової стратегій.

Дана магістерська дисертація складається з 84 сторінок, та містить 26 таблиць, 36 рисунків, 38 літературних джерел.

Аннотация

В данной диссертации были исследованы метод измерения тока солнечных батарей с помощью сенсора Холла и цифрового осциллографа.

В первом разделе рассмотрены принцип действия полевого транзистора, датчика Холла, и сделан обзор схемных решений для измерения тока.

В экспериментально-конструкторском разделе было проведено исследование по измерению тока солнечных батарей, разработано устройство для линейной развертки тока и проведен расчет погрешностей измерений.

В третьем разделе был разработан стартап-проект. Данный раздел включает в себя: описание идеи, технологический аудит, анализ возможностей рынка, разработку рыночной и маркетинговых стратегий.

Данная магистерская диссертация состоит из 84 страниц, и содержит 26 таблиц, 36 рисунков, 38 литературных источников.

Abstract

In this dissertation, a method for measuring the current of solar cells using a Hall sensor and digital oscilloscope was investigated.

In the first section, the principle of the field transistor, the Hall sensor is considered, and an overview of the circuit decisions for measuring current.

In the experimental design section, a study was conducted on measuring the current of solar panels, a device for linear scanning of current was developed, and the calculation of errors of measurements was carried out.

In the third section, a startup project was developed. This section includes: description of the idea, technological audit, market opportunity analysis, development of market and marketing strategies.

This master's dissertation consists of 84 pages, and contains 26 tables, 36 drawings, 38 literary sources.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП	11
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	13
1.1 Принцип дії датчика Холла.....	13
1.1.1 Ефект Холла.....	13
1.1.2. Датчики Холла.....	16
1.1.3 Можливості застосування датчиків Холла.....	18
1.1.4. Цифрові струмові датчики	21
1.1.5 Лінійні струмові датчики	23
1.2 Огляд схемних рішень для вимірювання струму.....	25
1.2.1 Вимірювання струму в негативному полюсі навантаження.....	25
1.2.2 Вимірювання струму в позитивному полюсі навантаження	29
1.2.3 Струмовимірювальний резистор (шунт)	31
1.3 Принцип дії MOSFET транзистора та його застосування у вимірювальних системах	32
1.3.1 Польовий транзистор	32
1.3.2 Принцип дії польового транзистора.....	34
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	38
2.1. Розробка пристрою лінійної розгортки струму для динамічного вимірювання струму із моделюванням в EWB Multisim	38
2.2 Розрахунок похибок вимірювання струму і напруги сонячних батарей динамічним методом із лінійною розгорткою струму	54
2.3. Експериментальні дослідження з вимірювання струму фотоелектричної сонячної батареї датчиком Холла.....	59
3. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ “ВИМІРЮВАЧ СТРУМУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НА ДАТЧИКУ ХОЛЛА”	63
3.1. Опис ідеї проекту	63
3.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	65
3.3 Аналіз можливостей ринку для запуску стартап-проекту	65
3.4.Розробка ринкової стратегії проекту.....	73
3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	75

Висновки до розділу	79
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

СБ – сонячна батарея

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ККД – Коефіцієнт корисної дії

ОП – операційний підсилювач

ТКО – температурний коефіцієнт опору

ЕРС – електрична рушійна сила

ПК – персональний комп'ютер

МК – мікроконтролер

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ХХ – холостий хід

EWB – electronics workbench

MOSFET – metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor

МОП – метал-оксид-напівпровідник

МДП – метал-діелектрик-напівпровідник

КМОН - комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник

ВСТУП

Актуальність. Підвищення коефіцієнту корисної дії, а також збільшення терміну експлуатації сонячних батарей є основними науково-дослідними напрямками з метою зменшення собівартості енергії, для чого, необхідно впроваджувати нові та вдосконалювати існуючі методи і засоби контролю СБ взагалі та їх дефектів зокрема.

Створені на цей час методи та засоби контролю сонячних елементів та батарей орієнтовані на їх використання в умовах виробництва для забезпечення поопераційного контролю технологічного ланцюга. У цьому випадку, процес експлуатації сонячної батареї, тривалість якої складає 20 років і більше, не супроводжується потрібним контролем. Це спонукає до вдосконалення методів і засобів контролю сонячних елементів і батарей для вимірювання їх експлуатаційних параметрів та характеристик, а також виявлення і локалізації дефектів, наявність яких негативно впливає на коефіцієнт корисної дії.

Метод вимірювання струму сонячного елемента за допомогою датчика Холла лише досліджується, але він вже показав певні результати. Даний метод є досить ефективним. Його можна віднести до методів неруйнівного контролю, оскільки сонячну батарею непотрібно розбирати, щоб провести вимірювання. Також цей метод є більш простим, ніж інші методи контролю сонячних елементів. Він не потребує багато спеціального обладнання, також вимірювання можна проводити на місці установки батареї, а не лише в лабораторії. Тобто, даний метод вирішує проблему контролю сонячних елементів під час експлуатації.

Суть методу полягає у визначенні вольт-амперної характеристики сонячної батареї, з якої визначають коефіцієнт корисної дії, максимальну потужність, напругу холостого ходу, струм короткого замикання, струм і напругу на максимальній потужності, коефіцієнт форми і т. д. Аналіз вольт-амперної характеристики дозволяє здійснювати контроль дефектів на ранній

стадії їх розвитку та прогнозувати деградацію сонячної батареї, що є вагомим чинником для забезпечення корекції навантаження для максимального відбору до нього потужності .

Мета роботи: метою даної роботи є дослідження методу вимірювання струму, а також розробка та виготовлення вимірювача струму сонячного елемента та батареї на датчику Холла.

Задача дослідження:

- Огляд стану проблеми.
- Розробка методу вимірювання струму на сонячному елементі за допомогою датчика Холла.
- Дослідження методу.
- Розробка вимірювача струму.
- Виготовлення вимірювача струму.

Об'єкт дослідження: Об'єктом дослідження є процес вимірювання струму фотоелектричних сонячних батарей

Предмет дослідження: Предметом дослідження є метод та засіб вимірювання струму сонячних батарей на основі застосування сенсора Холла та цифрового осцилографу

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Принцип дії датчика Холла

1.1.1 Ефект Холла

Кінетичне явище, викликане взаємодією магнітного поля і електричного поля в твердому тілі, називається електромагнітним явищем. Розглянемо одне із найбільш вивчених гальваномагнітних явищ, яке називається ефектом Холла.

Американський фізик Едвін Герберт Хол (англ. Edwin Herbert Hall, 7 листопада 1855 - 20 листопада 1938) відкрив цей ефект у 1879 році. Свої експерименти Хол проводив на пластинці із золота, яка розміщувалася на склі, при протіканні через яку електричного струму виникала напруга на бічних краях пластини (не обов'язково на золотій, були використані також матеріали з напівпровідника). Різниця потенціалів обумовлена застосуванням магнітного поля, застосованого перпендикулярно площині пластини.

В даний час на основі ефекту Холла працюють датчики Холла: пристрої, які вимірюють напруженість магнітного поля. [1]

Нехай через напівпровідник у формі паралелепіпеда протікає струм уздовж осі x , а магнітне поле направлено вздовж осі y (рисунок 1.1).

Щільність струму:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = ne\mu_n \vec{E} = ne\vec{v}_d \quad (1.1)$$

Швидкість дрейфу електронів знаходиться у протилежному напрямку до поля \vec{E} , а дірок у напрямку з полем. Коли магнітне поле включено \vec{B} , на носії починає діяти сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e[\vec{v}_d \times \vec{B}] = e[\vec{v}_d \vec{B}] \quad (1.2)$$

так як $\vec{v}_d = \mu_d \cdot \vec{E} = \frac{e\langle\tau\rangle}{m^*} \vec{E}$, то

$$\vec{F}_L = \frac{e^2 \langle \tau \rangle}{m^*} [\vec{E} \cdot \vec{B}] \quad (1.3)$$

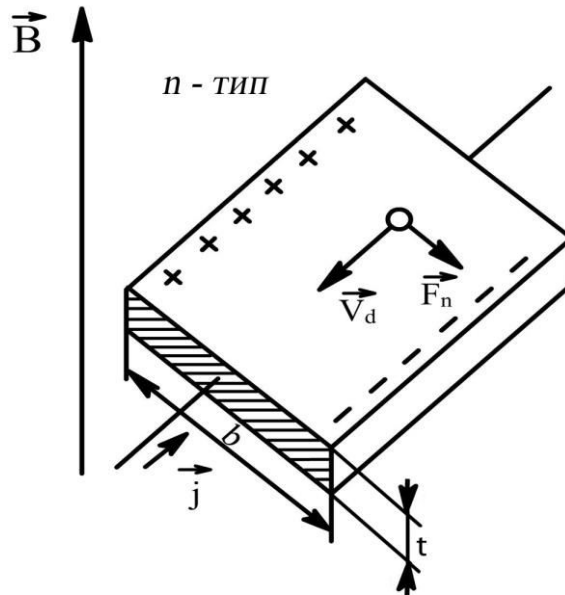


Рисунок 1.1 - Геометрія експерименту зі спостереження ефекту Холла

1. Отже, напрямок сили Лоренца визначається лише \vec{E} і \vec{B} та і не залежить від знака носія заряду. Якщо швидкість електронів і дірок визначається тільки електричним полем, електрони і дірки відхиляються в одному напрямку.

2. В нескінченному зразку, під дією електрони і дірки в результаті зіткнень рухаються за траєкторією, що усереднюють циклоїди під кутом $\varphi = f(E, B)$ до вихідного вектору \vec{J} (рисунок 1.2а, б).

3. У напівпровіднику кінцевих розмірів відбувається накопичення носіїв заряду на відповідних краях, надмірний заряд утворює поперечне поле \vec{E}^H по відношенню до \vec{E} . Ефект Холла - поява поля Холла в результаті дії магнітного поля (рисунок 1.2в, г).

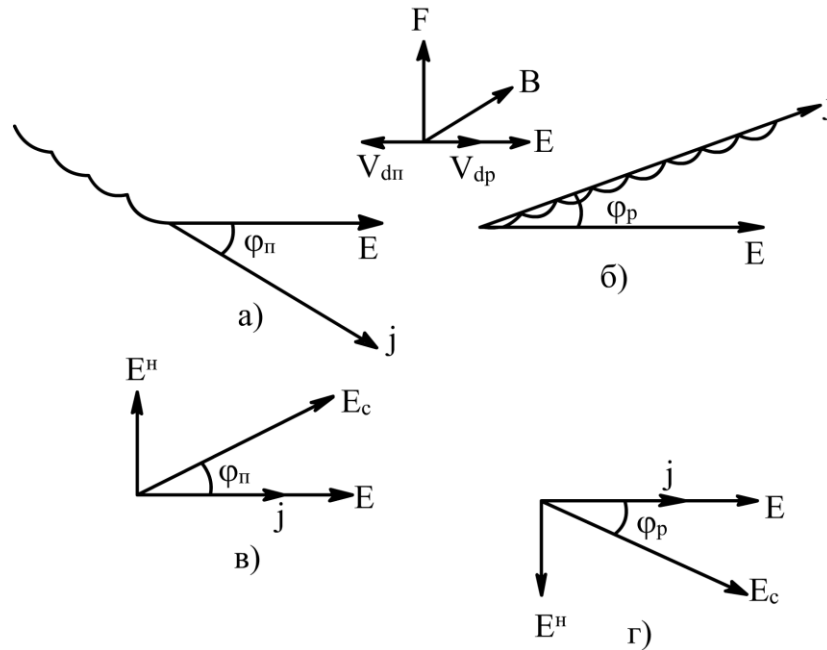


Рисунок 1.2. Ефект Холла в зразку: нескінченних розмірів (а, б); кінцевих розмірів (в, г) (а, в n - тип; б, г р - тип)

4. Напрямок поля Холла залежить від знака носія заряду.

$$tg\varphi = \frac{E^H}{E}, \text{ сумарне поле } \vec{E}_c = \vec{E} + \vec{E}^H$$

$$tg\varphi = \frac{E^H}{E} = -\frac{R \cdot B \cdot \sigma \cdot E}{E} = -R \cdot B \cdot \sigma = -\mu_d B \quad (1.4)$$

Хол знайшов емпіричне співвідношення:

$$E^H = R[\vec{B} \cdot \vec{j}] = -R[\vec{j} \cdot \vec{B}] = -R\sigma[\vec{E} \cdot \vec{B}] \quad (1.5)$$

5. Величину R можна знайти з умови компенсації полем Холла сили

Лоренца:

$$\vec{F}_H + \vec{F}_L = e\vec{E}^H + \vec{F}_L = 0$$

$$E^H = -\frac{1}{e}\vec{F}_L = -\frac{1}{e} \cdot e[\vec{v}_d \cdot \vec{B}] = -\mu_d[\vec{E} \cdot \vec{B}] = -R \cdot \sigma[\vec{E} \cdot \vec{B}] \quad (1.6)$$

Таким чином,

$$R = \frac{\mu_d}{\sigma} = \frac{1}{en} = \frac{E^H}{j \cdot B} = \frac{V^H}{b} \cdot \frac{b \cdot t}{l} \cdot \frac{1}{B} = \frac{V^H}{l \cdot B} \cdot t \quad (1,7)$$

де t і b - товщина і ширина зразка, відповідно. Коефіцієнт Холла обернено пропорційний концентрації носіїв заряду, а його знак збігається зі знаком носіїв заряду.

6. Запис механізму розсіювання носіїв заряду вимагає включення в (1.7) коефіцієнтів $A = \frac{3\pi}{8} = 1,17$ (акустичні фонони), $A = \frac{315\pi}{512} = 1,93$ (розсіювання на іонах), $A = 1$ (нейтральні домішки).

$$R = A \cdot \frac{1}{en} \quad (1,8)$$

Облік носіїв обох знаків у власному напівпровіднику зменшує R :

$$R = A \cdot \frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{2(\mu_p p + \mu_n n)^2} \quad (1,9)$$

7. Ефект Холла - непарний (по відношенню до \vec{B}) ефект, тобто при зміні напрямку поля \vec{B} змінюється також знак ефекту Холла.

При вимірюванні ефекту Холла варто врахувати сторонні ЕРС: 1) нееквідистантності електродів; 2) ефект Нернста - Еттінгсгаузена та інші.

Для мінімізації ступеня впливу струмових контактів на величину ефекту Холла використовують вузькі і довгі зразки.

Ефект Холла - прямий метод визначення n , μ і визначення ширини зон (ΔE) і енергії активації локальних рівнів. [2]

1.1.2. Датчики Холла

Перші пропозиції щодо використання технології ефекту Холла були висловлені на рубежі дев'ятнадцятого і двадцятого століть. Однак справжнє підґрунтя цієї ситуації виникла пізніше, тобто завдяки розвитку технології виробництва напівпровідникових матеріалів, що характеризуються значною рухливістю носіїв струму. До таких матеріалів належать: германій Ge, кремній Si, антимонід і арсенід індію InSb і InAs, арсенід - фосфід індію

InAsP, арсенід галію GaAs, селенід і телурид ртуті HgSe і HgTe. В останні роки в технологічних лабораторіях, було розроблено декілька нових матеріалів, наприклад, кадмій-ртуть-телур CdHgTe, арсенід кадмію Cd₃As₂, які також підходять для застосування ефекту Холла.

З розвитком технологій напівпровідникових матеріалів, в яких ефект Холла в значній мірі проявляється, досягнуто прогресу в області напівпровідникових приладів.

Вимоги до датчиків Холла змінюються залежно від їх використання. На сьогоднішній день немає матеріалу, який би володів усіма необхідними параметрами. Багато матеріалів відповідають лише певним вимогам. Тому, згідно з багатьма напівпровідниковими матеріалами, в яких спостерігається ефект Холла, для датчиків Холла той або інший матеріал вибирається в залежності від конкретного діапазону застосування датчика.

Як правило, для елементів Холла використовуються матеріали n-типу, тобто мають електронну провідність, оскільки рухливість носіїв у них кілька разів більша (від 2 до декількох разів), ніж в матеріалах p-типу. Основними параметрами напівпровідникового матеріалу, який використовується для виготовлення датчика Холла, є: питомий опір (іноді зручно використовувати питому електропровідність $\sigma = 1/\rho$), коефіцієнт Холла та рухливість. Всі ці параметри залежать від концентрації струму, температури та магнітної індукції, а також може виявлятися анізотропія цих залежностей. Крім того, існує багато ефектів, пов'язаних з ефектом Холла, таких як термо-ЕРС, гальвано- і термомагнітні ефекти.

Ідеальний датчик Холла повинен мати наступні властивості:

- 1) велика чутливість;
- 2) велика вихідна напруга;
- 3) високий ККД і велика потужність, що знімається з виводів датчика Холла;
- 4) незалежність параметрів від температури;
- 5) лінійність щодо I_x , B_z і R (активний опір навантаження).

Виходячи з характеристик напівпровідникових матеріалів, перелічені вимоги часто є спірними і не можуть одночасно виконуватись. Тому конструкція датчика Холла повинна виконуватися відповідно до його конкретного призначення, не звертаючи особливої уваги на менш важливі параметри і намагаючись отримати відповідні значення заданих параметрів.

Існують інші вимоги до багатьох конкретних застосувань, такі як:

- 1) мала товщина датчика Холла - в разі роботи у вузьких зазорах;
- 2) малі розміри активної поверхні - у випадку дослідження розподілу неоднорідності магнітного поля.[3]

1.1.3 Можливості застосування датчиків Холла

Багато переваг датчиків Холла дають можливість швидко і універсально розвивати датчики Холла, найважливішими з яких є:

1) датчик Холла є статичним компонентом, наприклад, він буде мати перевагу при виконанні вимірювань магнітної індукції, ніж за допомогою балістичних або індуктивних методів;

2) датчик Холла є спрямованим елементом, оскільки вихідна напруга пропорційна нормальній складовій вектора магнітної індукції, вона може визначати граничне значення і розподіл в просторі магнітного поля;

3) можуть бути виконані датчики Холла і рухомим елементом, що дає перевагу, у зв'язку з положеннями пункту 2, дозволяє побудувати, наприклад, генератор синусоїдальних коливань інфранізьких частот частот;

4) невелика площа поверхні (мінімальний розмір датчика кристала Холла становить $0,7 \times 0,7 \text{ мм}^2$, а плівкових порядку $10 \times 10 \text{ мкм}^2$), що в свою чергу, дає можливість проводити вимірювання в глибоких отворах малого діаметра;

5) товщина невелика (в кристалічному датчику Холла з корпусом - близько 1 мм, в плівці з підкладкою - близько 0,1 мм), що дозволяє вимірювати в дуже малих зазорах;

6) лінійна (у великій смузі) залежність вихідної напруги від величини керування (поля або струму);

7) проста залежність вихідної напруги від добутку двох вхідних величин;

8) Відсутність спотворень в передачі сигналу;

9) широкий діапазон частот переданого сигналу - теоретично від 0 до $\sim 10^{12}$ Гц;

10) безконтактна передача сигналів (за допомогою магнітного поля);

11) застосування керуючих полів і постійного, змінного або імпульсного струмів і отримання відповідної напруги або струму на виході, що дає можливість визначати, модулювати а потім отримувати вихідний сигнал відповідної форми та потужності, тобто перетворювати сигнал;

12) можливість різноманітних з'єднань датчиків Холла (послідовного і паралельного, послідовного і зустрічного, вхідними і вихідними ланцюгами, гальванічного або за допомогою магнітного поля);

13) відносно проста і малопотужна схема живлення (постійним, змінним або імпульсним струмом);

14) практично необмежений термін служби.

