

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

«Розробка цифрового вимірювального приладу для моніторингу основних показників електричної мережі»

зі спеціальності 6.141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав

студент гр. ЕТ-81

Б. І. Нестеренко

Керівник

к.ф.-м.н., доцент

М. В. Петровський

## РЕФЕРАТ

с. 38, рис. 30.

Бібліографічний опис: Нестеренко Б. І. Розробка цифрового вимірювального приладу для моніторингу основних показників електричної мережі [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавр; спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Б.І. Нестеренко; керівник М.В. Петровський. – Суми: СумДУ, 2022. – 38 с.

Ключові слова:

сигнал, напруга, струм, повна потужність, активна потужність, реактивна потужність, коефіцієнт потужності, частота, програмування мікроконтролерів;

сигнал, напряжение, ток, полная мощность, активная мощность, реактивная мощность, коэффициент мощности, частота, программирование микроконтроллеров;

signal, voltage, current, apparent power, active power, reactive power, power factor, frequency, microcontroller programming.

Об'єкт дослідження: середнє квадратичне значення напруги та струму, споживана повна, активна та реактивна потужності, кут зсуву фаз між струмом та напругою, частота основної гармоніки напруги.

Короткий огляд:

В роботі проведено аналіз та описано методики вимірювання показників електромережі.

Розроблено ЦВП, що дозволяє розраховувати основні показники електромережі: середні квадратичні значення напруги та струму, повну, активну та реактивну потужності, косинус кута зсуву між напругою та струмом, частоту основної гармоніки напруги.

Проведено демонстрацію роботи приладу в різних програмах для симуляції електронних схем при різного роду навантаженнях: резистивно-індуктивному, резистивно-ємнісному та чисто резистивному.

					БР 3.6.141.440 ПЗ	3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ОП – операційний підсилювач;

ПК – персональний комп'ютер;

ЦВП – цифровий вимірювальний прилад;

ССР – Capture/Compare/PWM;

LCD – Liquid Crystal Display;

RMS – Root Mean Square;

ZCD – Zero Crossing Detect.

					БР 3.6.141.440 ПЗ	4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА МЕТОДИ ЇХ РОЗРАХУНКУ .....	8
1.1 Середнє квадратичне значення напруги та струму .....	8
1.2 Повна, активна та реактивна потужність .....	9
1.3 Коефіцієнт потужності ( $\cos\phi$ ) .....	9
1.4 Частота .....	11
2 СТВОРЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ .....	12
2.1 Вимірювання напруги .....	12
2.2 Вимірювання струму .....	17
2.3 Вимірювання $\cos\phi$ .....	19
2.4 Схема живлення активних елементів .....	22
2.5 Програмування мікроконтролера .....	23
2.5.1 Алгоритм виміру RMS напруги та струму .....	25
2.5.2 Алгоритм виміру $\cos\phi$ та частоти .....	26
2.5.3 Алгоритм виміру повної, активної та реактивної потужності .....	28
3 ДЕМОНСТРАЦІЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ ТА ОЦІНКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	29
ВИСНОВКИ .....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	33
ДОДАТОК А .....	34
ДОДАТОК Б .....	38

					<b>БР 3.6.141.440 ПЗ</b>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробив</i>		<i>Нестеренко Б.І.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Керівник</i>		<i>Петровський М.В.</i>			5	38	
<i>Консульт.</i>					<b>СумДУ, ЕТ-81</b>		
<i>Н.контроль</i>							
<i>Завтвер.</i>		<i>Лебединський І.І.</i>					

*Розробка цифрового вимірювального приладу для моніторингу основних показників електричної мережі. Пояснювальна записка*

## ВСТУП

В електричних мережах під час експлуатації різноманітного обладнання спостерігаються відхилення від нормованих значень таких параметрів як напруга та частота, а також відбуваються постійні зміни таких параметрів як струм, потужність та кут зсуву фаз між синусоїдами напруги та споживаного струму. Ці процеси обумовлені постійною зміною характеристик як самої мережі так і навантаження в процесі експлуатації електрообладнання. У зв'язку з цим виникає необхідність у постійному моніторингу основних параметрів електричної мережі, на основі яких можуть бути прийняті рішення по оптимізації роботи її складових частин.

Одна із проблем, з якою стикається користувач або кваліфікований обслуговуючий персонал при експлуатації електротехнічних мереж, це необхідність одночасного вимірювання одразу декількох електричних величин. Причому вимірювання деяких параметрів електричної мережі потребує проведення математичної обробки виміряних сигналів напруги та струму.

У цьому плані ефективним вирішенням задачі є створення цифрових вимірювальних систем з використанням мікроконтролерів, що дозволяє реалізувати багатфункціональні пристрої, що мають низьку собівартість.

Електропостачання передбачає забезпечення споживачів електричною енергією. Для стабільного функціонування різних сфер діяльності суспільства, пов'язаних з електричною енергією, необхідно щоб основні параметри електричної мережі не виходили за нормативно допустимі рамки. Для фіксації відхилень цих показників використовують різні вимірювальні пристрої. Серед яких: вольтметри, амперметри, ватметри, фазометри, частотоміри та інш.

За принципом дії вони поділяються на:

- електромеханічні;
- електронні - аналогові і цифрові;

					БР 3.6.141.440 ПЗ	6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За призначенням:

- постійного струму;
- змінного струму;
- універсальні;

За конструкцією і способом застосування:

- щитові;
- переносні;
- стаціонарні;

Сьогодні є багато приладів для моніторингу показників енергомережі, наприклад, РПМ-416, ИМС-Ф1, КМС-Ф1, DIRIS A10, АВВ М1М 15, які різняться за точністю вимірювань, кількістю вимірюваних параметрів, а також за ціною.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка пристрою для моніторингу основних показників однофазної електричної мережі напругою 220 В, а також демонстрація його працездатності за допомогою комп'ютерних програм для моделювання електронних схем.

					БР 3.6.141.440 ПЗ	7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА МЕТОДИ ЇХ РОЗРАХУНКУ

До основних показників електричної мережі відносять:

- середнє квадратичне значення (RMS) напруги та струму;
- повну, активну та реактивну потужності;
- коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ ;
- частоту.

## 1.1 Середнє квадратичне значення напруги та струму

Середнє квадратичне значення сигналу (діюче, ефективне) найбільш зручне для практичних розрахунків, так як воно характеризує постійну величину, дія якої за період вимірювання виконує ту ж саму роботу, що і змінний сигнал. Для його знаходження використовують наступну формулу:

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T s(t)^2 dt}. \quad (1.1)$$

Для пристроїв, побудованих на базі ЕОМ ця формула матиме наступний вигляд:

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^w s_i^2}{w}}, \quad (1.2)$$

де  $w$  – кількість вимірів (семплів) за період вимірювання;

$s_i$  – миттєве значення сигналу;

Для кращої точності вимірювань доречно обирати частоту вибірки хоча б у два рази більшу за максимальну частоту вимірюваного сигналу (теорема відліків Віттакера – Найквіста – Котельникова – Шеннона). Це означає, що

					БР 3.6.141.440 ПЗ	8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для напруги, яка містить у собі складову 3-ої гармоніки (150 Гц), частота вибірки має бути більша або дорівнювати 300 Гц, а для 9-ої гармоніки (450 Гц) – не менше ніж 900 Гц.

## 1.2 Повна, активна та реактивна потужність

Для знаходження середньоквадратичного значення потужності необхідно попередньо розрахувати середньоквадратичні значення струму та напруги, а також косинус кута зсуву між ними. Знаючи ці три величини ми можемо знайти повну, активну та реактивну потужності за формулами:

$$S_{\text{rms}} = U_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}}, \quad (1.3)$$

$$P_{\text{rms}} = U_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \cdot \cos \varphi, \quad (1.4)$$

$$Q_{\text{rms}} = U_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \cdot \sin \varphi. \quad (1.5)$$

## 1.3 Коефіцієнт потужності ( $\cos\varphi$ )

Як вже згадувалося раніше,  $\varphi$  – це кут зсуву між векторами напруги та струму, що залежить від характеру навантаження. Так, для повністю резистивного навантаження кут зсуву відсутній, а  $\cos\varphi = 1$  (рис. 1.1).

При ємнісному навантаженні напруга відстає від струму на  $90^\circ$  (рис. 1.2).

При індуктивному навантаженні напруга випереджає струм на  $90^\circ$  (рис. 1.3).

					<i>БР 3.6.141.440 ПЗ</i>	9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



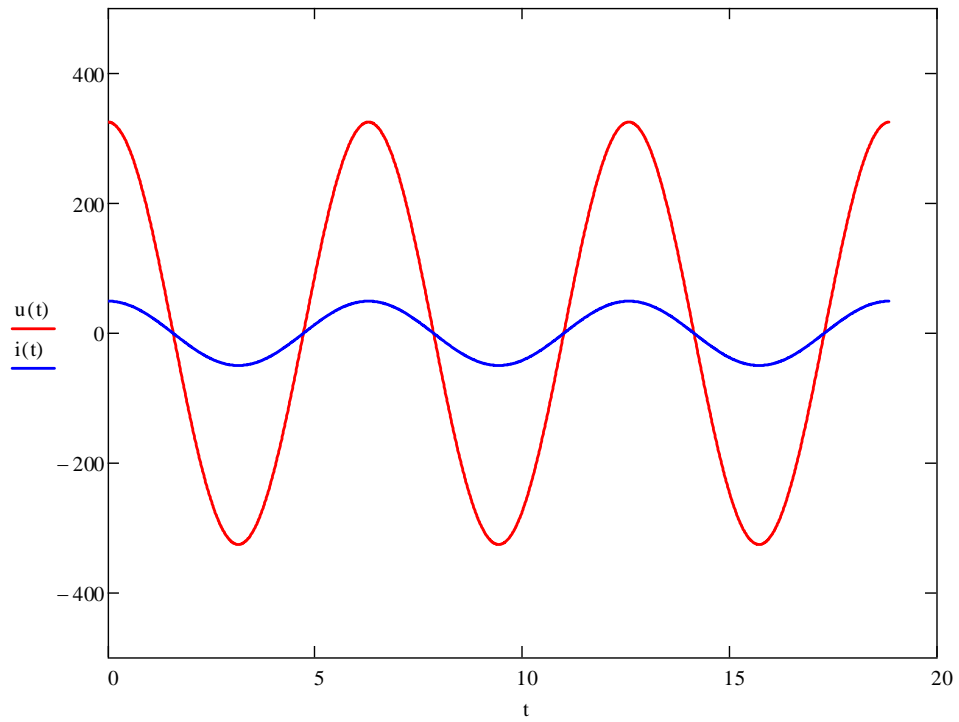


Рисунок 1.1 – Кут зсуву фаз при резистивному навантаженні

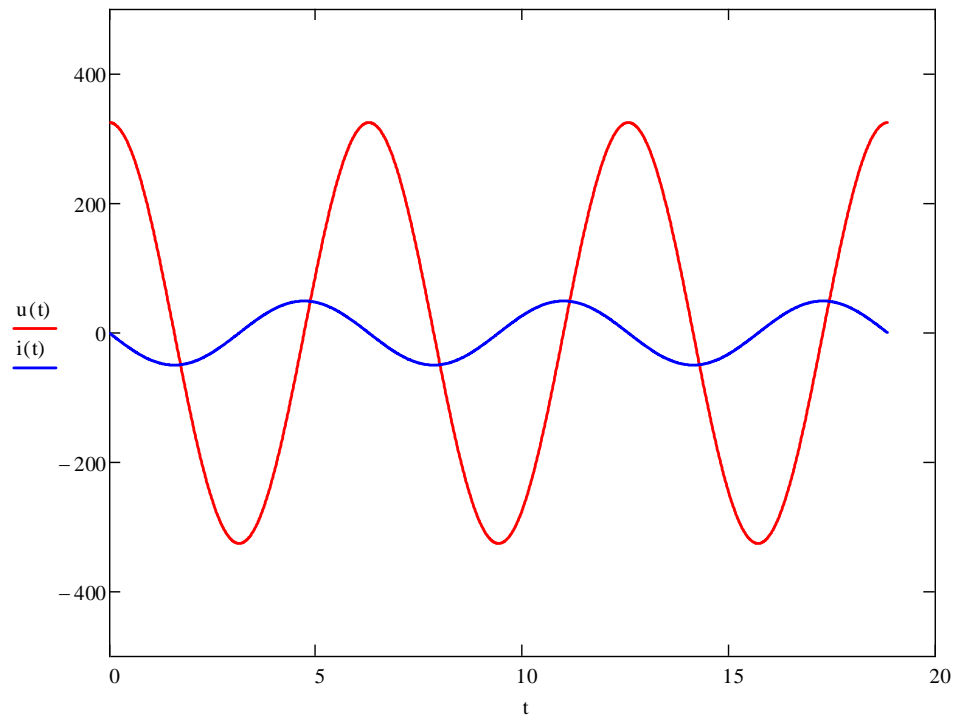


Рисунок 1.2 – Кут зсуву фаз при ємнісному навантаженні

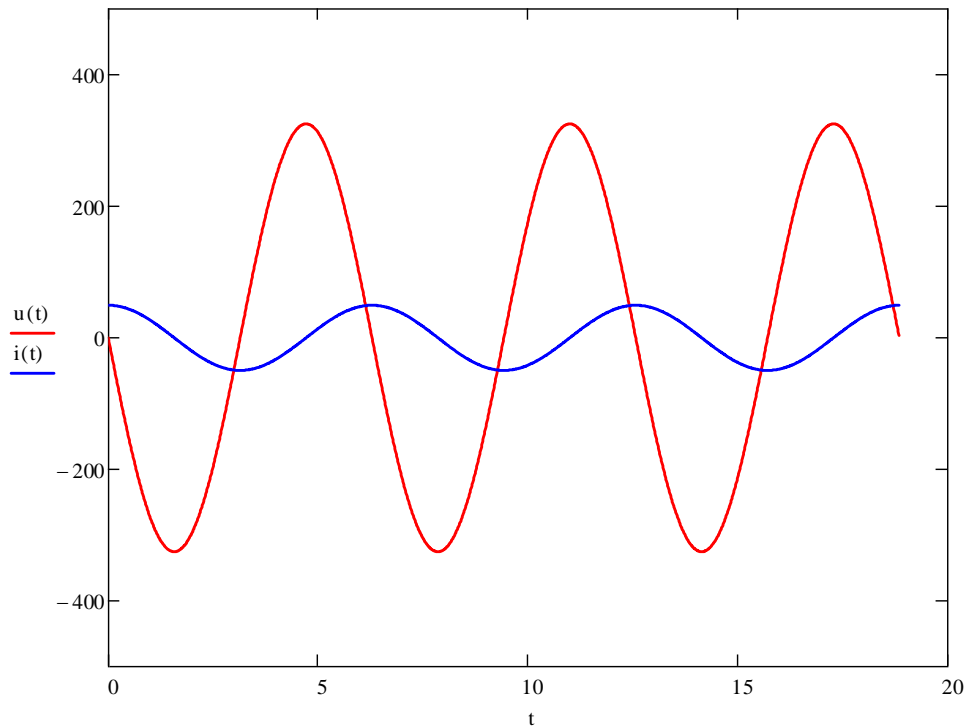


Рисунок 1.3 – Кут зсуву фаз при індуктивному навантаженні

Для знаходження кута зсуву використовують ZCD схеми, що побудовані на різних електронних компонентах, топологія яких буде розглянута в другому розділі.

## 1.4 Частота

Принцип знаходження частоти також базується на використанні ZCD схем. Алгоритм виміру частоти буде докладно розглянуто в подальших розділах.

## 2 СТВОРЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

Головним елементом пристрою, що розроблюється, обрано 8-бітний мікроконтролер PIC18F2525 фірми Microchip. Цей простий та доступний мікроконтролер володіє всіма необхідними характеристиками для побудови запропонованого пристрою. Зокрема, він має 10-бітний АЦП для точного вимірювання аналогових сигналів, достатню кількість периферійних модулів для реалізації основної логіки, апаратну підтримку множення, що дозволяє прискорювати обчислення, значну кількість виводів для подальшої модернізації пристрою.

### 2.1 Вимірювання напруги

Оскільки мікроконтролери не можуть вимірювати напругу більшу за напругу живлення, а також не здатні вимірювати сигнал негативної полярності, то першочерговою задачею є створення схеми, яка б дозволила підготувати вхідний сигнал змінної напруги для вимірювання, але не спотворити його.

Для зменшення амплітуди мережевої напруги застосовують трансформатор напруги. Для того, щоб позбавитися від негативних напівхвиль, запропоновано використати суматор на операційному підсилювачі (ОП). На відміну від найпоширенішого і найпростішого варіанту вирішення цієї проблеми – діодів, які через свою нелінійну ВАХ вносять спотворення у вимірюваний сигнал, ОП дозволить зберегти форму негативної напівхвилі для вимірювань. Пояснення щодо функціонування суматора демонструє рис. 2.1.