Основні недоліки:

1) відносно складна технологія (однорідність матеріалу, контакти);

2) параметри одного сенсора сильно відрізняються від інших з однієї партії датчиків Холла, що змушує визначати окремо характеристики кожного датчика і ускладнює взаємозамінність датчиків Холла;

3) залежність опору і коефіцієнта Холла від температури;

4) залежність опору і коефіцієнта Холла від магнітного поля;

5) наявність залишкової напруги, включаючи резистивну і термічну, а також напругу, що наводиться у виводах змінним полем;

6) нестабільність нуля, в результаті чого пп. 3.-5;

7) відсутність загального заземлення на вході і виході датчика Холла, що ускладнює його спільну роботу з ламповими (і транзисторними) схемами;

8) значення ККД є малим, проте цей недолік має значення лише в деяких випадках.

Однак, ці недоліки в достатньому для практичних рішень ступені можна усунути шляхом відповідного вибору електричних схем, систем компенсації і т. д.

Наприкінці 1964 р можна було перерахувати кілька десятків різних застосувань датчиків Холла у багатьох наукових і технічних областях.

Ці застосування можна систематизувати за деякими критеріями, а саме:

1. За характером мінливості величини керуючого струму I_x і магнітної індукції B :

- 1) $I_x = const$, а B - змінюється, при зміні магнітного поля;
- 2) $B = const$, а I_x - змінюється, в гіраторах;
- 3) I_x і B змінюються, при вимірах потужності.

2. За родом I_x B (постійний, змінний):

- 1) $I_{x-} B_- = U_{y-}$;
- 2) $I_{x\sim} B_- = U_{y\sim}$;
- 3) $I_{x-} B_{\sim} = U_{y\sim}$;
- 4) $I_{x\sim} B_{\sim} = U_{y-}$ або $U_{y\sim}$.

3. За відносним положенням датчика Холла щодо джерела магнітного поля:

по-перше, Датчик Холла стаціонарний, наприклад, в осерді при вимірюванні великих постійних струмів;;

по-друге, положення датчика Холла може бути довільно змінено, наприклад, при вимірюванні магнітного поля;

по-третє, датчик Холла обертається у магнітному полі або джерело поля (постійний магніт) обертається навколо датчика Холла, наприклад, у генераторах низькочастотних коливань;

по-четверте, датчик Холла або джерело магнітного поля рухається по прямій лінії, наприклад, в вимірювачі переміщень;

по-п'яте, датчик Холла або джерело поля коливаються, наприклад, при вимірюванні віброприскорень.

4. Залежно до конкретного застосування, як, наприклад:

- 1) вимір магнітної величини;
- 2) вимір електричних величин;
- 3) вимір неелектричних величин і т. д. [3]

1.1.4. Цифрові струмові датчики

Швидкодіючі струмові датчики можуть бути виготовлені з використанням цифрового виходу датчика Холла. Струмовий датчик включає електромагніт і сенсор Холла, об'єднані в одному корпусі. Струм, що проходить по котушці електромагніту, генерує магнітне поле, яке визначається датчиком Холла. Зовнішній сигнал змінює стан датчика, коли його величина перевищує деякий пороговий рівень. Цей зовнішній сигнал може використовуватися для сигналу тривоги або безпосередньо контролю його величини.

Робота струмого датчика заснована на використанні електромагніту для генерації магнітного поля. Магнітне поле генерується навколо провідника при проходженні по ньому струму. Щільність магнітного потоку пропорційна величині струму в провіднику. Якщо провідник виконаний у вигляді спіральної котушки, то магнітне поле сусідніх витків складається. В результаті магнітне поле спіральної котушки прямо пропорційне добутку кількості витків в котушці і струму через котушку.

Провідник, котушка або їх комбінація разом з магнітним матеріалом є електромагнітом. Магніти призначені для концентрації магнітного поля у вузькому зазорі, де і розташовується датчик Холла.

Датчик Холла з цифровим виходом працює, як показано на рисунку 1.3.

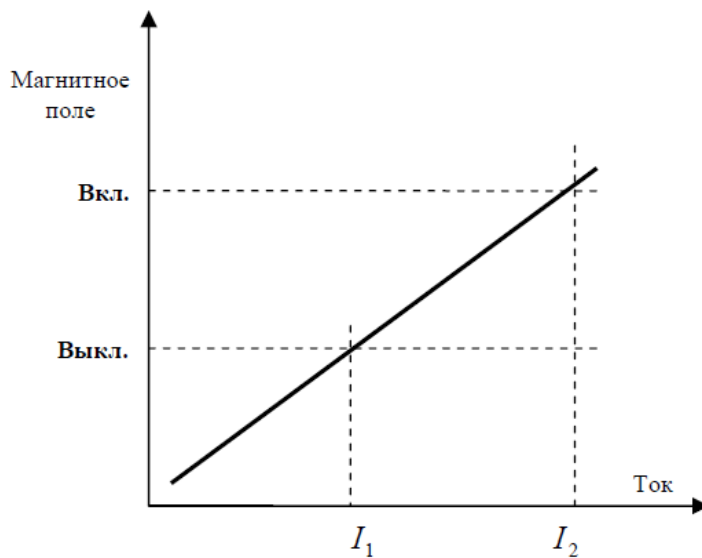


Рисунок 1.3 – характеристика роботи датчика Холла з цифровим виходом.

Датчик знаходиться в стані «включено», коли струм перевищує порогове значення I_2 і вимикається, коли струм падає нижче значення I_1 . В ідеальному випадку датчик включається в той момент, коли струм досягає значення I_2 . Однак, якщо струм змінюється швидко (з крутим фронтом), виникає вихровий струм (струм, наведений швидкою зміною щільності магнітного поля). У свою чергу цей струм генерує магнітне поле, протилежне по відношенню до поля від основного струму, що знижує загальну щільність магнітного поля, що вимірюється датчиком. В результаті має місце затримка між часом досягнення струмом порогового значення I_2 і часом включення датчика.[4]

Типові характеристики цифрових струмових датчиків Холла наведені в таблиці 1.1. Для датчика визначається струм вмикання і струм вимикання. Робочий струм датчика повинен перевищувати напругу вмикання. Опір котушки використовується для обчислення падіння напруги (внесених втрат) і потужності, що розсіюється на котушці. Температурна стабільність

використовується для обчислення зміни струму включення і виключення датчика в залежності від робочої температур

Таблиця 1.1 - типові характеристики цифрових струмових датчиків Холла

Струм вмикання	Мінімальний струм вмикання	Максимально допустимий робочий струм	Максимальний опір котушки	Температурна стабільність
5 ±0.25 А	3.8 А	20 А при 25 °С	0.005 Ом	±0.008 А/°С

1.1.5 Лінійні струмові датчики

Струмові датчики з аналоговим виходом можуть бути реалізовані з використанням лінійних сенсорів Холла. Струмовий датчик містить кільце з фериту або кременистої сталі і мікросхему датчика Холла, об'єднаних в єдиний корпус. Струм, що проходить через провідник, генерує магнітне поле. Магнітне кільце концентрує магнітний потік в області мікросхеми датчика Холла. Лінійна кореляція та ізоляція від вимірюваного струму роблять датчик лінійного струму ідеальною схемою для контролю двигуном.

Вихід інтегральної схеми датчика Холла пропорційний струму в провіднику, а вихідний лінійний сигнал точно відтворює форму вимірюваного струму.

Лінійний струмовий датчик визначає величину магнітного поля, створюваного струмом, що протікає, але не сам струм. Вимірюваний струм проходить кільце, що концентрує магнітний потік в області датчика Холла. Форма напруги на виході датчика Холла відповідає формі вимірюваного струму. Конструктивне виконання забезпечує ізоляцію датчика і гарантує нормальну роботу при великому струмі або високу напругу.

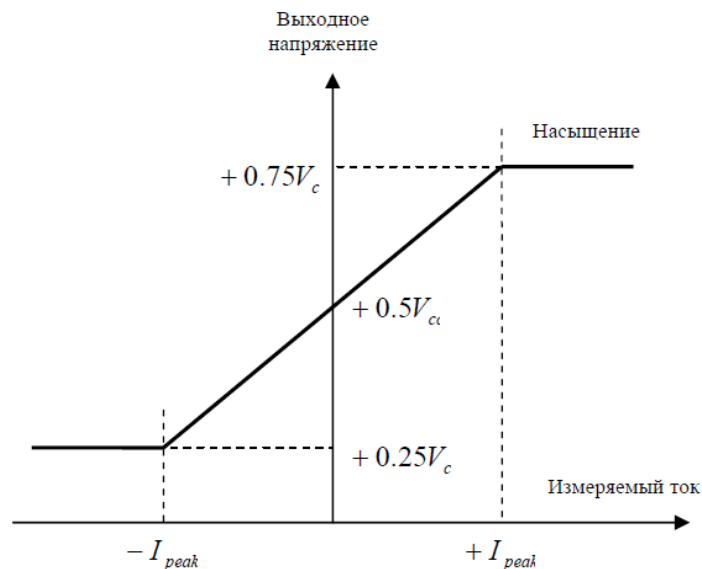


Рисунок 1.4 – характеристика роботи датчика Холла з аналоговим виходом.

Датчик Холла є пристроєм вимірювання співвідношень. Вихідна напруга датчика дорівнюватиме половині напруги живлення $V_{CC}/2$, коли вимірюваний в провіднику струм дорівнює нулю. Діапазон вихідної напруги становить від 25% до 75% від напруги живлення ($0.25V_{CC} < V_{OUT} < 0.75V_{CC}$). Коли струм протікає в одному напрямку, вихідна напруга підвищується від $V_{CC}/2$ до $0.75V_{CC}$. Коли струм протікає в протилежному напрямку, вихідна напруга знижується до $0.25V_{CC}$.

Струмові датчики слід використовувати в області значень, близьких до максимальних, тому що це зменшує вплив шумів. Для підвищення вимірюваного струму до рівня, близького до максимального, необхідно збільшувати число витків провідника навколо сердечника. Наприклад, датчик на 50А пікового значення струму може бути використаний для вимірювання пікового струму через провідник величиною до 10А, якщо провідник має п'ять витків навколо сердечника. Зміна розташування провідника на осерді не вносить великих похибок у вимірювання. Чутливість датчика також підвищується зі збільшенням кількості витків провідника навколо сердечника.

Як і будь-який датчик Холла, струмовий датчик залежить від температури. Лінійний датчик має залежність від температури середньої вихідної напруги і чутливості. Типовим для датчиків є величина температурного коефіцієнта зсуву середньої напруги від ± 0.02 до ± 0.05 $\%/^{\circ}\text{C}$, температурний коефіцієнт чутливості приблизно ± 0.03 $\%/^{\circ}\text{C}$.

Сердечник зазвичай виготовляється з фериту або кремнієвої сталі. Матеріал вибирається виходячи з параметрів насичення. При деякому значенні струму матеріал сердечника не може підтримувати подальше збільшення магнітного потоку і настає насичення. Коли це відбувається, датчик не забезпечує підвищення вихідної напруги при збільшенні напруженості магнітного поля. На точку насичення впливає величина повітряного зазору в сердечнику. Змінюючи величину цього зазору, можна змінювати величину струму, яка призводить до насичення.

Типові характеристики лінійного струмового датчика Холла наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - характеристики лінійного струмового датчика Холла

Напруга живлення	Струм споживання	Величина середньої напруги	Зрушення середньої напруги	Час відгуку
6 ... 12В	20мА	$0.5V_{CC}$	± 0.02 %	3мкс

1.2 Огляд схемних рішень для вимірювання струму

1.2.1 Вимірювання струму в негативному полюсі навантаження

Схема вимірювання струму в негативному полюсі навантаження найбільш проста і широко поширена. Дану схему можна зустріти як в лабораторних блоках живлення, так і в схемах управління двигунами, схемах захистів тощо. Якщо не потрібна висока точність вимірювання струму,

використовується схема 1а, для більш точного вимірювання струму, як правило, використовується схема 1б.

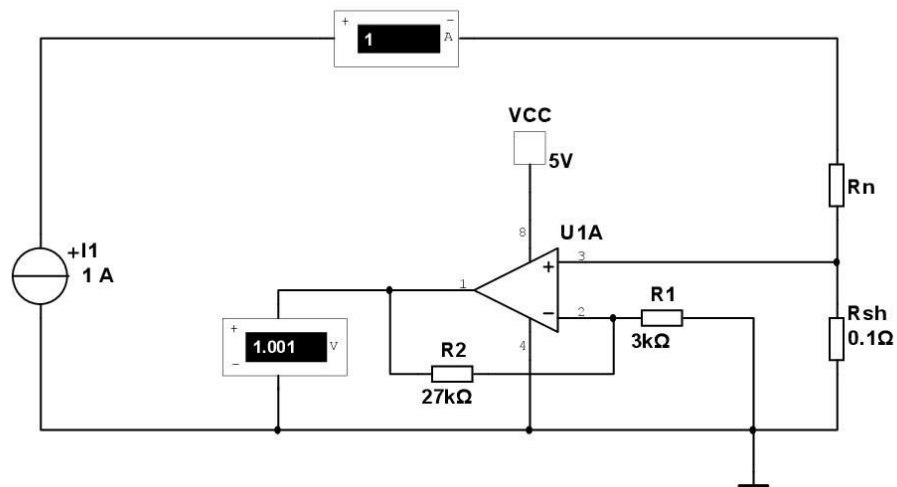


Рисунок 1.5 – схема 1а

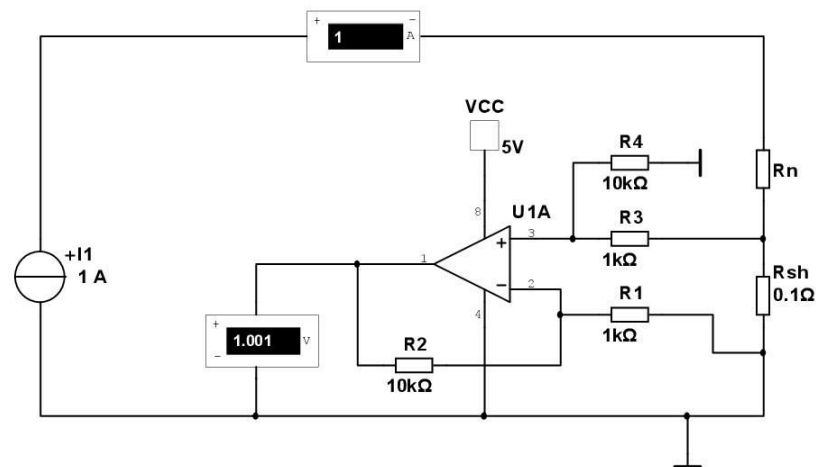


Рисунок 1.6 – схема 1б

У схемі 1б резистор R4 підключається до сигнальної аналогової землі, резистори R3 і R1 підключаються безпосередньо до шунта. Опір резисторів R1 і R3, R2 і R4 має бути однаковим.

Переваги схеми:

- проста реалізація;

- низький рівень синфазного сигналу;
- низький вихідний опір;
- широкий діапазон напруг живлення навантаження;
- низька вартість.

Недолік у даної схеми один - струмовимірювальний резистор (шунт) встановлюється в негативному полюсі навантаження, що накладає певні обмеження.

Крутизна вихідного сигналу схеми 1а визначається за формулою:

$$K_{1a} = R_{sh} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (1.10)$$

Крутизна вихідного сигналу схеми 1б визначається за формулою:

$$K_{1b} = R_{sh} \frac{R_2}{R_1} \quad (1.11)$$

У схемах з однополярним живленням коли потрібна висока точність вимірювань, крім посилення сигналу з шунта потрібно його невелике зміщення. Розглянемо цей момент детальніше.

При однополярному живленні отримати на виході операційного підсилювача (ОП) нульовий потенціал досить складно, навіть при використанні дорогих Rail-to-rail ОП мінімальна напруга на виході може становити десятки і сотні мілівольт. Оскільки напруга на виході ОП не опускається до нуля, то ми не може коректно вимірювати струм при близьких до нуля значеннях, діапазон виміру виявляється «зарізаний» на величину мінімальної вихідної напруги.[5]

На схемах 2а і 2б наведено допрацьовану схему 1б зі зміщенням вихідного сигналу.

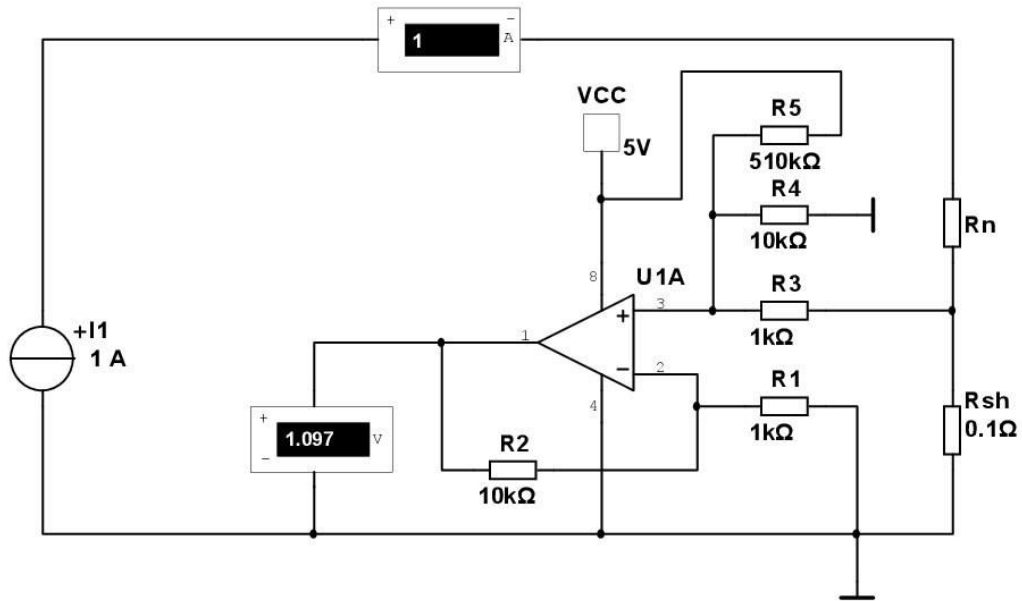


Рисунок 1.7 – схема 2а

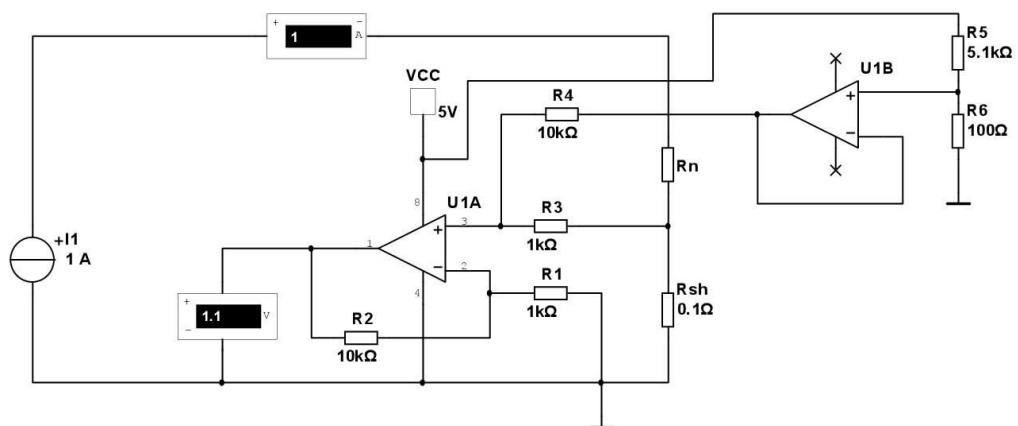


Рисунок 1.8 – схема 2б

Варіант 2б складніше, але дає трохи більш високу точність, крім того він може виявитися більш зручним якщо в пристрої кілька вимірювальних каналів, в цьому випадку ОП U1B формує єдине зміщення на всі канали.

У схемах 2а і 2б резистор R5 необхідно підключати до джерела опорної напруги, якщо він є.

Зсув вихідного сигналу схеми 2а визначається за формулою:

$$dI_{1a} = U_{ref} \left(1 + \frac{R5}{R3}\right) \frac{R2}{R1} \quad (1.12)$$

Зсув вихідного сигналу схеми 2б визначається за формулою:

$$dI_{1b} = U_{ref} \left(1 + \frac{R5}{R3}\right) \quad (1.13)$$

У формулах (3) і (4) U_{ref} – це напруга до якої підключається R5.

1.2.2 Вимірювання струму в позитивному полюсі навантаження

Вимірювання струму в позитивному полюсі навантаження є кращим, але це більш складне завдання. Найбільш поширені схеми вимірювання струму в позитивному полюсі навантаження наведені нижче.

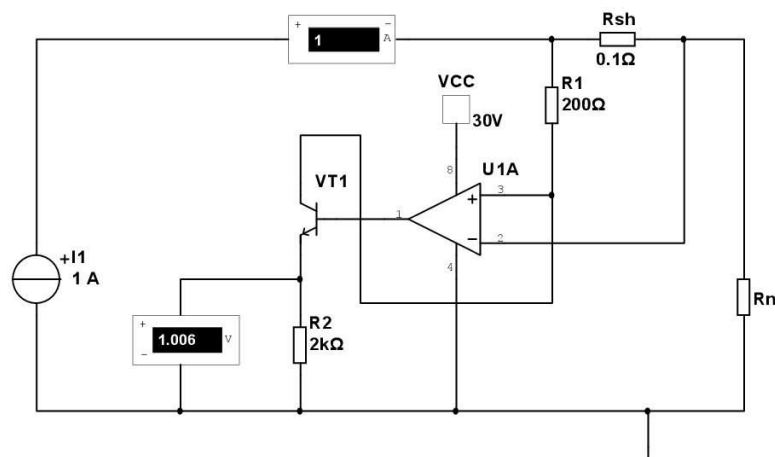


Рисунок 1.9 – схема 3а

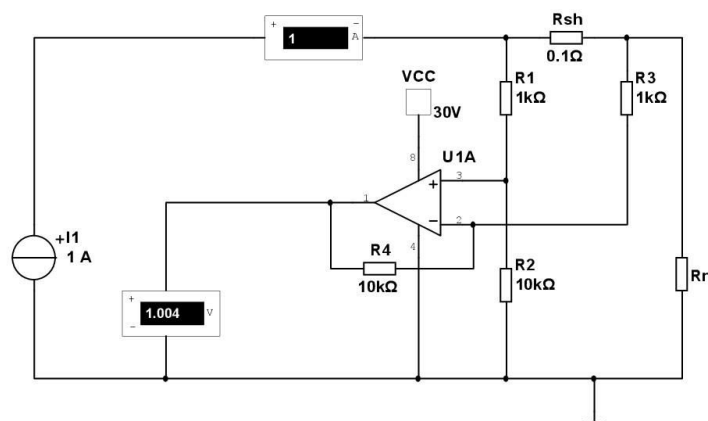


Рисунок 1.10 – схема 3б

Переваги схеми 3а:

- вимірювання струму в позитивному полюсі навантаження;
- вихідний сигнал від 0В.

Недоліки схеми 3а:

- високий рівень синфазного сигналу;
- високий вихідний опір.

Переваги схеми 3б:

- вимірювання струму в позитивному полюсі навантаження;
- низький вихідний опір.

Недоліки схеми 3б:

- високий рівень синфазного сигналу;
- необхідність точного підбору резисторів;
- необхідність зміщення вихідного сигналу при однополярному живленні.

У схемі 3б аналогічно схемі 1б, резистори R1 і R3, R2 і R4 повинні бути рівні.

Крутизна вихідного сигналу схеми 3а і 3б визначається за формулою:

$$K_{3a} = R_{sh} \frac{R2}{R1} \quad (1.14)$$

Загальним і істотним недоліком схем 3а і 3б є високий рівень синфазного сигналу близький до напруги на навантаженні, через це діапазон допустимих напружень на навантаженні обмежений напругою живлення ОП. Існують ОП допустимий рівень синфазного сигналу яких може істотно перевищувати напругу живлення ОП, наприклад LT1637, але такі ОП важкодоступні і дорогі.

Високий рівень синфазного сигналу призводить до суттєвої похибки при використанні недорогих ОП. Типовий рівень ослаблення синфазного сигналу недорогих ОП на рівні 80Дб, що дає похибку 1мВ на вході ОП на кожні 10В напруги на навантаженні, похибка на вході ОП посилюється на величину коефіцієнта підсилення схеми ($R2 / R1$).

Для схеми 3б ситуація з ослабленням синфазного сигналу виявляється ще гірше через неузгодженість опору резисторів, так при використанні 1% резисторів коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу перебуває на рівні 45Дб, що дає похибку 56мВ на вході ОП на кожні 10В напруги на навантаженні.

Втім не все так погано, дані схеми випускаються в інтегральному виконанні і називаються струмовими моніторами, наприклад INA225, INA169 та ін. В цих мікросхемах використовуються високоякісні ОП і точна підгонка опору резисторів, завдяки чому коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу 100дБ і більше, крім того у них розширено діапазон допустимих синфазних напруг.

1.2.3 Струмовимірювальний резистор (шунт)

Всі описані схеми підсилюють сигнал з струмовимірювального резистора (шунта) і природно, що точність вимірювання струму залежить і від якості шунта.

Найкраще для виготовлення шунтів підходить манганін (дріт і стрічка), перевага манганіну в тому, що він має дуже низький температурний коефіцієнт опору (ТКО) на рівні 10-20 ppm / C і низьке значення термоЕРС з міддю.

Трохи гірше в плані ТКО константан 30 ppm / C, але він має відносно високе значення термоЕРС з міддю, що призводить до додаткової похибки

при вимірюванні. Похибка від термоЕРС незначна і при вирішенні системи на рівні 12 біт практично не помітна.

Найгірше в плані ТКО дротяні резистори типу КНР (циліндричні) і типу SQP (прямокутні), що мають ТКО 400 ppm / C і 300 ppm / C відповідно. Навіть звичайні вивідні металоплівкові резистори кращі та мають ТКО 100 ppm / C.

Низький ТКО для шунта важливий тому, що при протіканні через нього великого струму він сильно нагрівається, температура перегріву шунта може становити 20 і більше градусів. Якщо шунт з манганіну, то зміна температури на 20 градусів призведе до зміни опору шунта всього на 0,02-0,04%, зміна опору дротяного резистора складе 0,6-0,8%, металоплівкового 0,2%.

1.3 Принцип дії MOSFET транзистора та його застосування у вимірювальних системах

1.3.1 Польовий транзистор

Польовий транзистор - це напівпровідниковий пристрій з трьома електродами: витік, стік і затвор. Канал, через який протікає струм транзистора, забезпечується між виток і сток в напівпровідниковому кристалі, з якого виготовлений польовий транзистор. Канал виготовляється з напівпровідника одного типу - n або p. Струм, що протікає по каналу, контролюється зміною електропровідності каналу в залежності від напруги між затвором і стоком. На відміну від біполярних транзисторів, в яких струм від емітера до колектора проходить по черзі через два pn переходи, струм в польовому транзисторі протікає через канал, що утворюється в напівпровіднику одного типу провідності і не протікає через pn-перехід. Оскільки напрямок струму в польовому транзисторі - від виток - через канал - до стоку, а керування струму виконується напругою між затвором і стоком, витік відповідає емітеру біполярного транзистора: стік - колектору, а затвор - базі.[6]

Існує два способи зміни провідності каналу. Згідно з цим, польові транзистори діляться на два основних типи: транзистори з керованим переходом та транзистори з ізольованим затвором.

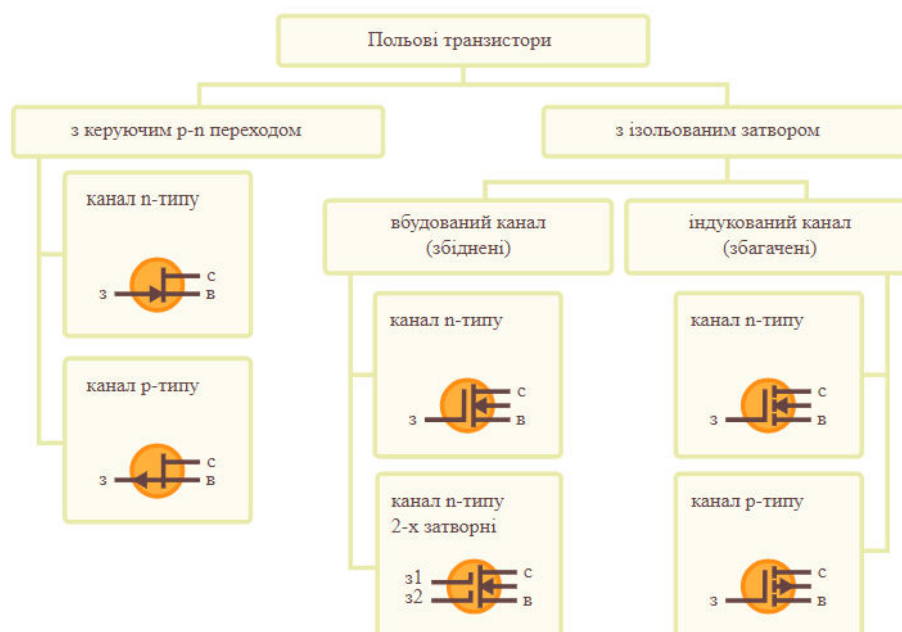


Рисунок 1.11 – види польових транзисторів

Друга назва, що зустрічається при описанні польових транзисторів - це МОП (метал - оксид - напівпровідник). Це пояснюється тим, що в якості діелектрика використовують окис кремнію (SiO_2). Інша, доволі поширена назва - МДП.

MOSFET – скорочення, що виникло від двох англійських словосполучень: Metal-Oxide-Semiconductor (метал - оксид - напівпровідник) та Field-Effect-Transistors (транзистор, що керується за допомогою електричного поля). Тому MOSFET - це не що інше, ніж звичайний МОП-транзистор.

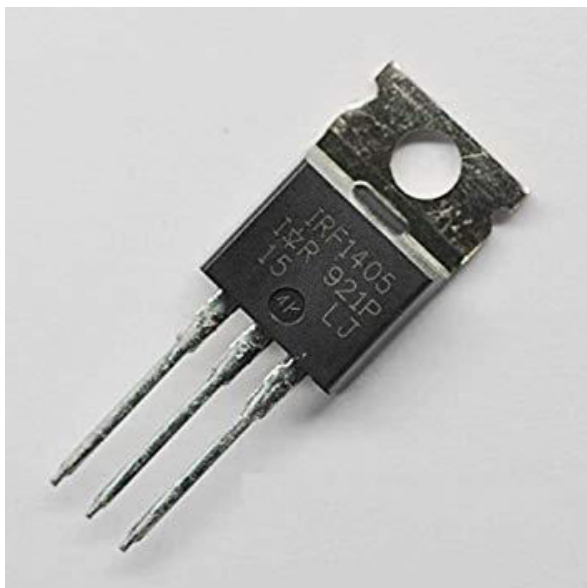


Рисунок 1.12 – польовий транзистор у корпусі TO-220

Варто пам'ятати, що J-FET (Junction - перехід) застосовується разом зі скороченням MOSFET. Транзистори J-FET також керуються електричним полем, але їх управління відбувається за допомогою керуючого p-n переходу. На відміну від MOSFET, структура J-FET трохи відрізняється.

1.3.2 Принцип дії польового транзистора

Суть роботи польового транзистора полягає в можливості управління струмом що протікає через нього за допомогою електричного поля (напруги). Цим він вигідно відрізняється від транзисторів біполярного типу, де управління великим вихідним струмом здійснюється за допомогою малого вхідного струму.[7]

Погляньмо на спрощену модель польового транзистора з ізольованим затвором (Рисунок). Оскільки МОП транзистори бувають з різним типом провідності (n або p), то на малюнку зображений польовий транзистор n-типу.

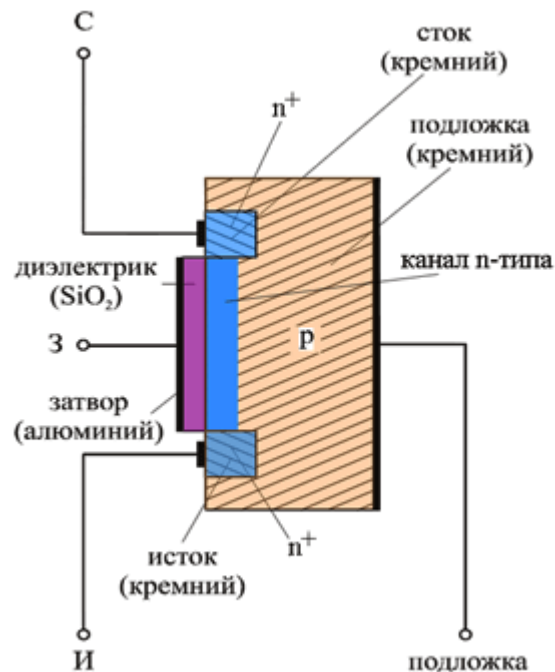


Рисунок 1.13 – спрощена модель польового транзистора

Основою транзистора типу МДП є:

- Кремнієва підкладка. Підкладка може бути напівпровідником р-типу або n-типу. У випадку, коли підкладка р-типу, тоді у напівпровіднику, в більшій мірі присутні позитивні заряди у вузлах кристалічної кремнієвої решітки. Якщо підкладка має n-тип, то у напівпровіднику переважають негативно заряджені атоми та вільні електрони. В обох випадках утворення напівпровідника р або n-типу досягається шляхом введення домішок.
- Області напівпровідника n +. Ці області багаті вільними електронами (отже, "+"), що досягається введенням домішок у напівпровідник. До цих ділянок під'єднані електроди витоку і стоку.

Діелектрик. Він ізолює електрод затвора від кремнієвої підкладки. Сам діелектрик виконаний з оксиду кремнію (SiO_2). Електрод затвора - Керуючий електрод з'єднаний з діелектричною поверхнею.

Тепер, в двох словах, ми опишемо, як він працює.

Якщо напруга подається між затвором і витоком плюсом (+) на електрод затвора, між виводом затвора і підкладкою утворюється поперечне електричне поле. Вона починає притягати до приповерхневого шару вільні електрони, при цьому невелика кількість вільних електронів знаходиться в кремнієвій підкладці.

В результаті в приповерхневому шарі накопичується достатня кількість електронів, і утворюється канал, що називається областю провідності. На зображенні канал відображається синім кольором. Канал n-типу, це означає, що він складається з електронів. Як бачимо між витоком і стоком, та їх областями n+ утворюється "міст", який проводиться струм.

Струм починає протікати між витоком та стоком. Тому провідність польового транзистора контролюється за рахунок зовнішньої керуючої напруги. Якщо зняти керуючу напругу із затвора, провідний канал у приповерхневому шарі зникає і транзистор зачиняється - тим самим, зупиняючи потік струму. Слід зазначити, що на спрощеній моделі зображено польовий транзистор з каналом n-типу. Є також транзистори p-типу.

Показана модель дуже спрощена. Фактично, пристрої сучасних МОП-транзисторів набагато складніші. Але, незважаючи на це, спрощена модель чітко і просто показує ідею, що закладена в цей пристрій.

Окрім цього, транзистори з ізолюваним затвором є збагаченого та збідненого типів. На рисунку зображено польовий транзистор збагаченого типу- де канал "збагачується" електронами. У збіднених транзисторах в області каналу вже наявні електрони, тому він пропускає струм без напруги управління на затворі. Вольт-амперні характеристики збіднених і збагачених транзисторів сильно відрізняються.

Легко помітити, що електрод затвора і підкладка разом з діелектриком, який розташований між ними утворюють конденсатор. Обкладками служать електрод затвора і область підкладки, а ізолятор між цими електродами -

діелектрик з оксиду кремнію (SiO_2). Отже, у транзистора є значний параметр, що називається ємністю затвора.

Польові транзистори мають більш високий вхідний опір, ніж біполярні транзистори, який можуть досягати 10^9 Ом або вище. Ця особливість дозволяє розглядати їх, як пристрої що керуються потенціалом, по-іншому - напругою. Сьогодні це найкращий вибір для створення схем з відносно низьким енергоспоживанням у статичному режимі. Ця умова особливо актуальна для статичних схем пам'яті з великою кількістю комірок пам'яті.

Якщо говорити про ключові режими роботи транзистора, то в цьому випадку біполярні транзистори показують кращу продуктивність, оскільки падіння напруги на ПТ є дуже значним, що знижує загальну ефективність всієї схеми. Однак у зв'язку з розвитком напівпровідникових технологій нам також вдалося позбутися цієї проблеми. Сучасні конструкції мають низький опір каналу і добре працюють на високих частотах.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Розробка пристрою лінійної розгортки струму для динамічного вимірювання струму із моделюванням в EWB Multisim

Важливість серійного одержання ВАХ спонукає до пошуку нових методів її автоматичного вимірювання на основі універсальних інформаційних і вимірювальних засобів, до яких належать цифровий осцилограф та ПК. У цьому випадку, ВАХ можна спостерігати безпосередньо на дисплеї осцилографа і зберігати у вигляді таблиць або рисунків в пам'яті типу flash (модуль flash-пам'яті є конструктивною складовою осцилографу), а потім, за потреби, додатково обробляти на персональному комп'ютері.