					БР 3.6.141.440 ПЗ	12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

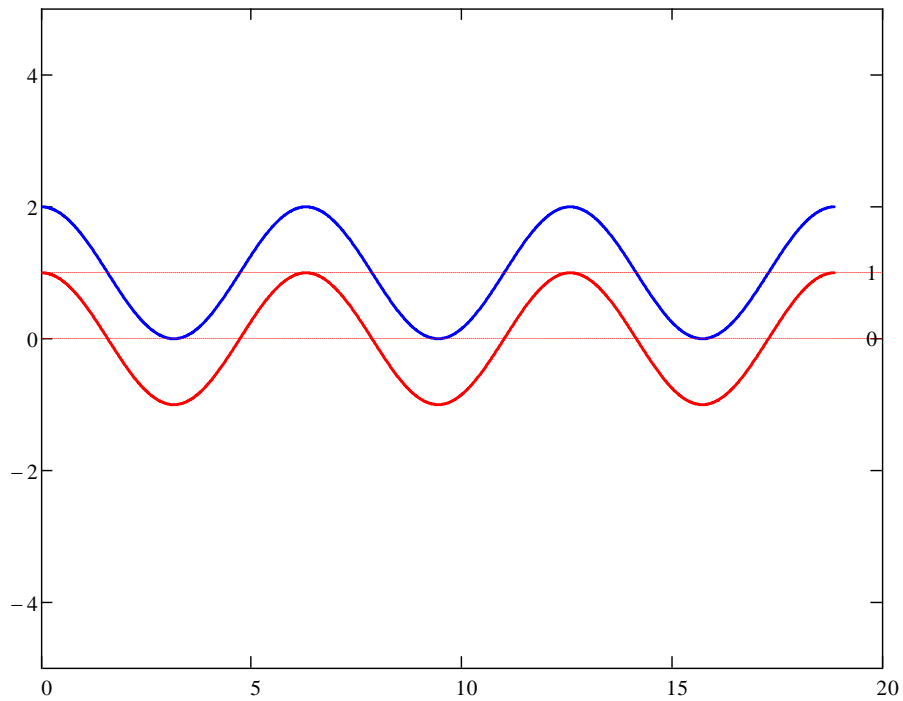


Рисунок 2.1 – До пояснення принципу дії суматора напруг

Червоний сигнал являє собою синусоїду з амплітудою 1 В. Такий сигнал не можна подавати на АЦП мікроконтролера напряму. Але досить лише додати постійну складову амплітудою 1 В і такий сигнал вже можна використовувати для вимірювання мікроконтролером. Типова схема суматора на ОП має наступний вигляд:

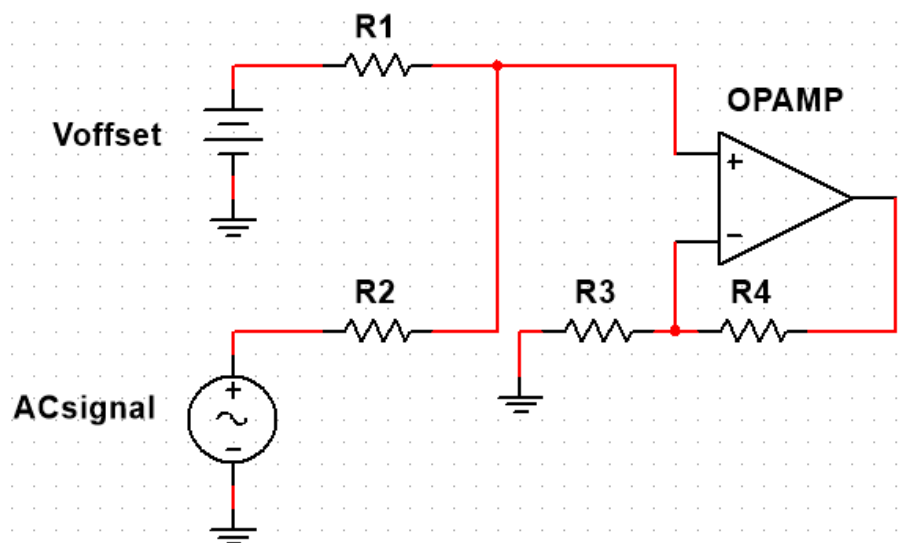


Рисунок 2.2 – Суматор з використанням ОП

$A_{Csignal}$  – вимірюваний сигнал, у нашому випадку – напруга;

$V_{offset}$  – постійна складова, величину якої обираємо такою, що дорівнює половині амплітуди джерела опорної напруги АЦП (напруги живлення мікроконтролера, для PIC18F дорівнює 5 В);

$R_1, R_2$  – резистори, що визначають коефіцієнт «підмішування» доданків.

$R_3, R_4$  – резистори, що визначають коефіцієнт підсилення ОП, який для неінвертуючої схеми дорівнює:

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R_4}{R_3}. \quad (2.1)$$

При обраній нами постійній складовій 2.5 В, амплітуда вимірюваного сигналу повинна теж бути рівною 2.5 В.

Розрахунок номіналів резисторів було проведено за допомогою наступної формули:

$$V_{out} = \left( V_{in} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) + V_{offset} \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \right) \cdot \text{Gain}. \quad (2.2)$$

Підставивши замість  $V_{in}$  максимальне значення амплітуди вхідного сигналу (2.5 В), а замість  $V_{out}$  бажане значення на виході (5 В), та задавшись значеннями резисторів  $R_3$  та  $R_1$  (10 кОм та 1 МОм відповідно) розраховуємо номінали інших резисторів.

Для роботи схеми потрібно амплітуду мережевої напруги зменшити до 2.5 В. Для цього було вирішено використовувати трансформатор напруги UC30S-2-12015 230/12 В (рис. 2.3) та резистивний дільник. Вторинна напруга трансформатора була обрана з урахуванням необхідності живлення активних елементів пристрою за допомогою лінійного стабілізатора LM7805, який потребує для коректної роботи випрямлену напругу амплітудою 9-15 В. Робота стабілізатора буде розглянута пізніше.



Рисунок 2.3 – Трансформатор напруги UC30S-2-12015

Типова схема резистивного дільника має наступний вигляд:

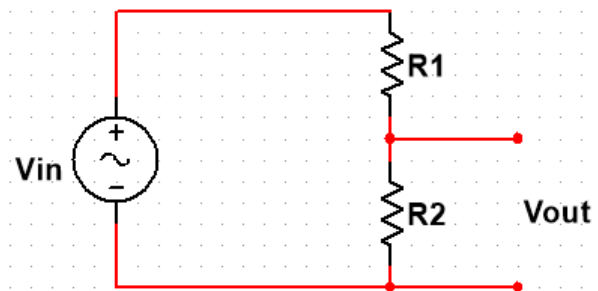


Рисунок 2.4 – Резистивний дільник напруги

Для розрахунку номіналів резисторів було використано наступну формулу:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right). \quad (2.3)$$

Задамо максимальну вимірювану напругу 240 В. Тоді після трансформатора будемо мати діючу напругу 12.52 В. На виході резистивного дільника повинні мати сигнал амплітудою 2.5 В. Знаючи всі ці дані розраховуємо номінали резисторів.

Для перевірки правильності розрахунків використаємо програму для симуляції електронних схем Multisim.

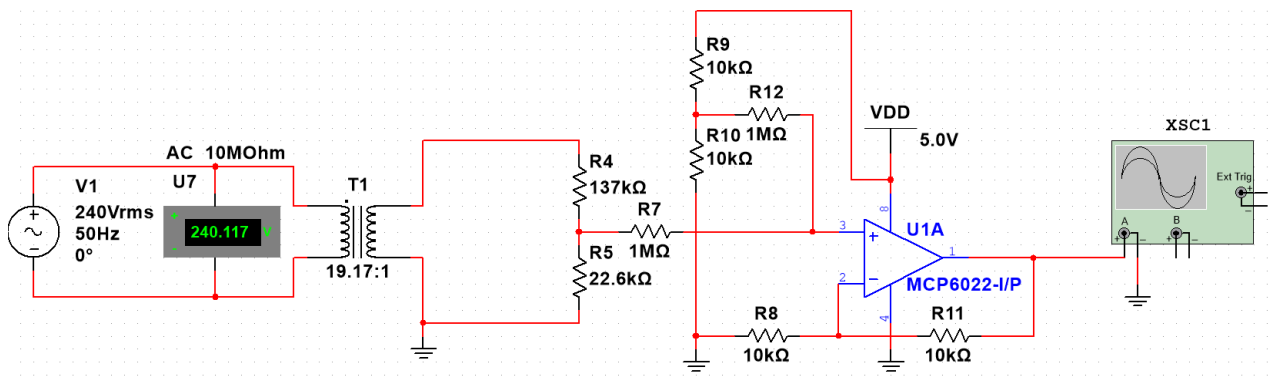


Рисунок 2.5 – Схема для виміру мережевої напруги

Критерієм для вибору моделі ОП (рис. 2.5) була наявність Rail-to-Rail входів та виходів, що дозволить сигналам набувати величини напруги живлення, а також можливість однополярного живлення.

Задавши в генераторі значення середньої квадратичної напруги 240 В, на виході отримуємо наступну осцилограму (рис. 2.6).

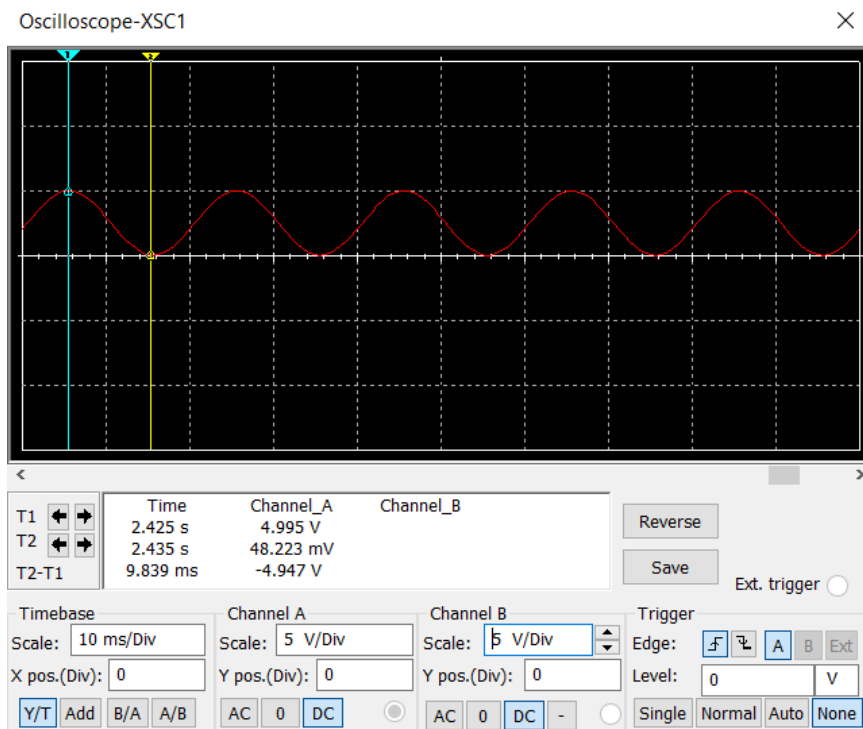


Рисунок 2.6 – Осцилограма вихідного сигналу схеми для вимірювання напруги

Отримана осцилограма вказує на правильність обраних елементів схеми.

## 2.2 Вимірювання струму

Для вимірювання струму існує багато методів, заснованих на різного роду датчиках:

- датчик струму на ефекті Холла (ACS712, WCS1800, LEM LTS 15-NP);
- датчик струму компенсаційного типу (датчик з нульовим потоком);
- трансформаторний датчик з шунтом у вигляді резистора (TA12-100, ZMCT103C);

Для запропонованої системи було вирішено використати трансформаторний датчик з шунтом у вигляді резистора. Як трансформатор струму було обрано трансформатор моделі VZCT18AL 30/5 А (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Трансформатор струму VZCT18AL 30/5 А

Для шунта було вирішено використовувати спеціальний шунт з константану опором 0.01 Ом (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Вимірювальний шунт

					БР 3.6.141.440 ПЗ	17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Задавши максимальний вимірюваний струм 50 А (амплітудне значення), розраховуємо падіння напруги на шунті, що складатиме 83.3 мВ. Для збільшення точності вимірювань такий сигнал потрібно збільшити по амплітуді. Для цього розрахуємо параметри суматора, який ми розглядали раніше.

Правильність розрахунків перевіримо в Multisim.

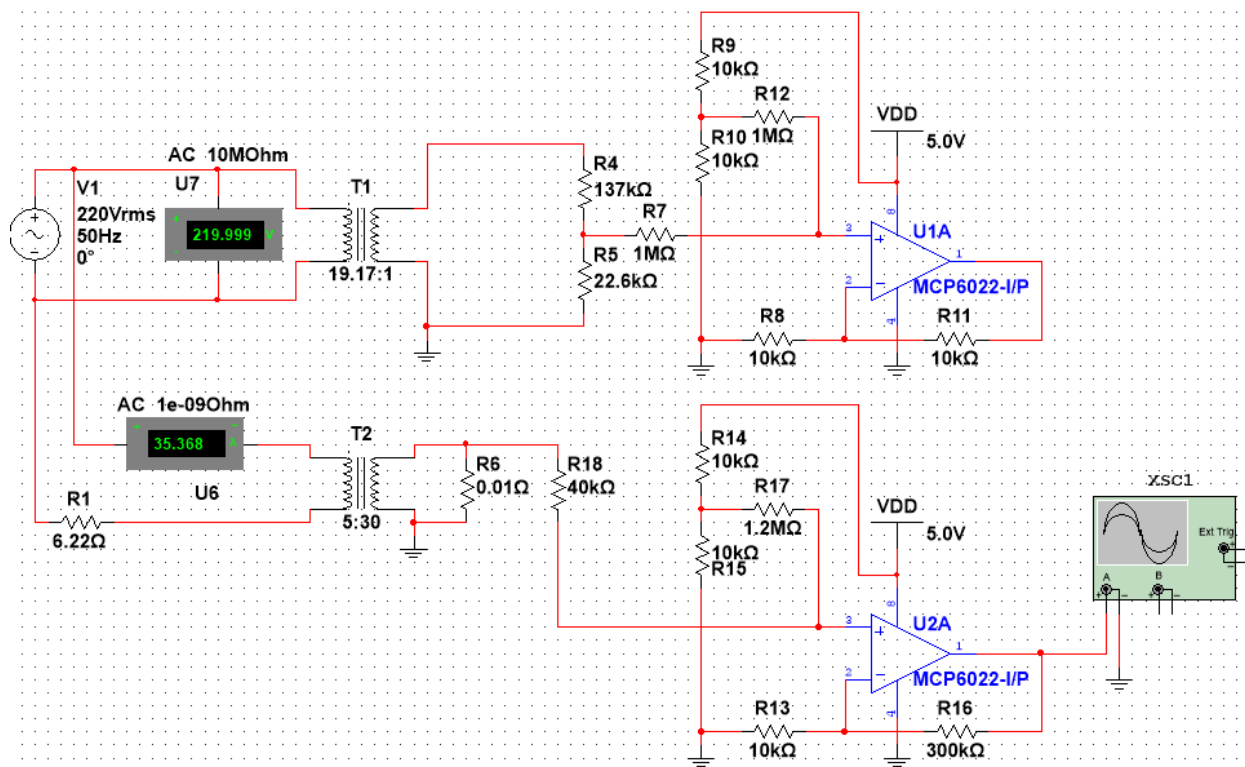


Рисунок 2.9 – Схема для вимірювання струму

При напрузі 220 В та опорі резистора  $R1 = 6.22 \text{ Ом}$ , струм мережі становитиме 50 А (амплітудне значення).

На виході ОП у колі виміру струму маємо наступну осцилограму:

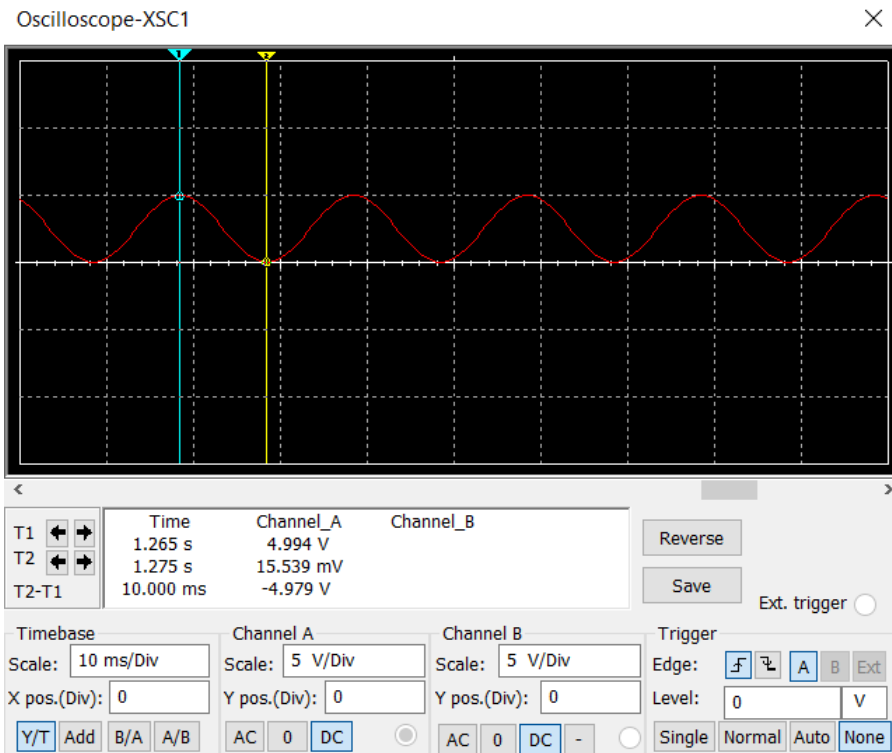
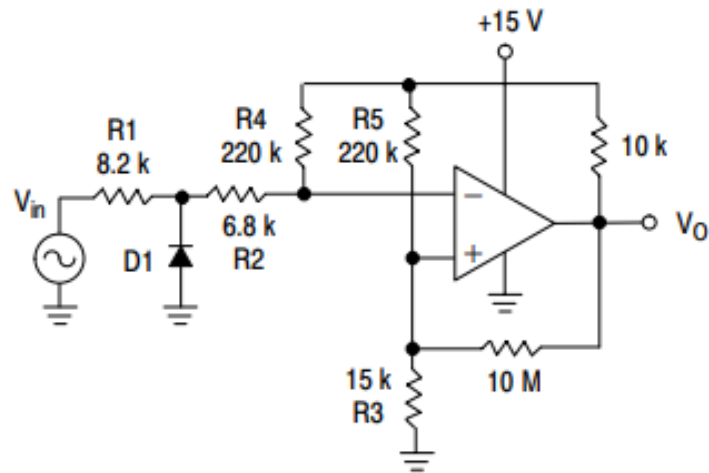


Рисунок 2.10 – Осцилограма вихідного сигналу схеми для вимірювання струму

Отримана осцилограма вказує на правильність обраних елементів схеми.