Структурна схема запропонованого методу вимірювання ВАХ СБ наведена на рис. 2.1.

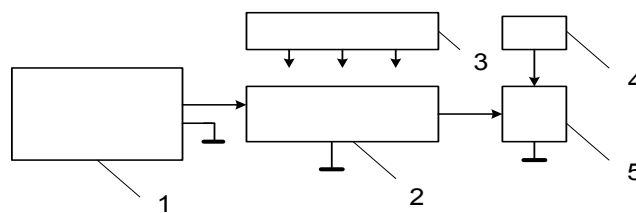


Рисунок 2.1 – Структурна схема методу вимірювання ВАХ: 1 – цифровий осцилограф Tektronix 1002, 2 – СБ, 3 – імітатор сонячного випромінювання, 4 – генератор імпульсів управління, 5 – комутаційний пристрій на основі потужного транзистора MOSFET та котушки індуктивності

Згідно з цією схемою (рис. 2.1) спосіб вимірювання ВАХ полягає у подачі одиночного імпульсу або серії імпульсів управління на комутаційний пристрій. У цьому випадку, опромінена імітатором СБ, через транзистор і послідовно з'єднаною із ним котушкою індуктивності замикається на корпус.

Струм у комутаційному пристрої зростатиме поступово (спершу – наближено до лінійного закону), оскільки в колі наявна котушка індуктивності. Необхідно задати величину індуктивності та час тривалості процесу вимірювання, щоб струм мав максимально наближену до лінійної

функції залежність від часу. Таким чином, комутаційний пристрій має виконувати лінійну у часі розгортку струму. В цьому випадку на дисплеї осцилографа ми отримаємо осцилограму ВАХ, де по горизонтальній осі фактично відкладено струм СБ, що лінійно зростає (розгорнення осцилографу по горизонтальній осі передбачає зміну часу, а по вертикальній осі передбачає зміну напруги). По вертикальній осі осцилограми буде фіксуватись зміна напруги СБ. Відмінність отриманої ВАХ від її стандартної форми полягає у переміні місцями осі струму та осі напруги (Рис. 2.2).

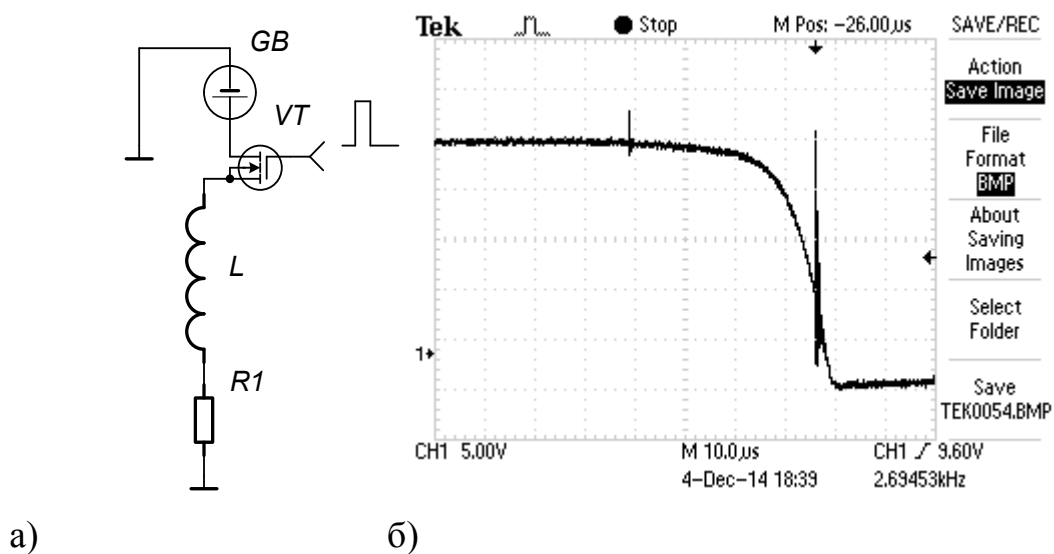


Рисунок 2.2, а) – Схема кола розгортки: GB – СБ; L – котушка індуктивності; $R1$ – резистор для вимірювання струму; б) – Осцилограма, яка відображає ВАХ СБ із полікристалічного кремнію потужністю 60 Вт

По осі часу (горизонтальній) на рисунку 2.2,б) відкладено струм, по вертикальній осі – напругу. В результаті ми отримуємо візуальне спостереження за ВАХ. Для збереження ВАХ у формі таблиці в пам'яті типу Flash використовують відповідну опцію програмного забезпечення (ПЗ) осцилографу. Таким чином, можлива подальша математична обробка отриманої ВАХ.

На рис. 2.3 та рис. 2.4 показано ВАХ в координатах I-U та U-I відповідно, які було розраховані за табличними даними з використанням фільтрації.

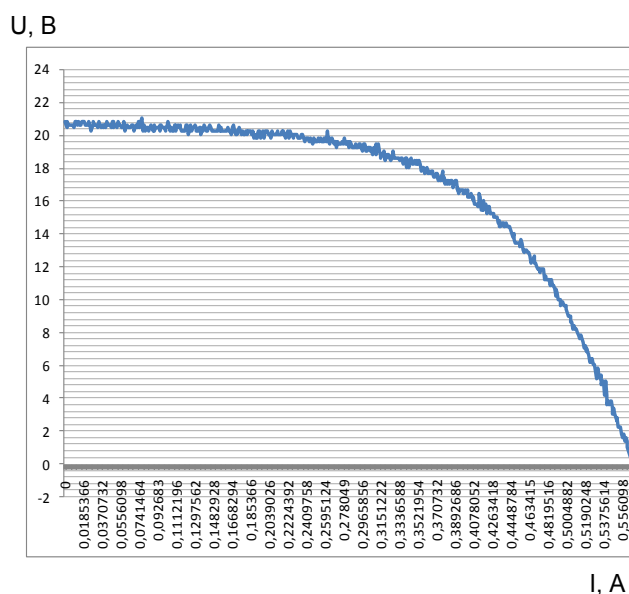


Рисунок 2.3 – Розрахована ВАХ СБ потужністю 60 Вт в координатах I-U

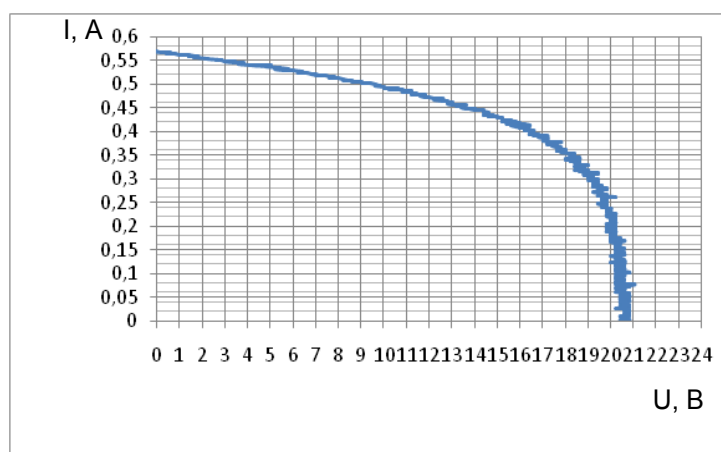


Рисунок 2.4 – Розрахована ВАХ СБ потужністю 60Вт в координатах U-I

Розглянемо побудову математичної моделі для вимірювання ВАХ СБ на основі приладу для лінійного розгорнення струму. Огляд імпульсних методів вимірювання ВАХ [25-27] дозволяє зробити висновок про наявність схем з розгорткою напруги (пилкоподібної, синусоїдної, послідовності імпульсів зі зростанням амплітуди). У даній роботі було запропоновано [28, 29] використати лінійне розгорнення струму для вимірювання ВАХ СБ.

Принцип вимірювання ґрунтується на використанні перехідного процесу, що виникає у колі навантаження СБ при її короткому замиканні ключем через дросель. До схеми додано також послідовний опір, що дорівнює сумі опору вимірювального шунта та опору ключа, що призначений для незалежного вимірювання струму через додатковий канал (рис. 2.5).

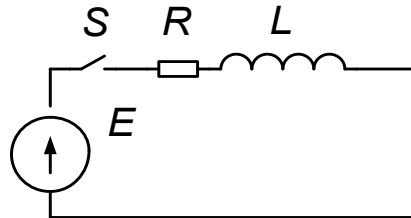


Рисунок 2.5 – Схема моделі R, L методу лінійного розгорнення струму; E – СБ, S – ключ, R – опір ключа та шунта, L – дросель

Запропонований метод використовує початок перехідного процесу під час короткого замикання СБ через MOSFET транзистор та дросель. За першим законом комутації, що виходить із законів Кірхгофа для електричних кіл, на котушці індуктивності після комутації струм зберігає значення, яке він мав безпосередньо перед комутацією. Тобто струм не може змінюватись стрибком через котушку індуктивності. Диференціальне рівняння при вмиканні RL – кола на постійну напругу U є неоднорідним:

$$Ri + Ldi/dt = U \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1) має рішення у вигляді суми встановленої та вільної складових:

$$i = i_{\text{вст}} + i_{\text{в}} \quad (2.2)$$

Перша складова виглядає так:

$$i_{\text{вст}} = U/R \quad (2.3)$$

Друга складова дорівнює:

$$i_{\text{в}} = -(U/R)e^{-t/\tau}, \quad (2.4)$$

де $\tau = L/R$.

Таким чином, повне рішення диференціального рівняння (1.1) виглядає так:

$$i = U/R(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.5)$$

Виконаємо розрахунок струму в залежності від часу для типових параметрів схеми: $U = 22,9$ В; $R = 0,058$ Ом; $L = 8,23$ мкГн. При цьому інтервал часу задаємо від 0 до 200 мкс, що відповідає частоті вимірювальних імпульсів 2,69 кГц та шпаруватості 10 (рис. 2.2).

Стала часу $\tau = L/R$, або $\tau = 8,23$ мкГн/ $0,058$ Ом = $142 \cdot 10^{-6}$ с = 142 мкс. Встановлений струм $i_{\text{вст}} = U/R$, або $i = 22,9/0,058 = 394,8$ А. Звичайно, такий великий струм, теоретично є можливим і може протікати тільки при умові підключення кола до джерела напруги (ЕРС) із нескінченно великим струмом. В реальних умовах він обмежений струмом короткого замикання СБ і не перевищує 20 А.

Дані розрахунку залежності струму від часу в моделі R, L наведені у таблиці 2.1 з інтервалом у 25 мкс.

Таблиця 2.1. – Розрахунок залежності струму від часу в моделі R,L

t, мкс	0	25	50	75	100	125	150	175	200
t/τ	0	0,176	0,352	0,529	0,705	0,881	1,057	1,233	1,409
$1 - e^{-t/\tau}$	0	0,1615	0,296	0,410	0,506	0,586	0,653	0,709	0,756
i, А	0	63,8	116,9	161,9	199,8	231,2	257,6	279,8	298,4

Отримана залежність струму від часу наведена на рис. 2.6.

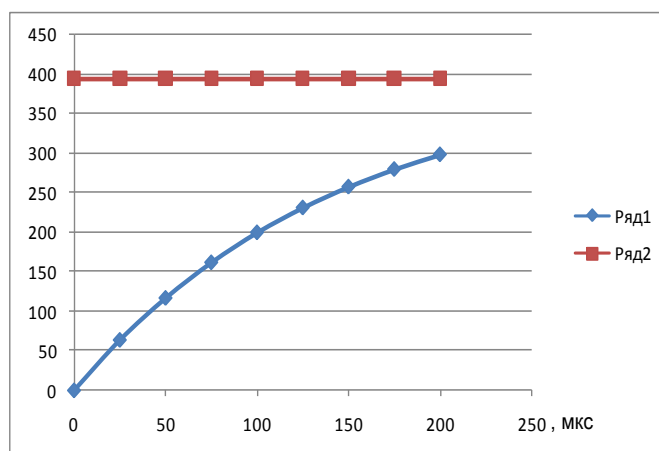


Рисунок 2.6 - Залежність струму від часу (в А) моделі R, L: ряд 1 - вільний струм, ряд 2 - сталий струм

Найбільш близьке врахування залежності (рис. 2.6) показує, що в першому інтервалі часу (від 0 до 25 мкс) воно близьке до прямої, що дає можливість виконувати лінійну розгортку струму в цей інтервал часу, в якому отримано керуючий імпульс на затвор MOSFET-транзистора.

Коли СБ струм досягає свого максимального значення, ми обмежуємо час розгортання до часу t_p , який дорівнює струму короткого замикання $I_{кз}$ (рис. 2.7). Зауважимо, що оскільки СБ не є джерелом напруги на всьому діапазоні струму, то залежність не може бути виконана з низьким опором ключа і вимірювального шунта (2.4). Насправді, при малих струмах, СБ може бути представлений як джерело напруги. Цей режим близький до режиму ХХ і напруга СБ не залежить від струму в колі навантаження.

І навпаки, в режимі, близькому до короткого замикання, СБ стає джерелом струму, і струм тут не залежить від напруги.

У координатах напруга-струм ідеалізована ВАХ стає прямокутником, де горизонтальна ланка являє собою джерело напруги, а вертикальна - джерело струму.

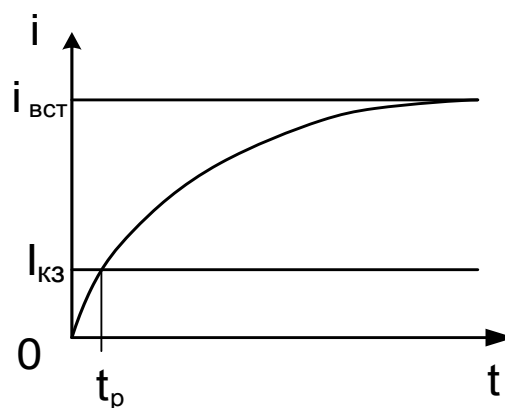


Рис. 2.7 – Принцип обмеження часу розгортки струму СБ

Якщо поточний час розгортки обмежений, як показано на малюнку 2.7, може бути охоплено весь діапазон струму СБ лінійної ланки залежності часу (2.5). Лінеаризація розгортки передбачає вибір параметрів R , L , t за критеріями мінімального відхилення (2.5) від прямої. Форма цієї прямої

отримана шляхом розкладання формули (2.5) в ряду Тейлора навколо точки $t = 0$:

$$i = (U/R)((1 - Rt/L + 1/2(Rt/L)^2 + \dots)) \quad (2.6)$$

При $Rt/L = 0,176$ (за прикладом в Таблиці 1, час $t = 25$ мкс), другий член розкладу рівняння за формулою (2.6):

$$1/2(Rt/L)^2 = 0,015, \text{ тобто його внесок не перевищує } 1,5\%.$$

Тому ми можемо обмежитися першим членом ряду Тейлора:

$$i = (U/R)Rt/L = Ut/L \quad (2.7)$$

Продиференціюємо вираз (2.7) з часом і отримуємо формулу для поточної швидкості розгортки:

$$di/dt = U_1/L \quad (2.8)$$

Оскільки струм лінійний i , напруга U_1 в рівнянні (2.8) буде мати постійне значення.

Тут виходить майже важливий результат: швидкість струму di/dt не залежить від опору ключа і вимірювального шунта, але визначається тільки індуктивністю L . У цьому випадку напруга U_1 є постійною. Ми оцінюватимемо це з реальної ВАХ (Рис. 2.8).

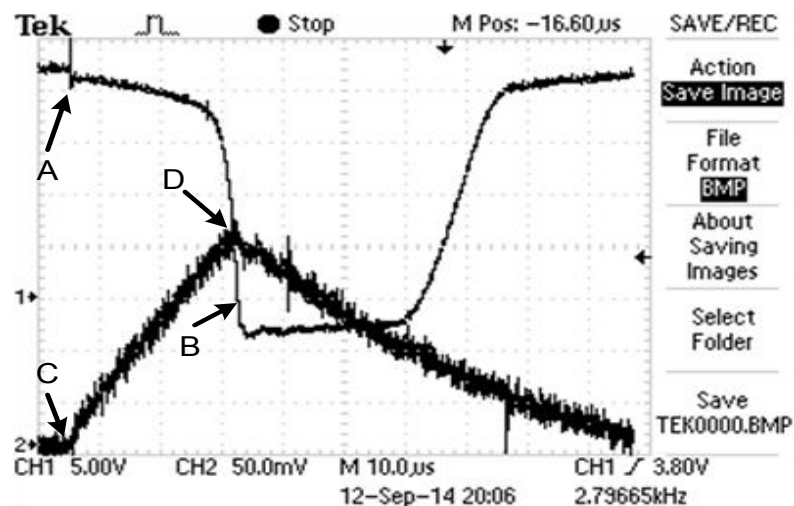


Рисунок 2.8 - Осцилограма лінійного розгорнення струму СБ: канал 1 - вимірювання струму на шунті R , канал 2 - вимірювання напруги СБ, А - початкова точка ВАХ (точка холостого ходу), В - кінцева точка ВАХ (точка короткого замикання), С - початок розгортки струму, D - час закінчення розгортки

Тривалість розгортки ВАХ становить 6,3 мкс (рис. 2.8). Коли струм короткого замикання становить 0,36А, швидкість розгортки становить $0,36 / 6,3 = 0,057$ А / мкс. Тоді напруга U_1 згідно (2.8) дорівнює:

$$U_1 = L \cdot di/dt \quad (2.9)$$

Для параметрів ВАХ (рис. 2.8) $U_1 = 17,7 \cdot 0,057 = 1,01$ В. Як бачимо, значення сталої U_1 розгортки ВАХ знаходиться в діапазоні, який наближено до точки короткого замикання СБ.

Лінійність залежності струму від часу підтверджується на осцилограмі (рис. 2.8).

Нами запропоновано в якості ключа використовувати швидкий та потужний MOSFET транзистор типу IR1010N від компанії International Rectifier, струм комутації сягає 47 А, опір у відкритому стані якого дорівнює 11 мОм, а час спрацювання не перевищує 40 нс. Параметри цього і інших MOSFET транзисторів із серії IRF задовольняють вимоги до ключа щодо потужності та швидкодії з запасом у 3-5 раз для всіх наявних на сьогодні типів СБ.