### 2.3 Вимірювання $\cos\varphi$

Для вимірювання кута зсуву фаз вирішено застосувати схему для виявлення переходу сигналу через нуль (ZCD) з використанням компараторів. Компаратор – це електричний компонент, що порівнює сигнали на своїх входах і в залежності від того, який з них більший, видає логічний сигнал на виході. Якщо ж на один із входів подати нуль, а на інший подати синусоїду, то отримаємо так званий детектор нуля. Модель компаратора було обрано з урахуванням необхідності однополярного живлення. Використовуючи документацію на компаратор LM239DG, було модифіковано типову схему детектора нуля (рис. 2.11) [14]. Схема використаного детектора нуля показана на рис. 2.12.



D1 prevents input from going negative by more than 0.6 V.

$$R1 + R2 = R3$$

$$R3 \leq \frac{R5}{10} \text{ for small error in zero crossing}$$

Рисунок 2.11 – Схема детектора нуля на LM239DG

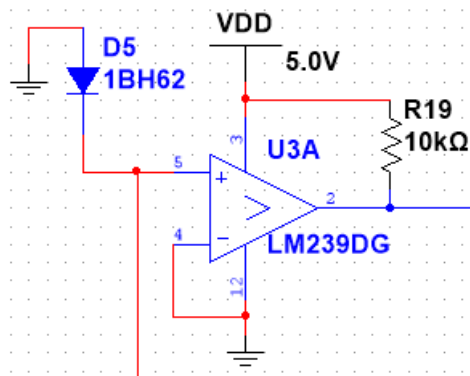


Рисунок 2.12 – Модифікована схема детектора нуля на LM239DG

Правильність обраної схеми детектора була перевірена в Multisim (рис. 2.13).

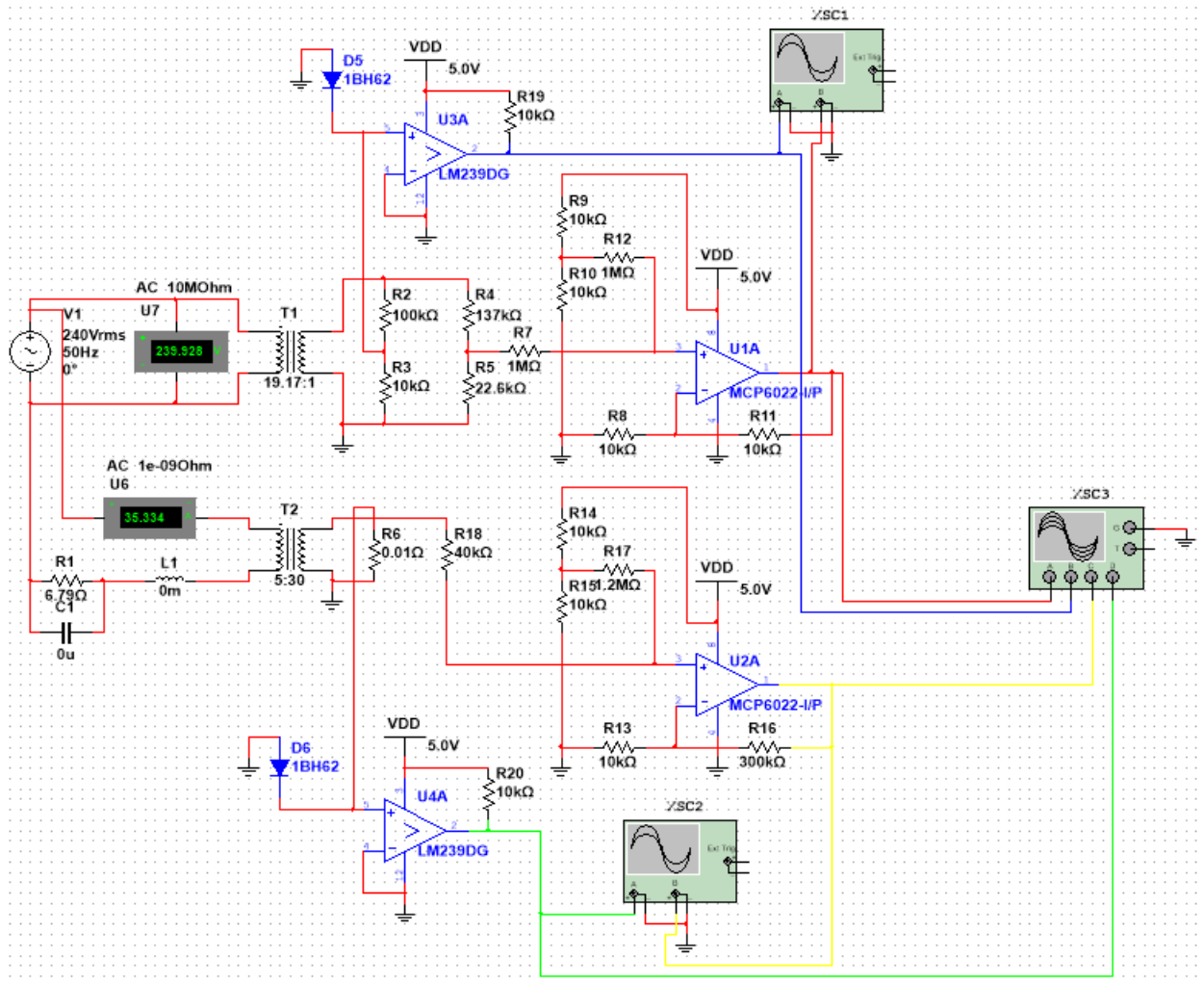


Рисунок 2.13 – Запропонована схема детектора нуля на LM239DG

Резистивний дільник з якого подається сигнал для детектора нуля напруги потрібен для того, щоб його величина не перевищувала напругу живлення компаратора.

Осцилограми вихідних сигналів детекторів нуля для напруги та струму показані у вигляді осцилограм на рис. 2.14. Для наочності на цій осцилограмі показано також синусоїдальні сигнали, які подаються на детектори напруги та струму.

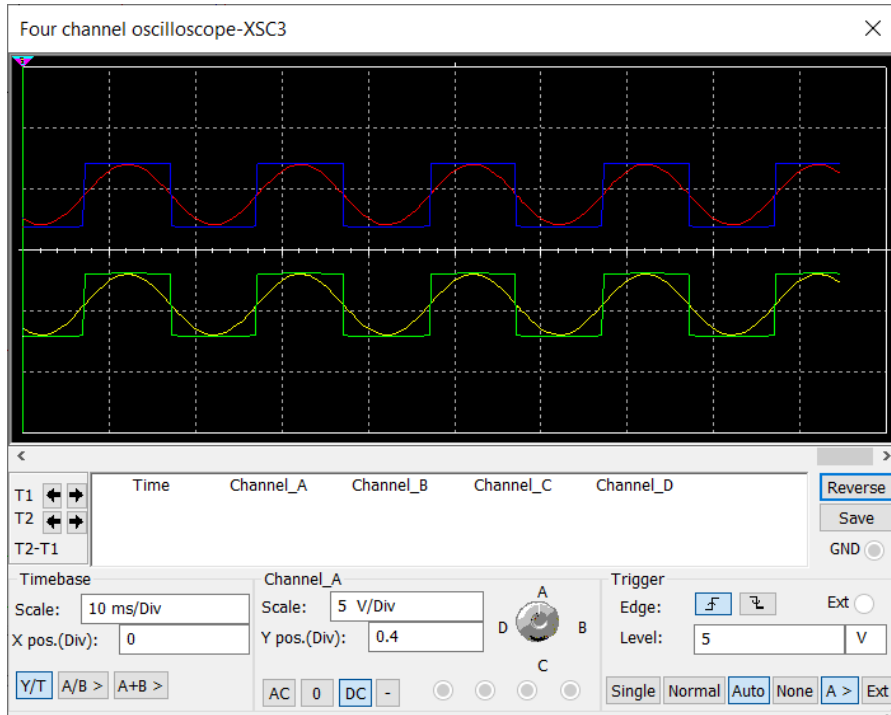


Рисунок 2.14 – Осцилограми вихідних сигналів детекторів нуля для напруги та струму

## 2.4 Схема живлення активних елементів

Для живлення активних елементів схеми вирішено використати просту та типову схему випрямлення та стабілізації напруги на двонапівперіодному мостовому випрямлячі та лінійному стабілізаторі LM7805 на напругу 5 В (рис. 2.15).