Для опору ключа та шунта 0,05 Ом і часу розгортки 5 мкс наведемо величину відхилення струму, обчисленого за формулою (2.5), від лінійної залежності (6). Дані розрахунку наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок відносної похибки лінеаризації напруги

L, мкГн	$A = 1 - e^{-Rt/L}$	$B = Rt/L$	$\Delta = A-B $	$\Delta \cdot 100\%$
10	0,02531	0,02500	0,00031	1,24
20	0,01258	0,01250	0,00008	0,64
40	0,00627	0,00625	0,00002	0,32

Таким чином, для заданої відносної похибки 1% лінеаризації дані вимірювань можуть бути використані відразу після прийому без додаткової корекції.

Мінімальна кількість апаратних засобів для простих пристроїв лінійної розгортки струму СБ на мікросхемі КМОП-логіки (рис. 2.9). У той же час генератор імпульсів розгортки реалізований на таймері NE555, і на МК AVR ATmega 16.

Варіант схеми генератора на МК AVR ATmega 16 має переваги в плані компактності та економії енергії, але його вихідний сигнал обмежений амплітудою лише у 5В, що знижує динамічні параметри ключа транзистора на 20-40%, особливо час вмикання, у порівнянні зі стандартною амплітудою на затворі у 10В.

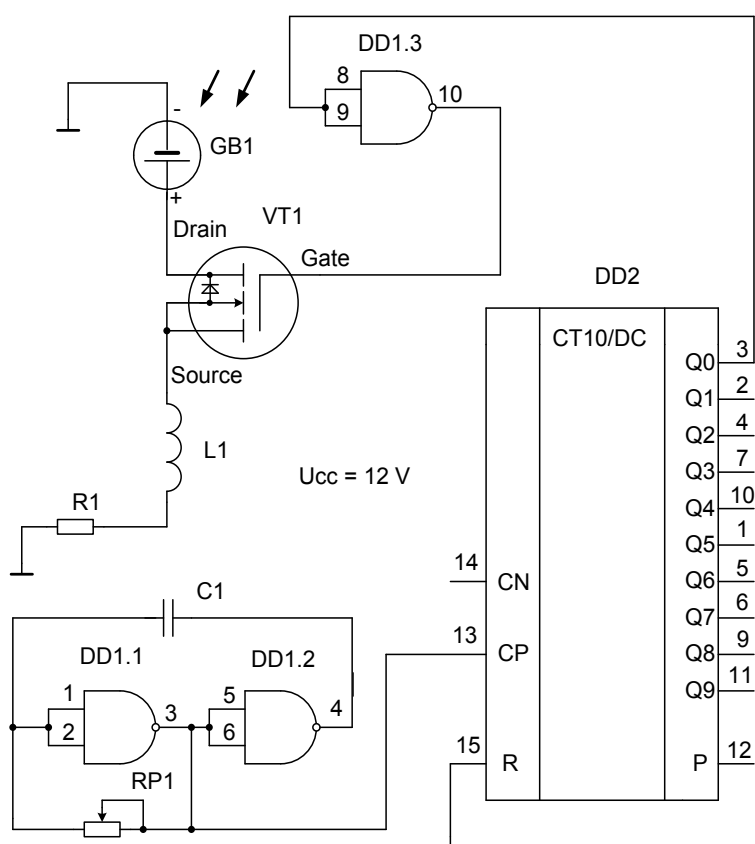


Рисунок 2.9 – Схема електрична принципова пристрою лінійної розгортки струму СБ

В схемі (рис. 2.9) використано наступні компоненти: мікросхема логіки 2I-HE типу CD4011A (на схемі позначається DD1), лічильник-дешифратор типу CD4017A (позначається як DD2), ключовий MOSFET-транзистор типу IRF1010N (має позначення VT1), котушку індуктивності L1 (її підбирають згідно з діапазоном потужності СБ), вимірювальний шунтовий опір 0,047 Ом

(R1), конденсатор C1 та потенціометр RP1, що разом задають частоту генератора імпульсів у межах від 2 кГц до 10 кГц. ДО схеми послідовно підключено сонячну батарею GB1, яка освітлюється сонячним імітатором.

Генератор імпульсів побудовано на схемі несиметричного мультівібратора (елементи DD1.1, DD1.2, C1, RP1). Імпульси від мультівібратора через інвертор-підсилювач DD1.3 надходять до входу лічильника-дешифратора DD2, де на кожному із десяти виходів послідовно формується імпульс, тривалість якого дорівнює періоду сигналу від мультівібратора. У певний момент часу імпульс присутній лише на одному з виходів, номер якого співпадає з кількістю імпульсів, що надійшли до входу CP лічильника-дешифратора. В такому разі, лічильник-дешифратор виконує ділення частоти на десять. Шпаруватість вихідних сигналів якого (відношення періоду імпульсу до його тривалості) також дорівнює 10. Прямокутний імпульс має амплітуду 12 В з виходу Q0 надходить до затвору (Gate) транзистора MOSFET та відкриває його. Момент відкривання супроводжує короткий невеликий сплеск напруги на ВАХ (Рис. 2.10).

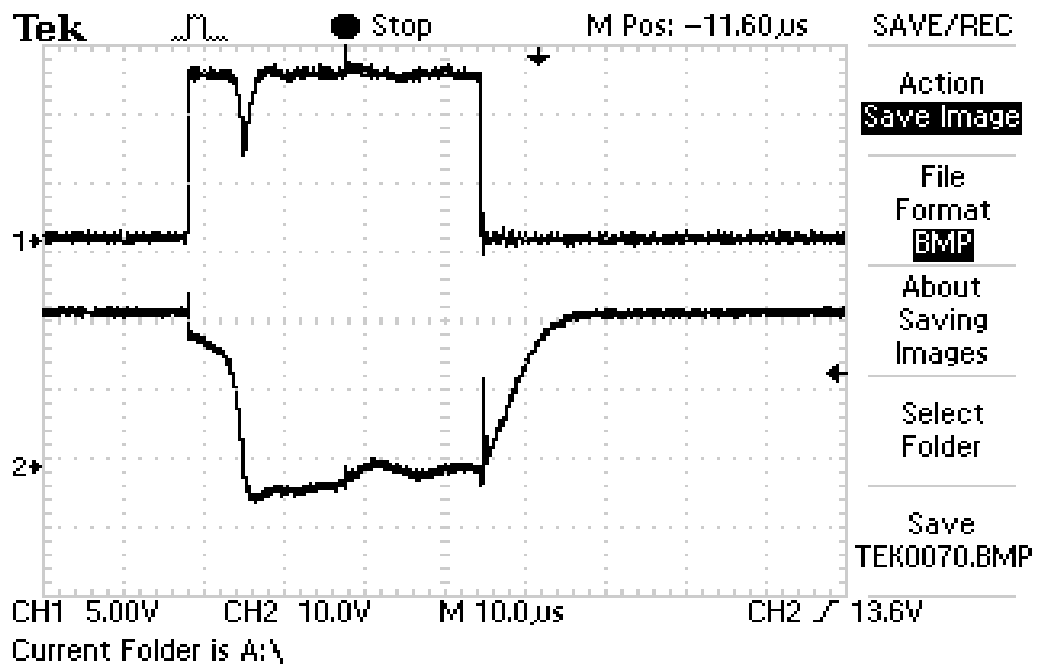


Рисунок 2.10 – Осцилограми сигналів на затворі ключа IRF1010N (канал 1) та на виході СБ (канал 2): частота імпульсів 2735 Гц, тривалість імпульсу 37 мкс, тривалість паузи 333 мкс

Також спостерігають короткі викиди напруги при проходженні рівня 0 В, та по закінченні імпульсу, коли транзистор закривається (рис. 2.10).

Імпульси розгортки утворюють серію (рис. 2.11), тривалість якої переривають вимиканням напруги живлення мультивібратора.

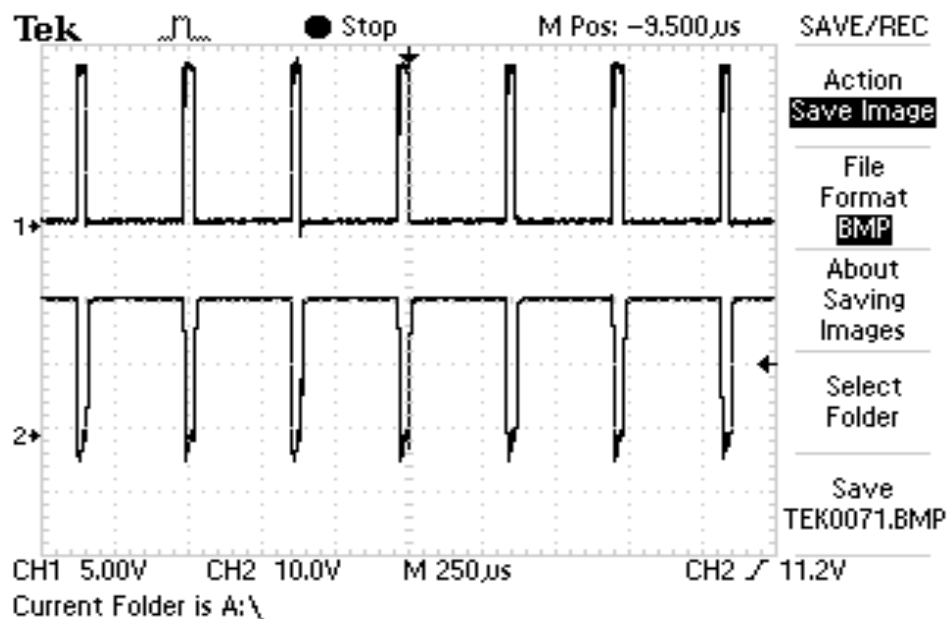


Рис. 2.11 – Осцилограми сигналів управління (канал 1) та ВАХ СБ при освітленні імітатором потужність якої 30 Вт (канал 2), представлені серією імпульсів із частотою 2735 Гц та амплітудою 12 В (канал 1) і 22,9 В (канал 2)

Моделювання в EWB Multisim13 роботи схеми паралельно підключених двох транзисторів, що подвоює максимальний струм СБ, наведено на рис. 2.12.

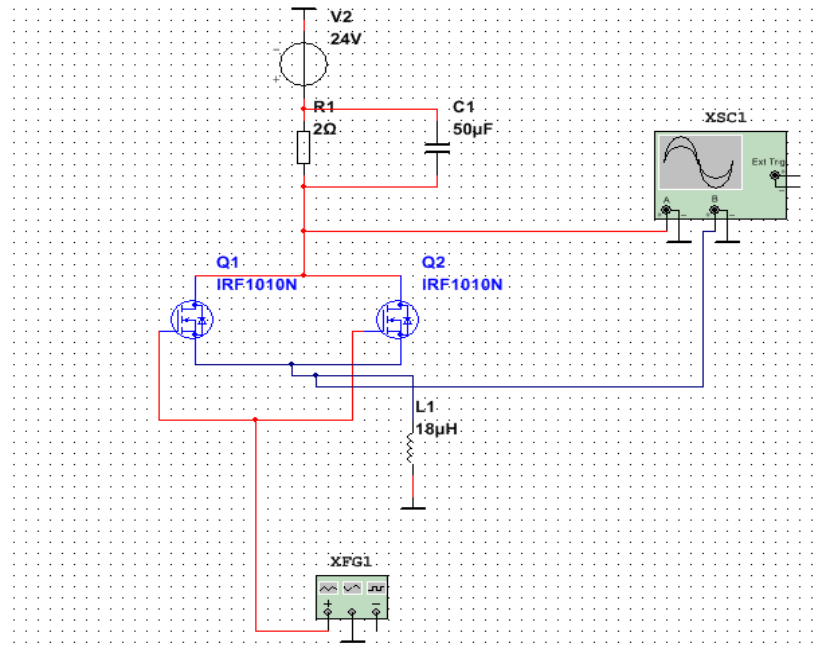


Рисунок 2.12 – Схема паралельного підключення двох транзисторів MOSFET

Симуляцію роботи схеми на двох польових транзисторах на частоті 2,7 кГц, як і при реальних вимірюваннях ВАХ СБ, наведено на рисунку 2.13.

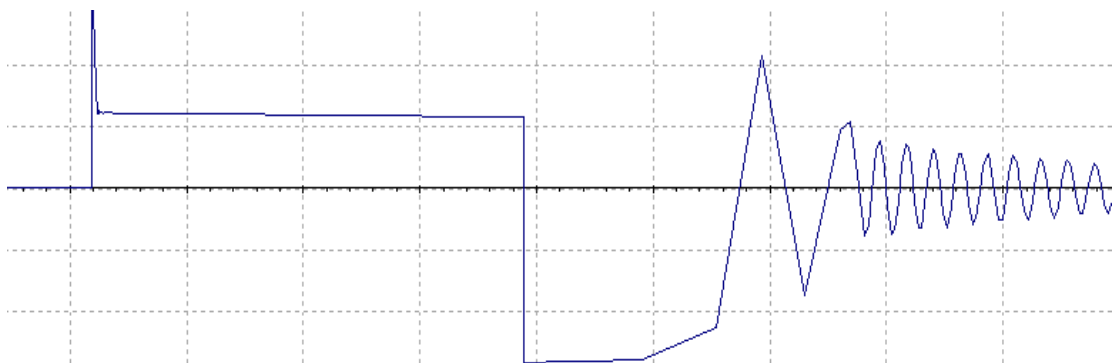


Рисунок 2.13 – Осцилограма двох паралельно включених транзисторів (модель в EWB Multisim13)

На рисунку 2.14 зображено спрощену схему роботи двокаскадного методу.

Двокаскадна схема транзисторного підключення може бути описана як схема лінійної розгортки, але з паралельно підключеними ключами та їх власними опорами (рис. 2.15), що являє собою спрощений вигляд транзисторів MOSFET, що працюють в ключових режимах.

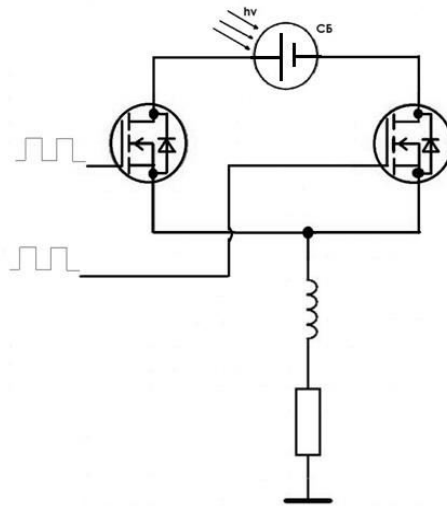


Рисунок 2.14 – Спрощена схема двокаскадного методу

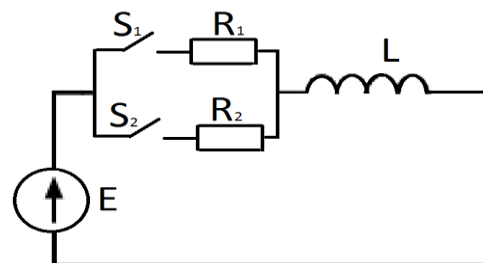


Рисунок 2.15 – Схема моделі R, L двокаскадного методу; E – СБ, S₁, S₂ – перший і другий ключі, R₁, R₂ – опір першого та другого ключа та вимірювального шунта, L – дросель

На рис. 2.15 показано, що струм, який протікає у даному колі, буде дорівнювати :

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.10)$$

де I_1 - струм що протікає через перший транзистор; I_2 - струм що протікає через другий транзистор відповідно.

При паралельному підключенні двох транзисторів, може виникнути похибка вимірювань через не синхронність роботи цих транзисторів. Сюди відноситься час спаду імпульсів на першому, може відрізнятись від часу спадання на другому, адже $t = t_{mosfet} \pm \Delta t_{mosfet}$, тому це варто врахувати у розрахунках.

Визначимо значення похибки Δt_{mosfet} для транзисторів:

$$\Delta t_{mosfet} = \sqrt{\frac{\Delta t_{mos.1}^2 + \Delta t_{mos.2}^2}{2}} \quad (2.11)$$

де $\Delta t_{mos.1}$ - похибка першого транзистора; $\Delta t_{mos.2}$ - похибка другого транзистора.

Так, як транзистори однакові за своїми параметрами

$$\Delta t_{mos.1} = \Delta t_{mos.2} = 24 \text{ нс, тому } \Delta t_{mosfet} = 24 \text{ нс.}$$

Тепер визначимо загальну похибку транзистора і генератора імпульсів (мультивібратора на логічному елементі КМОН), оскільки крім не синхронності транзисторів на вимірювання можуть впливати імпульси управління, що подані не одночасно, тому визначимо загальну часову похибку:

$$\Delta t_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\Delta t_{cmos}^2 + \Delta t_{mosfet}^2}{2}} \quad (2.12)$$

де Δt_{cmos} - похибка мультивібратора на елементах логіки КМОП; Δt_{mosfet} – сумарна похибка транзисторів.

Так, як $\Delta t_{cmos} = 4 \text{ нс}$, то $\Delta t_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{4^2 + 24^2}{2}} = 17,2 \text{ нс}$, що дорівнює 0,0172% від тривалості імпульсу розгортки.

З метою вдосконалення засобу для динамічного вимірювання ВАХ СБ було розроблено і виготовлено імітатор сонячного випромінювання.

При вимірюванні експлуатаційних характеристик сонячних батарей великої потужності виникає потреба їх освітлення за допомогою штучного джерела. Сучасні монокристалічні кремнієві СБ із розмірами 1000x2000 мм мають потужність до 300 Вт. Для їх освітлення необхідно створювати світловий потік, який відповідає стандарту АМ1.5. Для цього потрібні джерела потужність яких сягає 10 кВт і більше.

Джерелом є галогено-вольфрамова лампа розжарення, спектр випромінювання якої максимально подібний до сонячного. Доступність таких ламп та прожекторів для них дозволяє спроектувати та виготовляти бюджетні імітатори Сонця із задовільними характеристиками.

В ході проведених досліджень було спроектовано та виготовлено імітатор Сонця із розподіленим світловим полем на основі 21 прожектору типу PG 500 (рис. 2.16) під лампу типу GW-500 з цоколем 118 мм R7S та потужністю 500 Вт кожна.



Рисунок 2.16 – Прожектор типу PG 500

Використання ламп розжарення потужністю 500 Вт дає можливість створювати більш рівномірне світлове поле по всій площі освітлення, ніж при використанні прожектора потужністю 1 кВт або 1,5 кВт. Імітатор живиться від мережі 220 В, 50 Гц. Світловий потік на одну лампу становить 7200 лм. Загальний світловий потік імітатора дорівнює 151 200 лм. На відстані 0,26 метра, площа освітлення становить 2,3 квадратних метри, що дозволяє вимірювати вольт-амперні характеристики SB, максимальна потужність 300 Вт, а максимальний розмір 1000x2000 мм.

Схему розташування прожекторів в конструкції імітатора наведено на рисунку 2.17.