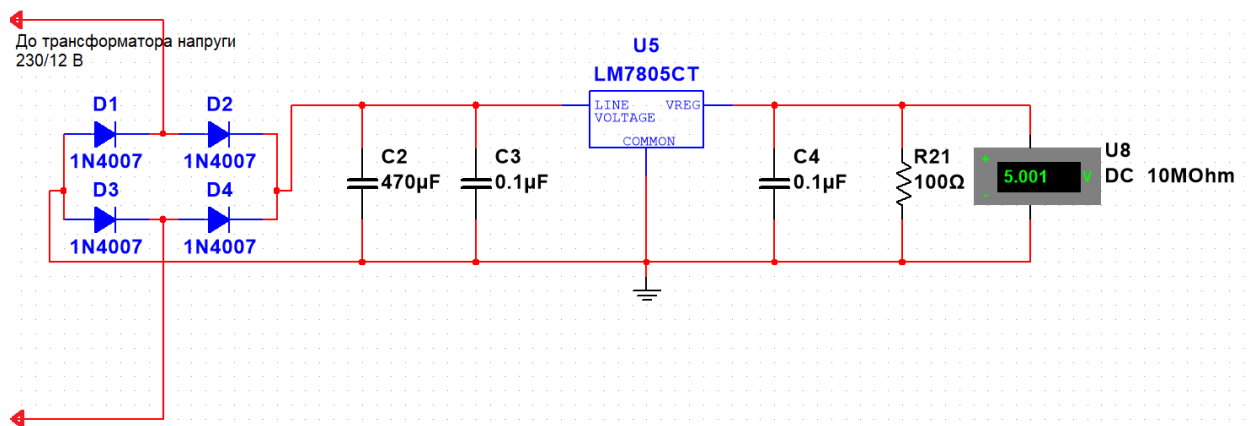


Рисунок 2.15 – Схема випрямлення та стабілізації напруги

## 2.5 Програмування мікроконтролера

Програма була написана у середовищі розробки MPLAB X IDE від Microsoft з використанням компілятора XC8 мови програмування високого рівня C.

Симуляція роботи мікроконтролера була реалізована за допомогою програми Proteus Design. Для відображення інформації було обрано символний дисплей LCD 2004. Для економії виводів мікроконтролера зв'язок з дисплеєм відбувається через регістр зсуву 74HC595.

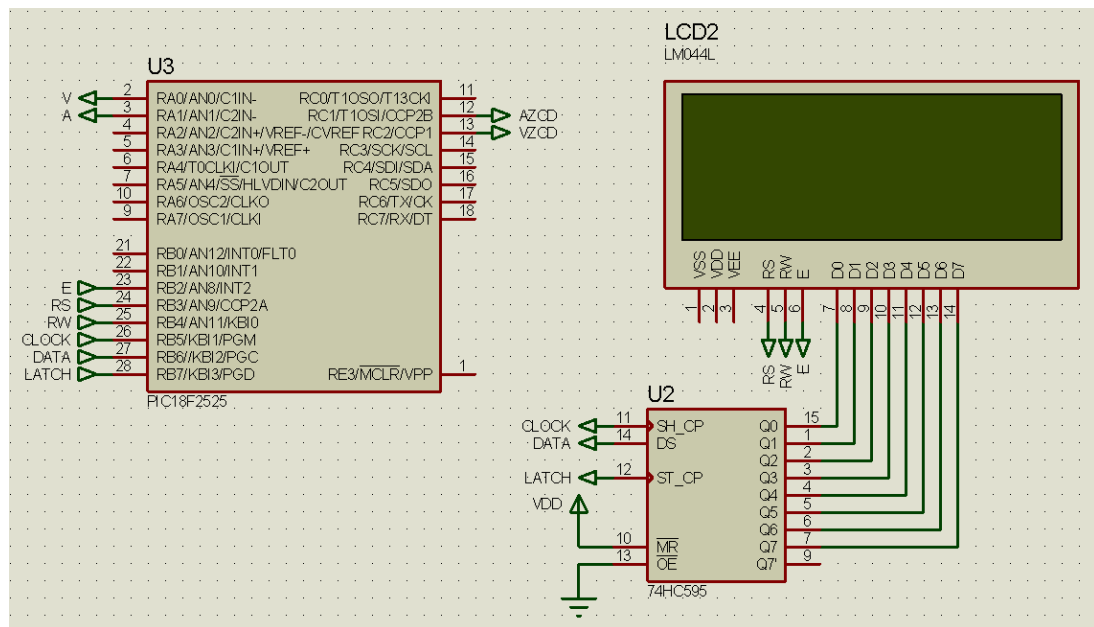


Рисунок 2.16 – Схема підключення мікроконтролера в Proteus Design

Повна схема пристрою вимірювання представлена у додатку Б.

Призначення ввідів наступне:

V – вимірювана напруга з виходу суматора у колі трансформатора напруги;

A – вимірювана напруга з виходу суматора у колі трансформатора струму;

VZCD – сигнал детектора нуля у колі трансформатора напруги;

AZCD – сигнал детектора нуля у колі трансформатора струму.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Виводи E, RS, RW, CLOCK, DATA, LATCH призначені для роботи з дисплеєм через регістр зсуву.

Алгоритм роботи мікроконтролера змальований на наступній блок-схемі:



Рисунок 2.17 – Загальна блок-схема програми мікроконтролера

Повний код програми представлено у додатку А.

У блоці ініціалізація відбувається попереднє налаштування периферії мікроконтролера, а саме:

1. Налаштування зовнішнього осцилятора 16MHz;
2. Налаштування АЦП;
3. Налаштування портів на вхід/вихід;
4. Налаштування модулів захоплення (CCP1 та CCP2) та таймеру;
5. Налаштування переривань.

Налаштування мікроконтролера в програмному коді представлено функцією `setup()`.

Після налаштування мікроконтролера відбувається ініціалізація дисплея (функція `LCDInit()`).

Далі програма переходить у безкінечний цикл, в якому і відбувається вимірювання всіх величин та відображення їх на дисплеї.

Розглянемо детальніше, як відбувається вимір кожної величини.

## 2.5.1 Алгоритм виміру RMS напруги та струму

Основою вимірювання напруги та струму є функція RMS(), аргументом якої є канал вимірювання (мікроконтролер PIC18F2525 має 12 каналів вимірювання).

```
float RMS(uint8_t channel){
    uint16_t i, t = 0;
    uint32_t V1, V2 = 0;
    float RMS_value = 0;

    for(i = 0; i < 2106; i++)
    {
        t = ADC_read(channel);
        V1 = V1 + (uint32_t)t * (uint32_t)t;
        V2 = V2 + (uint32_t)t;
    }
    RMS_value = sqrt((V1/2106.0 - ((V2/2106.0)*(V2/2106.0))));
    RMS_value = 0.004883f * RMS_value;
    if (channel == 0U)
    {
        RMS_value = (RMS_value * ((float)137000 + (float)22600) / ((float)22600)) * ((float)230 / (float)12);
    }
    else
    {
        RMS_value = (RMS_value * ((float)100.0 * (float)6.0 / (float)30.0));
    }
    return RMS_value;
}
```

Рисунок 2.18 – Функція RMS()

Вимірювання відбувається протягом шести періодів (число вимірювань 2106 було підібрано експериментальним шляхом) з частотою 17550 Гц.

Для того, щоб знайти середнє квадратичне значення у змінній V1 акумулюється сума квадратів всіх вимірювань, а в змінній V2 – сума всіх вимірювань.

Це потрібно для того, щоб програмно прибрати постійну складову сигналу:

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^w s_i^2}{w} - \left(\frac{\sum_{i=1}^w s_i}{w}\right)^2}, \quad (2.4)$$

де  $\frac{\sum_{i=1}^w s_i}{w}$  – середнє значення сигналу за період вимірювання;



При розрядності АЦП 10 біт, його роздільна здатність складає:

$$\Delta = \frac{U_{\text{ref}}}{2^{10}} = \frac{5}{2^{10}} = 0.004883 \text{ В.} \quad (2.5)$$

Добуток отриманого середнього квадратичного значення на коефіцієнт  $\Delta$  дає змогу отримати результат у вольтгах. Далі, в залежності від вимірюваного каналу, відбувається перерахунок величини з урахуванням різних коефіцієнтів.

Для напруги враховуються коефіцієнти трансформації трансформатора та резистивного дільника.

Щоб знайти значення струму спочатку треба поділити отриману напругу на опір шунта, а потім врахувати коефіцієнт трансформації трансформатора струму та коефіцієнт підсилення суматора.

Після розрахунку струму та напруги їх значення виводяться на дисплей.

## 2.5.2 Алгоритм виміру $\cos\phi$ та частоти

Вимір кута зсуву між напругою та струмом, а також частоти відбувається у функції переривання ISR (рис. 2.19).

```
void __interrupt() ISR(void)
{
    if(PIE1bits.CCP1IE && PIR1bits.CCP1IF)
    {
        if (flag)
        {
            vEdge2 = ((CCPR1H << 8) | CCPR1L);
            freqW = vEdge2 - vEdge;
            flag = 0;
        }
        vEdge = ((CCPR1H << 8) | CCPR1L);
        flag = 1;
        PIR1bits.CCP1IF = 0;
    }
    if(PIE2bits.CCP2IE && PIR2bits.CCP2IF)
    {
        aEdge = ((CCPR2H << 8) | CCPR2L);
        shiftW = aEdge - vEdge;
        PIR2bits.CCP2IF = 0;
    }
}
```

Рисунок 2.19 – Функція переривання

Модулі ССР дозволяють розрахувати час між двома подіями, у нашому випадку це передній фронт сигналів детекторів нуля.