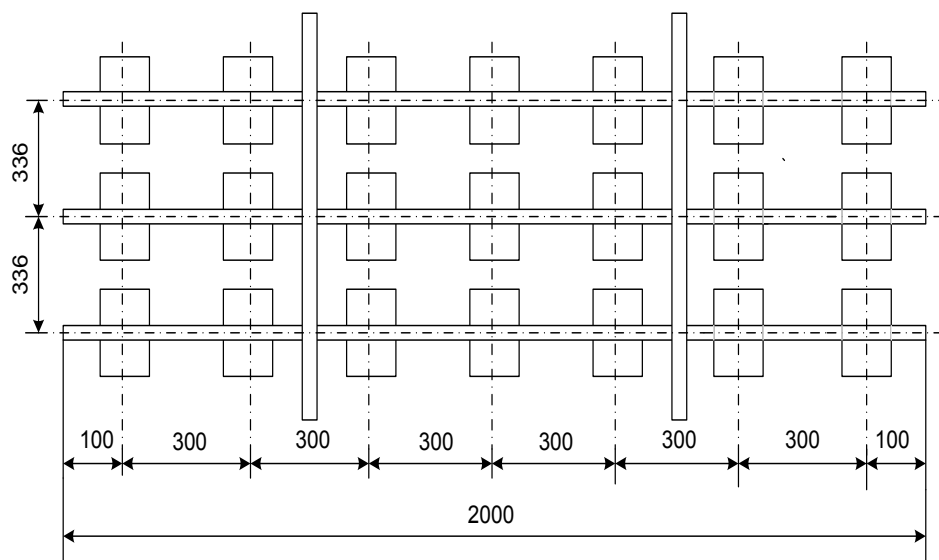


Рисунок 2.17 – Конструкція імітатора Сонця на прожекторах PG 500

Імітатор випробувався на кремнієвих монокристалічних СБ потужністю 30 Вт та 140 Вт (рис. 2.18) та 60 Вт (полікристалічний кремній) в режимі вимірювання струму короткого замикання та напруги холостого ходу. За результатами вимірювань обидві батареї показали відповідність паспортним даним.

Нерівномірність освітленості поверхні СБ складала $\pm 10\%$. Оцінювання нерівномірності освітленості проводилось за даними аналогового люксметра Ю-117 та цифрового люксметра MASTECH.

Нерівномірність освітлення поверхні СБ імітатором була визначена люксметром Ю-117 і не перевищила 20%.

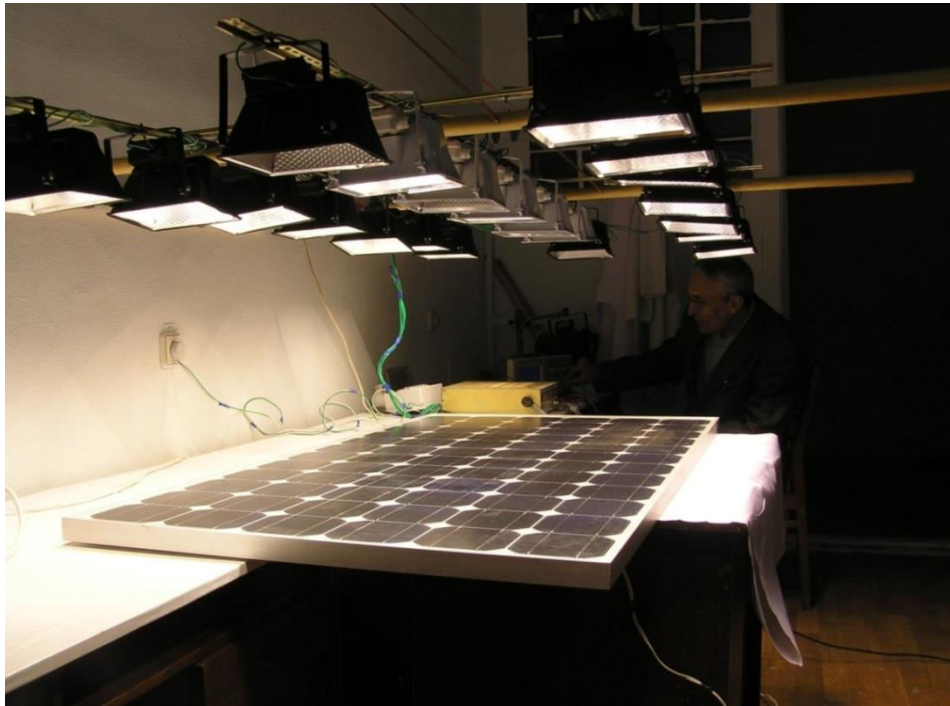


Рисунок 2.18 – Імітатор сонячного випромінювання на галоген-вольфрамових лампах розжарення освітлює СБ потужністю 140 Вт на основі монокристалічного кремнію

2.2 Розрахунок похибок вимірювання струму і напруги сонячних батарей динамічним методом із лінійною розгорткою струму

В основі наукового експерименту лежить вимірювання фізичних величин. Вимірювання забезпечують виконання технологічних процесів на виробництві. Періодичні вимірювання також потрібні для роботи обладнання та системи для забезпечення контролю за його функціонуванням. Метою даного дослідження є забезпечення того, щоб дефекти в СБ контролювалися протягом всього терміну їх експлуатації, що забезпечить їх використання із максимально високим ККД. Основою контролю дефектів СБ є динамічне вимірювання ВАХ, термографічне вимірювання теплових полів дефектів та телевізійне вимірювання геометричних параметрів дефектів електролюмінісценції.

При вимірюванні фізичної величини, розмежують поняття вимірюваного та істинного значення величини, між якими завжди буде певна різниця, тобто буде присутня похибка вимірювань. Причиною появи похибок можуть бути: помилки оператора, недосконалість методів і засобів вимірювання, а також зміни умов навколишнього середовища. Вимірювання вважається закінченим, якщо визначено не лише результат вимірювання, але і значення відхилення отриманого результату від істинного значення вимірюваної величини.

Для визначення похибки вимірювання засобу динамічного вимірювання ВАХ СБ на основі лінійної розгортки струму та застосування цифрового осцилографу слід врахувати такі джерела формування інструментальних похибок:

- нелінійність вихідного опору транзистора;
- наявність вихідної ємності транзистора;
- похибка АЦП цифрового осцилографа.

Як вже було показано раніше, використання котушки індуктивності без осердя в пристрої лінійної розгортки струму знешкоджує негативний вплив нелінійності, що притаманна котушкам з осердям із феромагніту. Тому нелінійність котушки індуктивності в розрахунку похибок не враховується.

Також запропоновано не враховувати час «підйому» сигналу (Rise Time) при вмиканні застосованого транзистора типу IRF1010N, що дорівнює 75 нс, що складає 0,75% від часу вимірювання ВАХ (10 мкс). На початку вимірювання з врахуванням даної затримки отримують реальну ВАХ без початкової ланки тривалістю до 1% від загального часу вимірювання. Так як ця ланка припадає на режим малого струму СБ, який у цій частині ВАХ лінійно залежить від напруги (режим джерела напруги), то початкову ланку можна відтворити при лінійній апроксимації ВАХ до нульового значення струму.

Розглянемо вплив зазначених вище трьох джерел на похибку вимірювання ВАХ.

Вихідний опір транзистора IRF1010N при струмі стоку 43 А дорівнює лише 11 мОм. Теорія польових транзисторів свідчить, що при малій напрузі стік-витік (Drain-Source Voltage) вихідний опір відкритого транзистору може збільшуватись у 2 рази. У порівнянні з послідовним опором СБ, що дорівнює 10 Ом і більше, максимальний приріст опору транзистора, який становить 11 мОм, надає граничну відносну похибку:

$$\delta_{R_{кл}} = (0,011/10) \cdot 100\% = 0,11\%.$$

Для аналізу впливу похибки, що дає вихідна ємність транзистора, розглянемо еквівалентну схему пристрою лінійного розгорнення струму (Рис. 2.19).

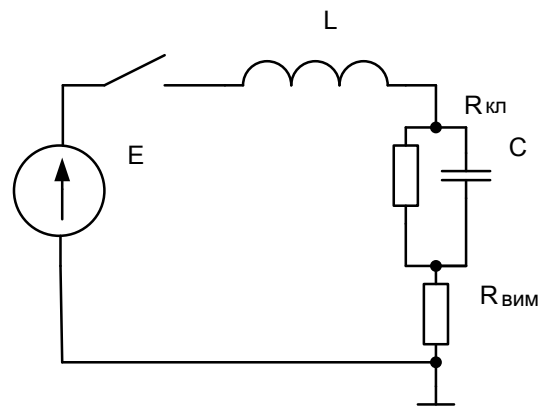


Рис. 2.19 – Еквівалентна схема пристрою лінійної розгортки струму СБ з урахуванням вихідної ємності транзистора: $R_{вим}$ – резистор для незалежного вимірювання струму; E – ЕРС СБ; L – дросель; C – вихідна ємність транзистора; $R_{кл}$ – вихідний опір транзистора

Для розрахунку похибки ємності транзистора $\delta_{C_{кл}}$ при застосуванні операторного методу необхідно скласти для електричного кола (Рис. 2.19) характеристичне рівняння:

$$R_{кл}/Cp + R_{кл}(Lp + R_{вим}) + (Lp + R_{вим})/Cp = 0 \quad (2.13)$$

Корені рівняння (2.13) мають такі значення:

$$p_{1,2} = \frac{-(R_{кл}R_{вим}C + L) \pm \sqrt{(R_{кл}R_{вим}C + L)^2 - 4(R_{кл} + R_{вим})R_{кл}LC}}{2R_{кл}LC} \quad (2.14)$$

Фактичні параметри схеми пристрою лінійного розгорнення струму виглядають наступним чином: $R_{\text{вим}} = 0,047 \text{ Ом}$; $R_{\text{кл}} = 0,011 \text{ Ом}$; $L = 8,23 \text{ мкГн}$; $C = 690 \text{ пФ}$ [153]. Ігноруючи малі величини, отримуємо: $p_1 = -0,132 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Для другого кореня розглянемо усі члени (2.13): $p_2 = -0,070455 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. .
Обернена до p_1 величина є часовою сталою кола (рис. 2.19):

$$\tau_1 = 7,6 \cdot 10^{-12} \text{ с} .$$

У такому разі, тривалість перехідного процесу на ємності транзисторча має на 6 порядків меншу величину ніж перехідний процес на котішці індуктивності.

У свою чергу, перехідний процес на котушці індуктивності має сталу:

$$\tau_2 = 141,933 \cdot 10^{-6} \text{ с} .$$

Як описано вище, стала часу для кола приладу лінійного розгорнення струму без урахування ємності ключа $\tau = 142 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Точне значення якої складає $L/(R_{\text{кл}}+R_{\text{вим}})$ або $141,897 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Відносна похибка, яку дає вихідна ємність MOSFET ключа, дорівнює:

$$\delta_{\text{Скл}} = ((\tau_2 - \tau) / \tau) \cdot 100\% = 0,025\% .$$

В засобі динамічного вимірювання ВАХ СБ використовується осцилограф марки Tektronix 1002, 8-розрядний АЦП якого забезпечує вимірювання напруги. Молодший значущий розряд (МЗР) АЦП має номер 8. Похибку АЦП визначає 0,5 МЗР або:

$$\delta_{\text{АЦП}} = 0,5 \cdot 2^{-8} \cdot 100\% = 0,2\% .$$

Динамічне вимірювання ВАХ СБ на основі лінійного розгорнення струму має такі джерела методичних похибок: температурну нестабільність СБ при виділенні джоулева тепла та нелінійність розгортки струму.

Нелінійність розгортки струму при замиканні СБ через котушку індуктивності впливає із нехтування в моделі процесу розгортки старшими членами розкладу в ряд Тейлора функції струму. Використавши результати виконаних там розрахунків похибки нелінійності розгортки та виконавши

корекцію часу розгортки з 25 до 10 мкс, маємо зменшене у 6,25 рази значення методичної похибки, причиною якої є нелінійність розгортки струму:

$$\delta_{\text{нел}} = 0,24 \text{ \%}.$$

Для подальшого зменшення похибки нелінійності розгортки струму запропоновано наступні дії:

- вимірювання ВАХ із застосуванням одного каналу осцилографа без використання вимірювального шунта в колі розгортки, що знижує дану похибку у 25 раз до 0,01%;

- використання транзистора типу IRF1405, що має вихідний опір 0,07 Ом (у застосованого транзистора IRF1010 вихідний опір дорівнює 0,011 Ом), це зменшує дану похибку ще у 2 рази до 0,005%.

Іншим важливим фактором методичної похибки є виділення джоулева тепла сонячним елементом під час вимірювання. Зазначимо, що процес виникнення джоулева тепла у імпульсних методах вимірювання ВАХ є максимальним при застосуванні досить тривалих (десятки і сотні мілісекунд) інтервалів вимірювання, що складають послідовність із кількох тисяч імпульсів з періодом до однієї мілісекунди та шпаруватістю 2. У запропонованому в даній роботі, методі процес вимірювання ВАХ може тривати 100 мкс при одинарному поданні вимірювального імпульсу зі шпаруватістю 10, що із врахуванням типу сигналів, що застосовують у аналогах, дає зменшення виділення джоулева тепла в 10 раз і більше.

Для розрахунку методичної похибки, що викликана виділенням джоулева тепла в процесі вимірювання ВАХ СБ, скористаємось формулою, яка надає залежність струму від температури:

$$J = J_{ph} - J_0 \left(\exp \left(\frac{eU + JR_S}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{JR_S + U}{R_p}. \quad (2.15)$$

Взявши похідну від формули (2.15), маємо:

$$di/dt = (-M/T^2) \cdot (1 + R_s/R_p)^{-1} \cdot I_0 \cdot \exp(M/T), \quad (2.16)$$

де $M = (eV + IR_s)/AkT$.

Відносна похибка нестабільності температури внаслідок виділення джоулева тепла дорівнює:

$$\delta_{Дж} = (\Delta i/i) \cdot 100\% = ((di/dt) \cdot \Delta T/i) 100\% \quad (2.17)$$

Розраховане значення $\Delta T = 0,06^\circ \text{C}$ при періодичному вимірюванні ВАХ, а $\Delta i = 1,2 \text{ mA}$ при $i = 4 \text{ A}$. Тоді:

$$\delta_{Дж} = 0,003\% .$$

Результативна похибка визначається виразом:

$$\delta_{\Sigma} = (\delta_{R_{кл}}^2 + \delta_{C_{кл}}^2 + \delta_{АЦП}^2 + \delta_{нел}^2 + \delta_{Дж}^2)^{1/2} \quad (2.18)$$

$$\delta_{\Sigma} = (0,11^2 + 0,025^2 + 0,2^2 + 0,24^2 + 0,003^2)^{1/2} = 0,34\% .$$

Гранична похибка $\pm 2\delta_{\Sigma} = 0,68\% .$

2.3. Експериментальні дослідження з вимірювання струму фотоелектричної сонячної батареї датчиком Холла

Міжнародний стандарт IEC 60904-1 визначає порядок вимірювання ВАХ сонячних елементів. Відповідно до цього стандарту, це, чотирихвотова схема вимірювання. Однак, ВАХ можуть бути виміряні, також за допомогою двохвотової схеми. У цій схемі вимірювання напруги та струму відбувається за допомогою амперметра і вольтметра, включених у коло (вимірювальний канал). У чотирихвотовій схемі вимірювання створюються два окремі канали: для напруги і для струму. Пропонуємо канал вимірювання струму сонячної батареї на основі мініатюрного (3x4x1,5 мм) датчика Холла SS494В.

При динамічному вимірюванні ВАХ необхідно забезпечити достатню чутливість датчика і високу продуктивність. Для вирішення першої проблеми датчик був конструктивно дорацьований: зовнішній корпус датчика було розташовано в заглибленні феромагнітного кільця типу NMS2000. У цьому випадку чутливість датчика збільшується в 40 разів. Швидкодія датчика забезпечується характеристиками вбудованої схеми для перетворення вхідного сигналу, зокрема існують лише два каскади аналогового підсилення.

Для моделювання схеми динамічного вимірювального каналу, була побудована схема комутації струму з імітатора сонячної батареї. Вихідний сигнал датчика знято за допомогою щупа цифрового осцилографа TDS1002 (рис. 2.20).

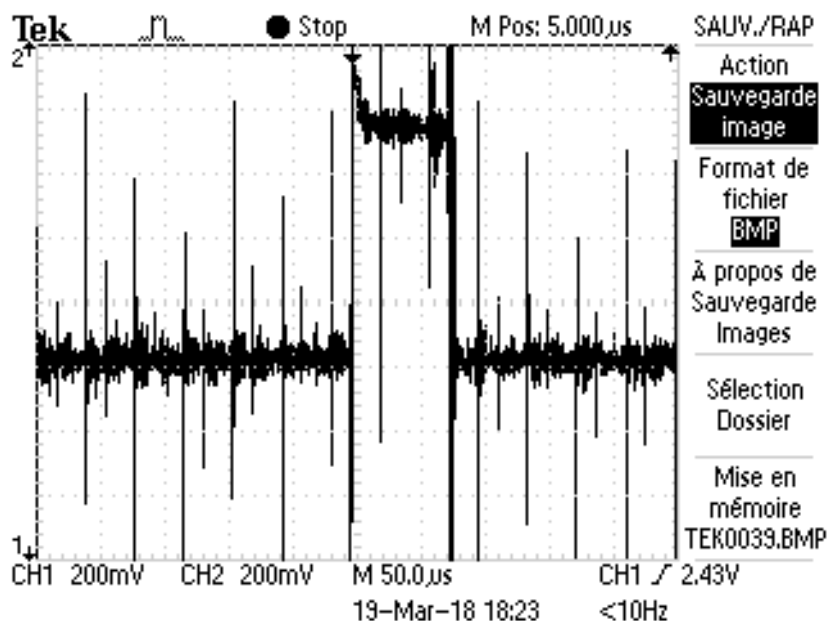


Рисунок 2.20 – Вихідний сигнал датчика SS494B; струм 13 А

Без застосування магнітопроводу датчик Холла недостатньо чутливість (рис. 2.21.).