Для пояснення роботи цієї підпрограми розглянемо роботу детектора нуля при резистивно-індуктивному навантаженні (рис. 2.20).

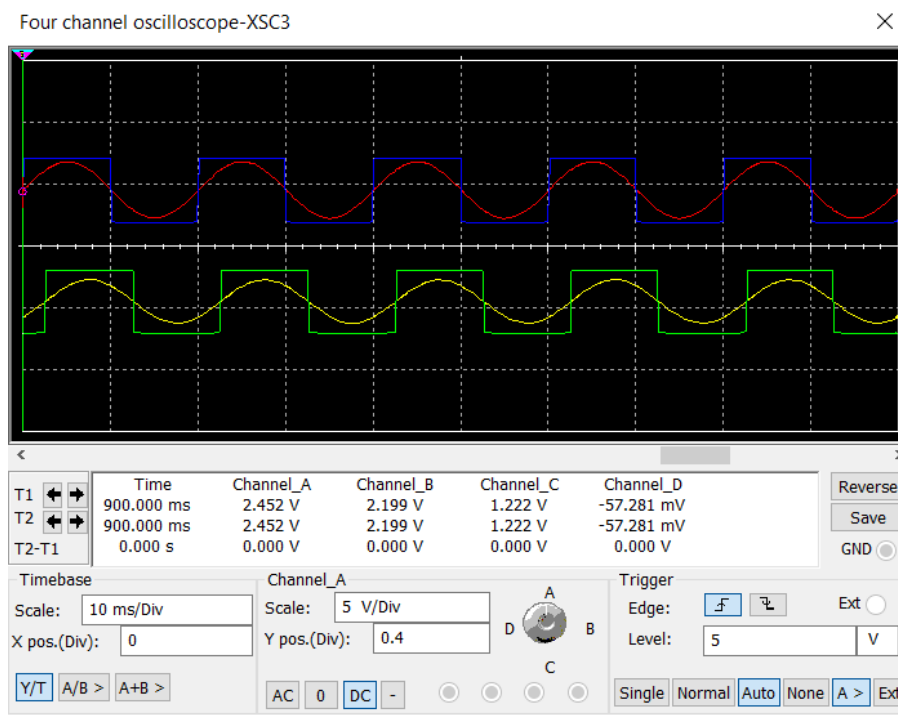


Рисунок 2.20 – Осцилограма роботи детекторів нуля при резистивно-індуктивному навантаженні

Модуль ССР1, який приймає сигнал з детектора нуля напруги викличе переривання при передньому фронті імпульсу і програма збереже значення таймера. Модуль ССР2, який приймає сигнал з детектора нуля струму, через деякий час також викличе переривання і програма розрахує різницю в часі між цими подіями. Перерахування значень таймера в радіани відбувається в основному циклі.

Вимір частоти відбувається за аналогічним алгоритмом, але за дві події беруться два послідовні передні фронти імпульсів детектора нуля напруги мережі. В основному циклі програми це значення перетворюється в частоту і виводиться на дисплей разом зі значенням  $\cos\phi$ .

### 2.5.3 Алгоритм виміру повної, активної та реактивної потужності

Розрахунок цих трьох величини відбувається за формулами (1.3), (1.4), (1.5), що представлені раніше в розділі 1.2.

					БР 3.6.141.440 ПЗ	28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 ДЕМОНСТРАЦІЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ ТА ОЦІНКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Демонстрація роботи запропонованого пристрою проводиться у програмі Proteus Design.

Перевіримо роботу пристрою при резистивно-індуктивному навантаженні, комплексний опір якого складає  $8 + j6.28$  Ом (кут зсуву  $38.13^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0.7866$ ):

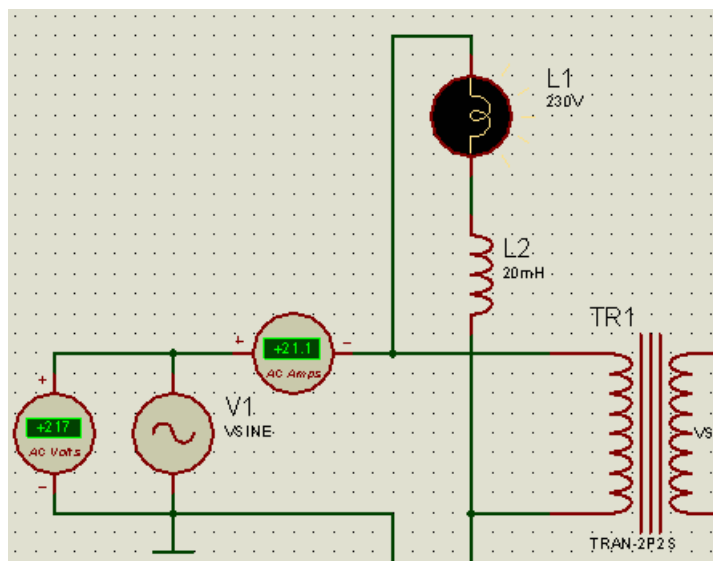


Рисунок 3.1 – Покази приладів з бібліотеки Proteus для резистивно-індуктивного навантаження

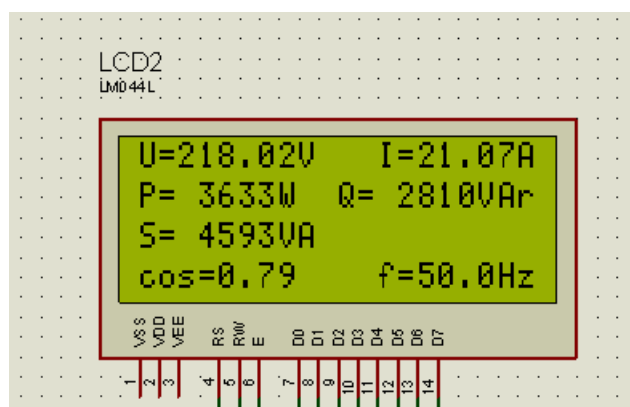


Рисунок 3.2 – Покази розробленого пристрою для резистивно-індуктивного навантаження

Перевіримо роботу пристрою при резистивно-ємнісному навантаженні, комплексний опір якого складає  $8 - j5.31$  Ом (кут зсуву  $-33.57^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0.833$ ):

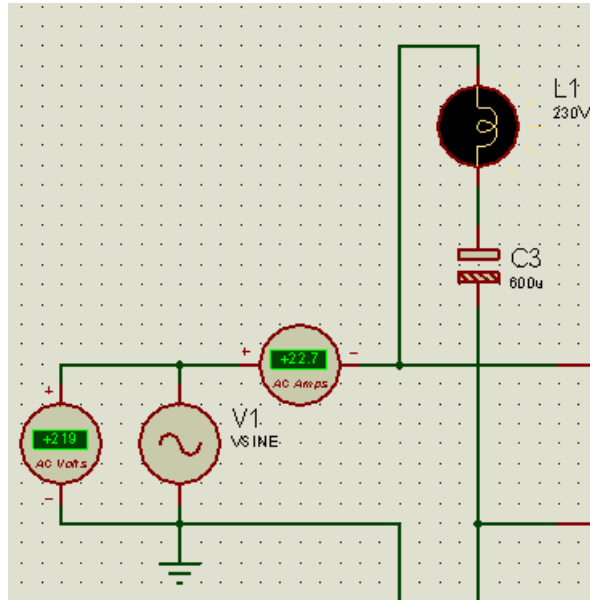


Рисунок 3.3 – Покази приладів з бібліотеки Proteus для резистивно-ємнісного навантаження

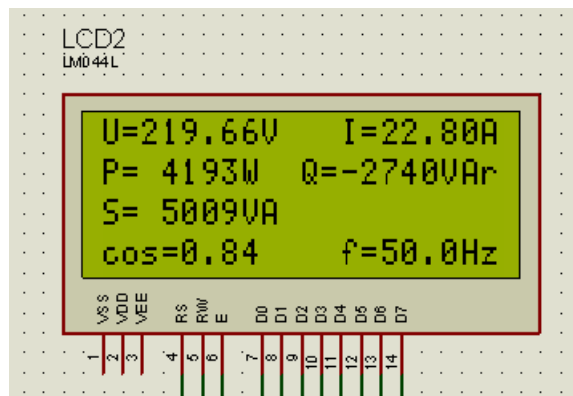


Рисунок 3.4 – Покази розробленого пристрою для резистивно-ємнісного навантаження

Перевіримо роботу пристрою при чисто резистивному навантаженні опір якого дорівнює 16 Ом (кут зсуву  $0^\circ$ ,  $\cos \varphi = 1$ ):