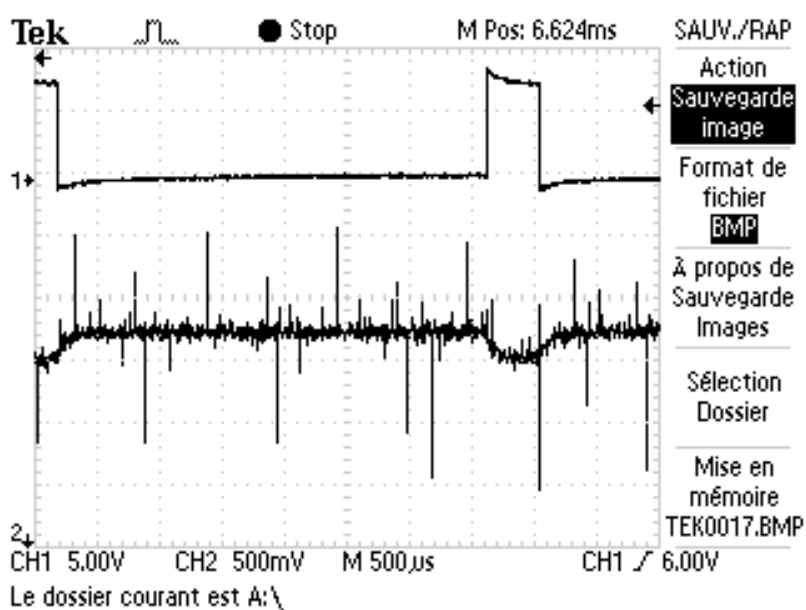


Рис. 2.21 – Осцилограми сигналів генератора імпульсів (канал 1) і датчика Холла типу SS494В (канал 2): магнітопровід в конструкції вимірювача струму не застосовувався

В ході дослідження були експериментально визначені динамічні параметри датчика Холла типу SS494В на основі осцилограми (рис. 2.22), зокрема час наростання та спаду сигналу.

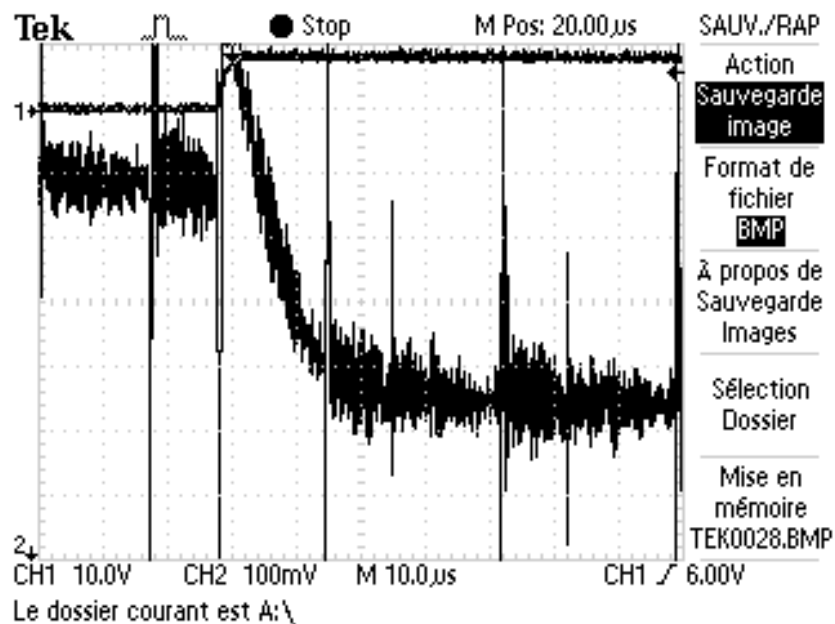


Рис. 2.22 – Осцилограма вихідного сигналу датчика Холла типу SS494В: час спаду сигналу не перевищує 10 мкс

Встановлено, що час підйому або спаду вихідного сигналу датчиків Холла серій 94 та 95 не перевищує 10 мкс. У той же час, перехідний процес на транзисторному ключі завершується через 1 мкс від початку надходження імпульсу від генератора.

Таким чином, швидкодія датчиків Холла на порядок вища за швидкодію магніто-резисторів, проте поступається резистивним датчикам (вимірювальним шунтам).

Експериментально досліджено дрейф вихідного сигналу датчика Холла при динамічному вимірюванні струму (рис. 2.23). Цей ефект можна пояснити нелінійністю магнітного кола, яке утворює магнітопровід.

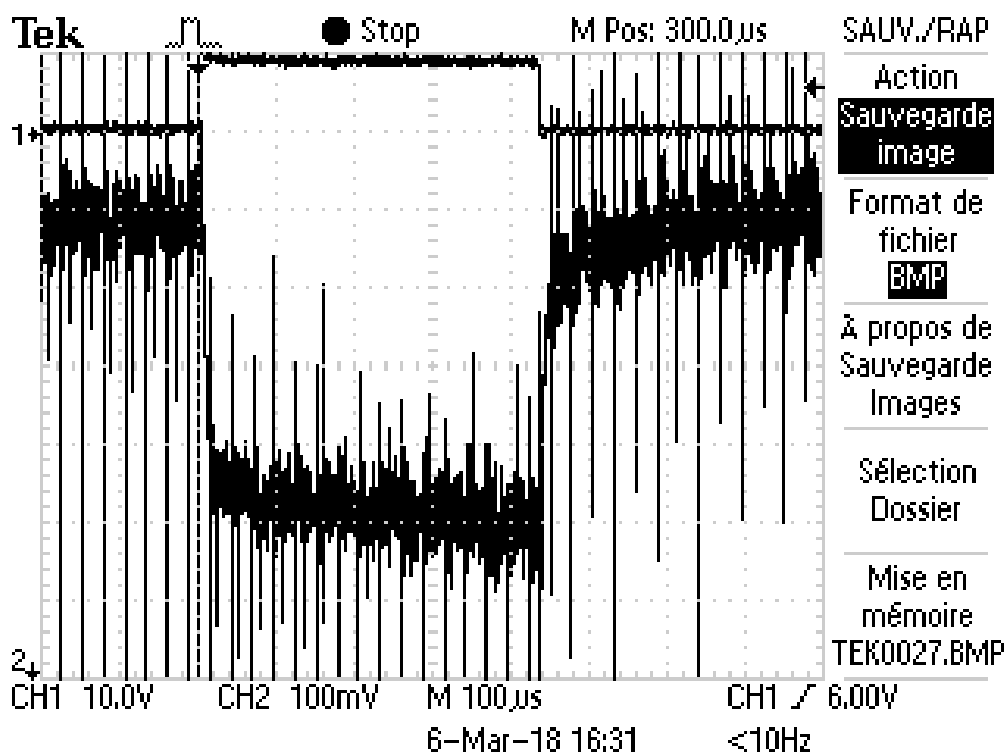


Рис. 2.23 – Нелінійний характер вихідного сигналу датчика Холла при застосуванні підсилюючого магнітопроводу

Для врахування нелінійності вихідного сигналу датчика Холла слід застосувати відповідний алгоритм та побудувати математичну модель ефекту. Проте дана задача виходить за межі нашого дослідження.

3. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ “ВИМІРЮВАЧ СТРУМУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НА ДАТЧИКУ ХОЛЛА”

3.1. Опис ідеї проекту

Ідеєю для стартап-проекту є описаний у магістерській дисертації метод вимірювання струму сонячних батарей сенсором Холла.

Тема контролю якості сонячних батарей, станом на сьогоднішній день, є досить актуальною. Унікальність методу полягає у вимірюванні струму, та побудові вольт-амперної характеристики за допомогою цифрового осцилографа, в який вбудовані математичні функції множення сигналів з двох каналів.

Вимірювання проводиться за допомогою сенсора Холла та двоканального цифрового осцилографа. Сигнал отриманий із сенсора, за необхідності підсилюється вбудованим підсилювачем, та автоматично множиться на сигнал отриманий з другого каналу. В результаті, на екрані осцилографа можна спостерігати графічно енергетичну характеристику сонячної батареї.

Таблиця 3.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрями застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Контроль сонячних батарей в лабораторних умовах, що максимально наближені до умов підприємства	Синхронізація сонячних батарей, що працюватимуть в одному масиві. Відбракування неякісних сонячних батарей. Військова промисловість.	Дослідження для науковців, можливість до нових відкриттів та винаходів. Зменшення відмов сонячних батарей, та підвищення терміну їх експлуатації. Можливість застосування у військовій сфері.

Визначено ідею застосування та техніко-економічні характеристики дипломної дисертації. Ця ідея може забезпечити широкий спектр призначення і результатів для багатьох користувачів.

Для аналізу техніко-економічних переваг цієї ідеї необхідно визначити обсяг існуючих конкурентів або товарів-замінників. Проекти та проекти конкурентів дотримуються переліку вище. За результатами порівняльного

аналізу були визначені показники:

1. гірші значення (W, слабкі);
2. подібні (N, нейтральні) значення;
3. кращі значення (S, сильні) (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Техніко- економічні характери- стики ідеї</i>	<i>Особливості</i>	<i>W (слабка сторона)</i>	<i>N (нейтральна сторона)</i>	<i>S (сильна сторона)</i>
1	2	3	4	5	6
1	Економічні	Низьковартісне обслуговування			x
		Вартість експлуатації			x
2	Надійності	Вартість витратних матеріалів			x
		Строк безвідмовного функціонування			x
		Ремонтопридатність			x
3	Технологіч- ні	Гарантійний термін			x
		Довготривалість виготовлення			x
		Оптимізація витрат			x
		Трудомісткість реалізації		x	
4	Призначен- ня (технічні)	Наявність датчиків контролю			x
		Широкий діапазон використання		x	
5	Ергономічн- ість	Мала похибка вимірювання		x	
		Відповідність виробу сприйняттю інформації користувачем			x
6	Естетичні	Зручність користування системою		x	
		Інформаційна виразність		x	
7	Транспорта- бельності	Досконалість виробничого дослідження		x	
		Трудомісткість підготовки одиниці продукції до перевезень			x

У цій таблиці визначено основні переваги та недоліки проекту, і виявлено, що проект має багато переваг, а саме: недороге обслуговування, тривалу гарантію, ремонтпридатність, швидке виготовлення і так далі.

3.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, які подані у таблиці 3.3:

Таблиця 3.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ п/ п</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Автоматизоване система градування датчиків СБ	На сенсорі Холла	наявна	доступно
2	Конструкція датчиків СБ	На сенсорі Холла	наявна	доступно
3	Використання СБ	На сенсорі Холла	наявна	доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: На сенсорі Холла				

Дану технологію досить часто застосовують у лабораторних дослідженнях, а також використовують на підприємствах та господарських будівлях, завдяки використанню широко доступних та недорогих компонентів. Запропоновану методику можливо застосувати, завдяки достатній кількості технічних засобів і матеріальних ресурсів.

3.3 Аналіз можливостей ринку для запуску стартап-проекту

1) Аналіз попиту, кількості та ринкової динаміки (табл. 3.4) дозволяє визначати ринкові можливості, що можуть бути використані на ринку під час реалізації проекту, і ринкові загрози, які можуть перешкоджати реалізації проекту.

Таблиця 3.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	100000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	<u>Зростає</u>
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Наявність ліцензій та сертифікатів
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ 8.438–81 Системы информационно–измерительные. Поверка. ГОСТ 22261-82 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%

З'ясовано, що характеристика даного стартап-проекту дозволяє легко вийти на потенційний ринок за допомогою зростання динаміки ринку та незначних обмежень для входу. Головною ціллю є отримання певних ліцензій та сертифікатів.

2) Надалі визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформовано орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 3.5).

Таблиця 3.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія(цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Перевірка СБ.	наукові інститути, заводи, які виготовляють або	ГОСТ 2.601–95. ЕСКД. Эксплуатационн	- надійність; - належна якість продукції та

2	Контроль якості СБ.	використовують сенсори та методи Інститут фізики напівпровідників НАН України.	ые документи, РД 50–660–88. Інструкція, ГСИ. Документи на методики поверки средств измерений., ГОСТ 8.010–90. Методики выполнения измерений;	обслуговування; - доступну та достовірну інформацію про продукт, її, якість, асортимент, а також про її виробника (виконавця); -точність; -програмне забезпечення при перевірці; -зручність; -швидкість діагностики.
3	Зручна діагностика у лабораторних умовах			
4	Універсальність системи та можливість її удосконалювати			

Основною цільовою аудиторією відповідно до вимог та потреб, що формує ринок, було обрано наукові інститути, підприємства приладобудівної галузі, приватні підприємства, сферою діяльності яких є розвиток сонячної енергетики.

3) Складено таблиці факторів, що перешкоджають ринковому впровадженні проекту (табл. 3.6.) для аналізу ринкового середовища.

Таблиця 3.6. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Виробництво	ступінь зносу запчастин	Співпраця з заводами для закупки якісних запчастин оптом
2	Конкуренція	Вихід на ринок багато конкурентоспроможних компаній	Проінформувати клієнтів про високу якість нашої продукції за меншу ціну
3	Репутація виробника	Нова компанія не викликає значної довіри	Зробити ставку на маркетинг, рекламу, співпрацю з значними науковими інститутами та отримання відгуків від них.
4	Організація процесу	Початковий проект дуже важко правильно	Створення чіткого плану дій, продумання всіх важливих

виробництва на підприємстві	організувати та направити в правильне русло.	питань, до того як випустити проект на ринок.
-----------------------------	--	---

Основними факторами, що перешкоджають реалізації проекту на ринку, є: виробництво, конкуренція, репутація виробника та організація виробничого процесу.

Виявлено також основні чинники, що сприяють впровадженню проекту на ринку (табл. 3.7).

Таблиця 3.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Попит	Велика кількість запитів на контроль матеріалів СБ.	Розширення та збільшення обладнання та працівників.
2	Ціна	Низькі ціни приваблюють клієнтів.	Не високі ціни на автоматизовану систему моніторингу.
3	Інновації	удосконалення обладнання та метод контролю матеріалів.	Висококваліфіковані працівники та іноземна наукова література для здійснення удосконалення обладнання.
4	Маркетинг	Залучення все більше нових клієнтів.	Реклама у інтернеті, відгуки, співпраця з різними інститутами та заводами для більшої популярності товару.

Основними факторами, що сприяють ринковому впровадженню проекту є: виробництво, попит, ціна, інновації та маркетинг.

4) Визначено загальні риси конкуренції на ринку (табл. 3.8).

Таблиця 3.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкуренто-спроможною)</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>

Тип конкуренції – олігополія	Олігополія характеризується невеликою кількістю фірм (від 2 до 10), обгороджених бар'єрами, які перешкоджають вступу в галузь нових фірм, мають контроль над цінами, але при змові з іншими олігополістами	Має не багато конкурентів, тому може контролювати ціни на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби -локальний	Може використовуватися, як на світовому на національному світовому ринку	Отримання сертифікації, відповідності не тільки держ. нормам і стандартам, а й міжнародним та технічної ліцензії
3. За галузевою ознакою -міжгалузева	Дослідження можна використовувати у різних галузях	Універсальність даної установки, є можливість покращити її і використовувати у багатьох галузях
4. Конкуренція за видами товарів: -між бажаннями	Можлива конкуренція між різними видами товарів, які можуть виконувати подібні функції і між товарами одного виду	Так як система є універсальною, особливістю її є те що вона може застосовуватися у будь-якій галузі.
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Нецінова. Проводиться головним чином за допомогою вдосконалення якості продукції, технології виробництва, інновацій та нанотехнологій, патентування	Головною характеристикою є якість та ціна доступна для багатьох клієнтів
	Цінова. Для значної частки клієнтів ціна є визначальною при виборі.	
6. За інтенсивністю -не марочна	Роль торгової марки незначна, хоча самі марки можуть бути присутніми на ринку	Дана продукція не потребує марок, головними її пріоритетами є якість та технологічність

Поступовий аналіз ринкової конкуренції показує, що ця особливість конкурентного середовища має великі перспективи для конкурентної боротьби.

5) Після конкурентного аналізу більш детальний аналіз конкурентних умов галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 3.9).

Таблиця 3.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	ТОВ Датчик (Україна)	ООО «KNESS PV»	НВО Мікроелектроніка	Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України	ТОВ «Подільський Енергоконсалтинг»
	ТОВ «Квазар» (Україна)				
	ТОВ Спеціндустрія (Україна)				
Висновки:	Конкурентна боротьба є незначною так, як товари конкурентів суттєво відрізняються в ціні та вузькою сферою застосування.	можливість входу на ринок, але з невеликими масштабами, дуже мала кількість потенційних конкурентів.	Співпраця з багатьма постачальниками для вибору кращих, дешевших, якісніших запчастин.	Клієнти диктують умови, які стосуються якості, удосконалення та універсальності.	При утворенні загроз з боку товарів-замінників може відбуватися збільшення конкуренції, яка призведе до втрати багатьох клієнтів.

Аналіз конкуренції показав всіх прямих та потенційних конкурентів, постачальників та клієнтів, виявлено, що конкуренція є незначною так як є мало конкурентів, а попит на продукцію достатньо великий.

б) Використовуючи аналіз конкуренції, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 3.2), вимог споживачів до товару (табл.3.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 3.6-3.7) визначено та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 3.10. [38]

Таблиця 3.10.Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Ціна	Чим менша ціна, тим більший попит.
2	Постійні витрати на виробництво	Витрати на запчастини та на складові компоненти, які дуже швидко зношуються.
3	Попит	Розвиток галузі та виробництва, визначає попит на продукцію.
4	Інновації	Для того, щоб удосконалити продукцію необхідна велика база даних, патентів та винаходів.
5	Бар'єри проникнення	Тривалий час для отримання сертифікатів, ліцензії та патентну чистоту продукції.
6	Репутація виробника	Клієнтів привертає увага реклама, перед покупкою вони ознайомлюються з відгуками.
7	Рівень організації процесу виробництва на підприємстві	Чим краще організований виробничий процес, тим воно краще розвивається, має менше неточностей та браку виробництва.
8	Конкуренти	Вихід на ринок нових конкурентів, може суттєво вплинути на попит продукції.

Наведено значущі чинники, що роблять фактори для порівняння конкурентоспроможності значущим, тим самим обґрунтовано фактори конкурентоспроможності.

7) Проаналізовано сильні та слабкі сторони стартап-проекту на основі визначених факторів конкурентоспроможності (табл. 3.10) (табл. 3.11).

Таблиця 3.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з автоматизованою системою</i>						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Ціна	18		•					
2	Попит	16			•				
3	Інновації	13			•				
4	Бар'єри проникнення	12				•			
5	Постійні витрати на виробництво	9				•			
6	Репутація виробника	8						•	
7	Рівень організації процесу виробництва	6					•		
8	Конкуренти	4				•			

У порівнянні з конкурентними продуктами, найвищими оцінками є: ціна, попит та інновації, слабкими факторами є: репутація виробника,

організаційний рівень виробничого процесу та конкуренти.

8) Ринкові загрози та списки ринкових можливостей базуються на аналізі загроз і факторів можливості в маркетинговому середовищі. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідком (прогностичного) впливу факторів і, на відміну від них, не впроваджені на ринку і мають певні можливості впровадження.

Таблиця 3.12.SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нижча ціна порівняно з конкурентами (250000грн у конкурентів 500000грн) (ціна); • має високий попит, так як галузь дуже розвивається та має (попит); • за допомогою електромагнітного прискорювача систему можна удосконалити і добитися кращих показників і ширшого використання(інновації). 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нове підприємство на ринку викликає значні підозри без відгуків та рекомендацій) (репутація виробника); • відсутність чіткої стратегії організації виробництва;
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> • попит (збільшення клієнтів через великий попит) ; • ціна (зробити акцент на низьку ціну та якість продукції(удвічі меншу ніж у прямого конкурента)); • Інновації (удосконалення обладнання та метод дослідження). 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Виробництво (високий ступінь зносу запчастин); • Конкуренція (поява нових конкурентів на українському ринку); • Репутація виробника (початковий проект дуже важко правильно організувати).

Виявивши можливі загрози та можливості, було розроблено SWOT, за допомогою якого ми зможемо покращити та виправити нашу конкурентну поведінку та стратегії розвитку проекту.

9) На основі SWOT-аналізу була розроблена альтернатива ринковій поведінці (перелік заходів), спрямована на виведення на ринок стартап-проекту та визначення найкращого часу для його реалізації на ринку.

Альтернативи визначено з точки зору термінів та ймовірності отримання ресурсів (табл. 3.13).

Таблиця 3.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1.	Динамічна(Освоєння нових ринків, зростання масштабів виробництва розроблення та впровадження інновацій, розвиток потенціалу для реалізації стратегічних цілей розвитку)	Збільшення постачальників, удосконалення ресурсів, найм високоосвіченого робочого персоналу	1,6років
2.	Нестійкий (Раціоналізація асортименту продукції, утримання частки ринку, лідерство в ніші)	Поступове удосконалення ресурсів	1 рік
3.	Стабільний(Утримання конкурентного положення, утримання ринкової ніші, зростання частки ринку з нарощенням виробництва, акумуляція прибутку)	Замовлення деталей у перевірних постачальників, високоосвічений робочий персонал	6 місяців

Було обрано стабільну альтернативу ринковій поведінці. Вона є найбезпечнішою, оскільки має найкоротший час впровадження, притримується конкурентної позиції і поступово збільшує прибуток і нарощує виробництво.

3.4.Розробка ринкової стратегії проекту

1) Першим кроком у розробці ринкової стратегії є визначення стратегії охоплення ринку: опис потенційних цільових груп споживачів(таблиця 3.14).

Таблиця 3.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Підприємства	середня	високий	низька	просто
2	Приватні особи	висока	високий	середня	просто
3	Військові	середня	середній	середня	середня

Які цільові групи обрано: Підприємства та Приватні особи

Цільовою групою споживачів було обрано науково-дослідні установи та фабрики, як у цих сегментах ринку, низька інтенсивність конкуренції, і в цей сегмент легше ввійти. У цій сфері існують великі перспективи розвитку та можливість вдосконалення автоматизації системи.

2) Розроблено базову стратегію розвитку для окремих сегментів ринку (табл. 3.15). [38]

Таблиця 3.15.Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ п/ п</i>	<i>Обрана альтернат ива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова страте гія розвит ку*</i>
1.	стабільна	стратегія зазвичай тісно пов'язана з можливістю досягнення ефекту масштабу і досвіду (стабільно, без ризиків добиватися поставлених цілей).	фірма здатна протистояти своїм прямим конкурентам навіть у разі цінової війни і в змозі отримувати прибуток при ціні, мінімально допустимій для конкурентів; низькі витрати створюють бар'єр входу для нових конкурентів і одночасно хороший захист проти товарів-замінників.	Стратегія лідерства по витратам.

Обрано стабільну альтернативу розвитку тому, що у ході конкурентної боротьби з використанням цієї стратегії з ринку вимушені будуть піти фірми, менш ефективні з точки зору величини і структури витрат, нездібні до проведення технологічних новацій, спрямованих на зниження витрат.

3) Вибрано стратегію конкурентної поведінки (табл. 3.16).

Таблиця 3.16.Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>

1	Проект, не є першопрохідцем, проте він не поширений у використанні у нашій країні	Компанія буде забирати споживачів у існуючих конкурентів, а також прибавляти нових.	Компанія, випускає товари-імітатори, займаючи ринкову частку, яку з різних причин не можуть охопити фірми лідери, обумовлена перевагою локалізації, краще знання національного ринку, налагоджені зв'язки з клієнтами.	Стратегія наслідування лідеру
---	---	---	--	-------------------------------

Для початкового входження на ринок було обрано стратегію наслідування лідера, так, як це дозволяє зменшити конкурентну боротьбу та зосередити свій бізнес на отримання прибутків.

4) На основі вимог споживачів від вибраних сегментів ринку до постачальників і продуктів (і на основі вибраних основних стратегій розвитку розробляються стратегії позиціонування (таблиця 3.17), включаючи формування ринкових позицій (група асоціацій)), споживачі повинні ідентифікувати марку/товар через ці місця.

Таблиця 3.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Точність вимірювання струму СБ	Позиціонування за співвідношенням "ціна – якість"	вимірювач так як продукт виходить на український ринок, ціна на нього буде на багато менша чим на європейські системи, які займають основний ринок	"європейська якість за українськими цінами", "якісна система дослідження за кращими цінами", "відмінне дослідження при малих затратах"

Було визначено стратегію позиціонування, вона буде орієнтована на низьку ціну продукту, порівняно з конкурентами, за аналогічною якістю.

3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

1) Для того, щоб сформувану маркетингову концепцію товару, який

отримає споживач. підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (табл. 3.18).

Таблиця 3.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Якісний контроль СБ	Автоматизоване керування процесом, що допомагає зрозуміти конкретну суть проблеми	Орієнтованість маркетингової стратегії на якість продукції
2	Універсальність автоматизованої системи	Використання у багатьох галузях	Висококваліфіковані фахівці, які працюють над вдосконаленням системи
3	Мало бюджетне дослідження	Низькі ціни	Нижча цін ніж у міжнародних конкурентів

Основними вигодами, які пропонує товар є автоматизоване дослідження, що допомагає зрозуміти конкретну суть проблеми, використання у багатьох галузях та низькі ціни.

2)Розроблена трирівнева маркетингова модель товару: уточнено ідею продукту, його фізичні складові та особливості процесу його надання (табл. 3.19). [38]

Таблиця 3.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики		Гц /кг/В/мм. Рт. Ст
	• Діапазон частот	0-10 МГц	
	• Швидкодія процесу вимірювання	0.1 с	При частоті мережі 50 Гц
	• Швидкість передачі даних	0.1 с	0,5
	• Кінетична енергія	500 еВ	
	• Напруга живлячої мережі, В		220±22
	• Атмосферний тиск		650..800

<p>III. Товар з підкріпленням</p>	<p>Якість: Вимоги до електроживлення ДСТУ 13109-87, вимоги до електричної міцності і до опору ізоляції ДСТУ 26104-94, методи випробування по ДСТУ 22261-94 і ДСТУ 12997-84</p> <p>Пакування: упаковка з нанесенням спеціального дизайну. На упаковці міститься така інформація (маркування):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Загальна назва продукту, власна назва; • Умови зберігання; • позначення ДСТУ 4503:2005; • найменування та адреса виробника і місце виготовлення; • товарний знак; • штриховий код згідно з ДСТУ 3147. <p>Інформацію щодо якості продукту споживач може отримати з інформаційних сайтів, реклами та відгуків тощо.</p>
<p>За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: за допомогою ліцензії, патентів на винахід та сертифікатів.</p>	

За допомогою визначення основних характеристик системи було визначено основні вимоги по ДСТУ до продукції, вимоги до пакування та визначено, що за допомогою патентів та ліцензії він буде захищений від копіювання.

3) Наступний крок полягає у визначенні цінового діапазону, який слід керувати при встановленні потенційної ціни продукту, наведено у табл. 3.20.

Таблиця 3.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники 100000	Рівень цін на товари-аналоги 500000	Рівень доходів цільової групи споживачів Високий рівень доходів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу 100000-800000 грн

Визначення ліміту цін свідчить про те, що проект значно виграє у ціні, в порівнянні з ціною товарного аналога, а дохід цільової групи споживачів є достатньо високим для економічної закупки продукту.

4) Наступним кроком є визначення найкращої системи продажів, в якій можна визначити функцію продажу, глибину каналу та найкращу систему продажів. (Таблиця 3.21). [38]

Таблиця 3.21. Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
	Клієнт ознайомлюється з характеристикою товару, присутній на експериментальних дослідженнях, швидке замовлення, отримання гарантії та сертифікатів, підписання договору.	-Швидке транспортування; -Сортування; - Інформування	Внутрішня служба збуту, що допомагає економити на транспортуванні	Проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників(власна або залучена система збуту).

Сформовано специфіку поведінки закупок, функцію продажу, глибину каналу і кращу систему продажу.

5) Розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка базується на заздальгідь вибраній основі позиціонування, яка визначається деталями поведінки клієнта (табл. 3.22).

Таблиця 3.22. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікації, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
	Ознайомлення характеристикою товару на сайті, можливість самому клієнтові оцінити ефективність системи, побачивши на власні очі, отримання гарантії та сертифікатів, підписання договору.	Ефективність контакту (відгуки), можливість цінити ефективність системи	Позиціонування за співвідношенням "ціна-якість"	Донести систему, як сучасний, автоматизований продукт міжнародної якості за низьких цінах.	"європейська якість за українськими цінами", "якісна система дослідження за кращими цінами", "відмінне дослідження при малих затратах"

Розроблено маркетингову програму, в тому числі поняття продукту, продажу, просування та попередній аналіз цінових можливостей, заснований

на цінностях і потребах потенційних клієнтів, конкурентній перевазі ідеї, стані і динаміці ринкового середовища.

Висновки до розділу

Було розроблено стартап-проект “ВИМІРЮВАЧ СТРУМУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НА ДАТЧИКУ ХОЛЛА”. Сформовано ідею стартап-проекту, її використання та застосування.

Аналіз ринку і ситуації на ньому, дозволив знайти головні тенденції наступного розвитку галузі, змін споживчих переваг, головні напрямки подальшої діяльності на ринку. Вибрано із усіх можливих технологію моніторингу стану сонячних батарей

Детально розкрито та описано головну ідею стартап-проекту як вирішення проблеми, розкритої в актуальності даної магістерської дисертації. Визначено технологічний аудит ідеї проекту, проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, розроблено актуальну стратегію подальшого розвитку та «розкручення» проекту на фоні відносин на сучасному ринку. Було розроблено маркетингову програму реалізації стартап-проекту.

Таким чином, було доведено, що проект має великий попит на ринку, а саме серед наукових інститутів, у заводів приладобудівної галузі. Через те, що ціна на продукт є низькою на відміну від іноземних конкурентів, які в основному виготовляють аналогічні вироби, даний проект має значну конкурентоспроможну позицію. Було виявлено можливості та загрози ринку, сильні та слабкі сторони підприємства, конкурентні позиції на національному та міжнародному ринку.

Обрано стабільну альтернативу ринкової поведінки. Вона є найбільш безпечною, так як вона має найменші строки реалізації при чому є можливість триматися конкурентної позиції та поступово прибавляти прибуток та нарощувати виробництво.

ВИСНОВКИ

В даній дисертації було розглянуто метод вимірювання струму сонячних батарей за допомогою датчика Холла та цифрового осцилографа.

В першому розділі проведено аналіз схем для вимірювання струму. Розглянуто сенсори на ефекті Холла, принцип дії, застосування, детально описано цифрові та аналогові сенсори. Також тут описується принцип дії польового транзистора, його будова та застосування.

В експериментальному розділі було проведено ряд досліджень, розрахунок похибок вимірювання, та розроблено пристрій для лінійної розгортки струму. В результаті експерименту було виявлено, що при динамічному вимірюванні ВАХ необхідно забезпечити достатню чутливість датчика і високу продуктивність. Для вирішення першої проблеми датчик було розташовано в заглибленні феромагнітного кільця типу NMS2000. У цьому випадку чутливість датчика збільшилась в 40 разів. Швидкодія датчика забезпечується характеристиками вбудованої схеми для перетворення вхідного сигналу. Для моделювання схеми динамічного вимірювального каналу, була побудована схема комутації струму з імітатора сонячної батареї. Вихідний сигнал датчика знято за допомогою щупа цифрового осцилографа TDS1002.

У третьому розділі було розроблено стартап-проект «вимірювач струму сонячних батарей на датчику Холла». Детально описано головну ідею проекту. Проведено аналіз ринку та ситуації на ньому. Розроблено ринкову стратегію та маркетингову програму.

Отже, робимо висновок, що тема контролю якості сонячних батарей, станом на сьогоднішній день, є досить актуальною. Унікальність методу полягає у вимірюванні струму, та побудові вольт-амперної характеристики за допомогою цифрового осцилографа. Даний метод вимірювання струму сонячних батарей є досить ефективним. Основними перевагами є: швидкодія, висока чутливість, точність та портативність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Эффект Холла. Википедия. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Холла
2. Рембеза С.И., Каргин Н.И. Физика твердого тела. Оптические, диэлектрические и магнитные свойства твердых тел: Курс лекций. Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2003. Ч.Ш.
3. А. Кобус, Я. Тушинский Датчики Холла и магниторезисторы. Пер. с польск. В. И. Тихонова и К. Б. Макидонской, под ред. О. К. Хомерики, М., «Энергия», 1971.
4. Георгий Волович Интегральные датчики Холла. Современная электроника, СТА-ПРЕСС Декабрь 2004
5. Схемы измерения тока. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.e-core.ru/shemyi-izmereniya-toka/>
6. Польові транзистори. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://stud.com.ua/28254/tovaroznavstvo/polovi_tranzistori
7. Полевой трензистор. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://go-radio.ru/mosfet-transistors.html>
8. Jiang Chun-Sheng Carrier separation and transport in perovskite solar cells studied by nanometre-scale profiling of electrical potential. [Электронный ресурс] / Chun-Sheng Jiang, Mengjin Yang, Yuanyuan Zhou and others //Nature Communications, Published 28 Sep. 2015. – Access mode: www.nature.com/naturecommunications.
9. Dmitruk N.L. Au/GaAs photovoltaic structures with single-wall carbon nanotubes on the microrelief interface [Текст] / N.L. Dmitruk, O.Yu. Borkovskaya, S.V. Mamykin and others // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2015. – V. 18, №1. – P. 31 – 35.
10. Божко К.М. Модель R,L,C перехідного процесу в колі імпульсного вимірювача характеристик фотоелектричних сонячних батарей [Текст] /К.М. Божко, Т.О. Рудик, Г.С. Гуренок // Інформаційне суспільство:

- технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 12):
Всеукраїнська наукова конф. 22-23 квітня 2015 р.: тези доп. – Тернопіль.
– 2015. – С. 106-107.
11. Пухов Г.Е. Модели технологических процессов [Текст] /Г.Е. Пухов, Ц.С. Хатиашвили // К.: Техніка. – 1974. – 200с.
12. Льюнг Л. Идентификация систем [Текст] /Л.Льюнг – пер с англ. под ред. Я.З. Цыпкина // – М.: Наука. – 1991. – 432с.
13. Божко К. Применение метода аналитического описания кусочно-аналитических зависимостей [Текст] /К. Божко, А. Сильвестров, А. Скрынник // Bulgarian Journal for Engineering Design. – 2014. – Issue №23. – P. 33-39.
14. Корн Г. Справочник по математике [Текст] /Г.Корн, Т.Корн // М.: Наука. – 1974. – 831с.
15. Сильвестров А.М. Побудова математичних моделей складних нелінійних залежностей «вхід-вихід» об'єктів автоматизації [Текст] /А.М. Сильвестров, Л.Ю. Спінул, О.М. Скрынник // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. "Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація". –2012. – Випуск 25 (II). С. 14 – 17.
16. Пахалюк Р.І. Візуалізація дефектів кремнієвих фотоелектричних сонячних батарей [Текст] /Р.І. Пахалюк, К.М.Божко //Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси – 2014. – Вип. 40. – С. 3 – 7.
17. Порев В.А. Исследование люминесцирующих дефектов солнечных панелей [Текст] /В.А. Порев, Р.И. Пахалюк, К.М. Божко //Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. –2014. –№1. – С. 11-14.
18. Патент України на корисну модель №92797. Спосіб контролю дефектів в сонячних батареях /Божко К.М.; заявл. 04.02.2014, оприл. 10.09.2014, Бюл. № 17.

- 19.Порєв В.А. Застосування сплайн-функцій для збільшення швидкості контролю динамічних параметрів зонної плавки [Текст] /В.А. Порєв, Ю.А. Агінський, К.М. Божко //Вісник НТУУ «КПІ». Секція: Приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 58 – 63.
- 20.Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов [Текст] /М.М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983.— 696 с.
- 21.Порєв В.А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів [Текст] /В.А.Порєв, Г.В.Порєв //Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2001. – №1. – С.56 – 61.
- 22.Олберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения [Текст] /Дж. Олберг, Е. Нильсен, Дж. Уолш. – М.:Мир. – 1972.- 316 с.
- 23.Божко К.М. Імітатор сонця для потужних сонячних батарей [Текст] /К.М. Божко //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 3): Всеукраїнська наукова конф. 30-31 березня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С. 46 – 47.
- 24.Денисюк. В.П. Сплайны и их приложения в задачах моделирования и обработки сигналов [Текст] /В.П. Денисюк, Б.Г. Марченко. – К.: Техніка. – 246 с.
- 25.Electrical Characterization of Photovoltaic Materials and Solar Cells with the Model 4200-SCS Semiconductor Characterization System [Текст]. – :Keithley Inc. – App.Note 3026. – 2012. – 100 p.
- 26.3708 Programmable Curve Tracer. User Manual [Текст]. – :Tektronix Inc. Publ. – 1990. – 238 p.
- 27.Pulsed I-V Testing for Components and Semiconductor Devices [Текст]. – :Keithley Inc.– 2014. – 74 p.
- 28.Божко К.М. Імпульсне вимірювання вольт-амперної характеристики сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 4):

- Всеукраїнська наукова конф. 25-26 квітня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С. 101-102.
- 29.Божко К.М. Імпульсне вимірювання вольт-амперної характеристики фотоелектричної сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко, А.Д. Женілова //Приладобудування: стан і перспективи: 14-а Міжнародна науково-технічна конф. 22-23 квітня 2015 р.: тези доп. – Київ. – 2015. – С.142-143.
- 30.Lynn K. Test Method for Photovoltaic Module Ratings. [Текст] /К. Lynn. – :A Research Institute of the University of Central Florida. – 2001. – 16 p.
- 31.Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений [Текст] /К.Г. Рего . – К.: Техніка. – 1987. – 128 с.
- 32.Вошни Э. Динамика измерительных цепей [Текст] /Э. Вошни. – М. Энергия. – 1969. – 212 с.
- 33.Краус М. Измерительные информационные системы [Текст] /М. Краус, Э. Вошни – М.:Мир. – 1975. – 312 с.
- 34.Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. – 1990. – 288 с.
- 35.IRF1010N. Data sheet [Електронний ресурс]. – Access mode: <http://www.irf.com/package/irf1010n>
- 36.Дорожовець М.М. Опрацювання результатів вимірювань.[Текст] / М.М. Дорожовець. – Львів: Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2007. – 624 с.
- 37.Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники [Текст] /П.П. Орнатский. – К.: Вища школа. – 1982. – 450 с.
- 38.Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.