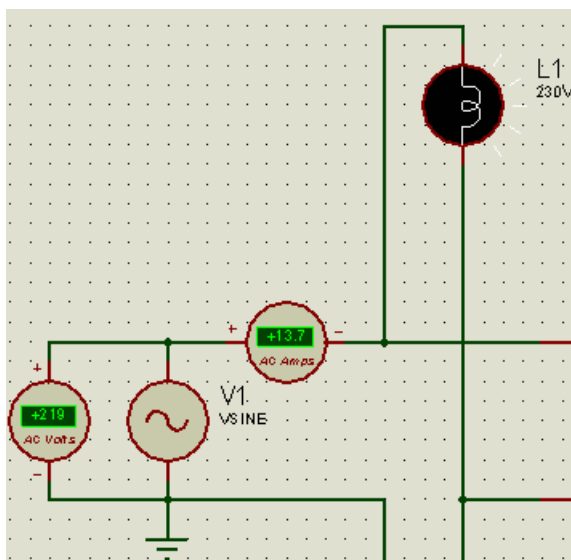


Рисунок 3.5 – Покази приладів з бібліотеки Proteus для чисто резистивного навантаження

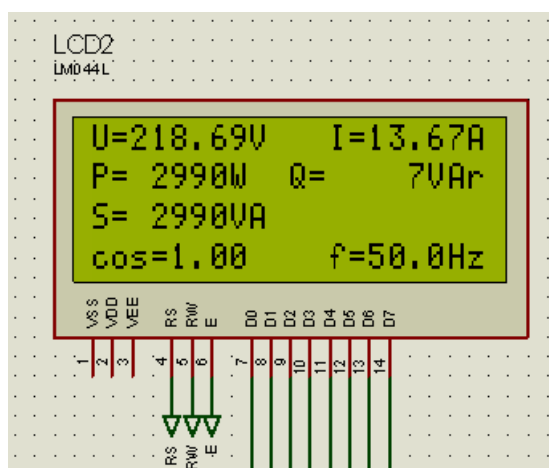


Рисунок 3.6 – Покази розробленого пристрою для чисто резистивного навантаження

## ВИСНОВКИ

В роботі проведено аналіз та описано методики вимірювання основних показників електричної мережі: середнього квадратичного значення напруги та струму, споживаної повної, активної та реактивної потужності, кута зсуву фаз між струмом та напругою та частоти основної гармоніки напруги.

Розроблено цифровий вимірювальний прилад з використанням мікроконтролеру PIC18F2525, що дозволяє розраховувати в реальному часі основні показники електричної мережі.

Проведено демонстрацію роботи приладу в різних програмах для симуляції електронних схем при різного роду навантаженнях: резистивно-індуктивному, резистивно-ємнісному та чисто резистивному.

Розроблений пристрій дозволяє в реальному часі моніторити стан електромережі з діючим значенням напруги 220 В.

Використання багатофункціонального мікроконтролера дозволяє у майбутньому реалізувати інші корисні функції, такі як зв'язок з ПК, вимірювання споживаної електроенергії тощо.

Характеристику запропонованого пристрою можна покращити шляхом введення в схему вимірювання струму автоматичного регулювання коефіцієнту підсилення ОП, що підвищить точність вимірювання комплексу при малих значеннях струмів.

					<i>БР 3.6.141.440 ПЗ</i>	32
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. МАТЕРІАЛИ та програма МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ молодих вчених. – Суми: Сумський державний університет, 2022 – 92 с.
2. The Art of Electronics 3rd edition / Paul Horowitz, Winfield Hill. – 2015. – 1125 с.
3. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько.: навчальний посібник – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 206 с.
4. Основи метрології та засоби вимірювань / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько.: навчальний посібник – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 256 с.
5. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 35 с.
6. PIC18F2525/2620/4525/4620 / Microchip. Data Sheet – 2008. – 412 с.
7. The C programming language 2nd edition / Dennis Ritchie. – 1988. – 288 с.
8. MPLAB XC8 C Compiler User's Guide / Microchip. – 2016. – 606 с.
9. Василега П.О. Електропостачання: – Суми: СумДУ, 2019. – 521 с.
10. How to derive the RMS value of a sine wave with a DC offset. [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал] – Режим доступу <https://masteringelectronicsdesign.com/how-to-derive-the-rms-value-of-a-sine-wave-with-a-dc-offset/>
11. Как измерить отрицательное напряжение с помощью АЦП. [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал] – Режим доступу <https://hubstub.ru/circuit-design/92-kak-izmerit-otricatelnoe-napryazhenie-s-pomoschyu-acp.html>
12. Схемотехника с программой Multisim для любознательных / Гололобов В.Н. – СПб.: Наука и Техника, 2019. – 272 с.
13. Руководство пользователя программы ISIS Proteus VSM. / Гололобов В.Н. – Радиоежегодник, 2013. – 443 с.
14. LM239DG Data Sheet / JamecoElectronics. – 2006. – 11 с.

					БР 3.6.141.440 ПЗ	33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## ДОДАТОК А

### Повний програмний код

```
uint8_t flag = 0;
uint16_t vEdge, vEdge2, aEdge = 0;
uint16_t shiftW = 0;
uint16_t freqW = 0;

void __interrupt() ISR(void)
{
    if(PIE1bits.CCP1IE && PIR1bits.CCP1IF)
    {
        if (flag)
        {
            vEdge2 = ((CCPR1H << 8) | CCPR1L);
            freqW = vEdge2 - vEdge;
            flag = 0;
        }
        vEdge = ((CCPR1H << 8) | CCPR1L);
        flag = 1;
        PIR1bits.CCP1IF = 0;
    }
    if(PIE2bits.CCP2IE && PIR2bits.CCP2IF)
    {
        aEdge = ((CCPR2H << 8) | CCPR2L);
        shiftW = aEdge - vEdge;
        PIR2bits.CCP2IF = 0;
    }
}

void setup(void)
{
    OSCCON = 0b01111100;
    CMCON = 0x07;
    ADCON0 = 0b00000001;
    ADCON1 = 0b00001101;
    ADCON2 = 0b10101101;
    TRISA = 0b00000011;
    TRISB = 0b00000011;
    TRISC = 0b00000110;
    LATA = 0;
    LATB = 0;
    clockPin = 0;
}
```

```

dataPin = 0;
latchPin = 1;
EPin = 0;

PIE1bits.CCP1IE = 0;
PIE2bits.CCP2IE = 0;
PIR1bits.CCP1IF = 0;
PIR2bits.CCP2IF = 0;
CCP1CON = 0x05;
CCP2CON = 0x05;
T3CON = 0x00;
PIR1bits.TMR1IF = 0;
T1CON = 0x90;
TMR1H = 0;
TMR1L = 0;
T1CONbits.TMR1ON = 1;
PIE1bits.CCP1IE = 1;
PIE2bits.CCP2IE = 1;

INTCONbits.GIE_GIEH = 1;
INTCONbits.PEIE_GIEL = 1;
}

uint16_t ADC_read(uint8_t channel)
{
    ADCON0 &= 0xC3;
    ADCON0 |= (channel << 2);
    GO_nDONE = 1;
    while(GO_nDONE);
    return ((ADRESH << 8) | ADRESL);
}

float RMS(uint8_t channel)
{
    uint16_t i, t = 0;
    uint32_t V1, V2 = 0;
    float RMS_value = 0;

    for(i = 0; i < 2106; i++)
    {
        t = ADC_read(channel);
        V1 = V1 + (uint32_t)t * (uint32_t)t;
        V2 = V2 + (uint32_t)t;
    }
}

```

```

    }
    RMS_value = sqrt(V1/2106.0 - ((V2/2106.0)*(V2/2106.0)));
    RMS_value = 0.004883f * RMS_value;
    if (channel == 0U)
    {
        RMS_value = (RMS_value * ((float)137000 + (float)22600) /
((float)22600)) * ((float)230 / (float)12);
    }

    else
    {
        RMS_value = (RMS_value * ((float)100.0 * (float)6.0 / (float)30.0));
    }
    return RMS_value;
}

void main(void)
{
    setup();
    LCDInit();
    char buff[20];

    while(1)
    {
        float V = RMS(0);
        sprintf(buff, "U=%5.2fV\0", V);
        LCDPrintString(buff, 1, 1);

        float A = RMS(1);
        sprintf(buff, "I=%4.2fA\0", A);
        LCDPrintString(buff, 13, 1);

        float PF = 6.283 * (float)shiftW * 0.5 / (float)20000;

        float cosPHI = cos(PF);
        float sinPHI = sin(PF);
        sprintf(buff, "cos=%4.2f\0", cosPHI);
        LCDPrintString(buff, 1, 4);

        float freq = (float)1000/ ((float)freqW * 0.5 / (float)1000);

        sprintf(buff, "f=%3.1fHz\0", freq);
        LCDPrintString(buff, 13, 4);
    }
}

```

```

float P = V * A * cosPHI;
sprintf(buff, "P=%5.0fW\0", P);
LCDPrintString(buff, 1, 2);

float Q = V * A * sinPHI;
sprintf(buff, "Q=%5.0fVAr\0", Q);
LCDPrintString(buff, 11, 2);

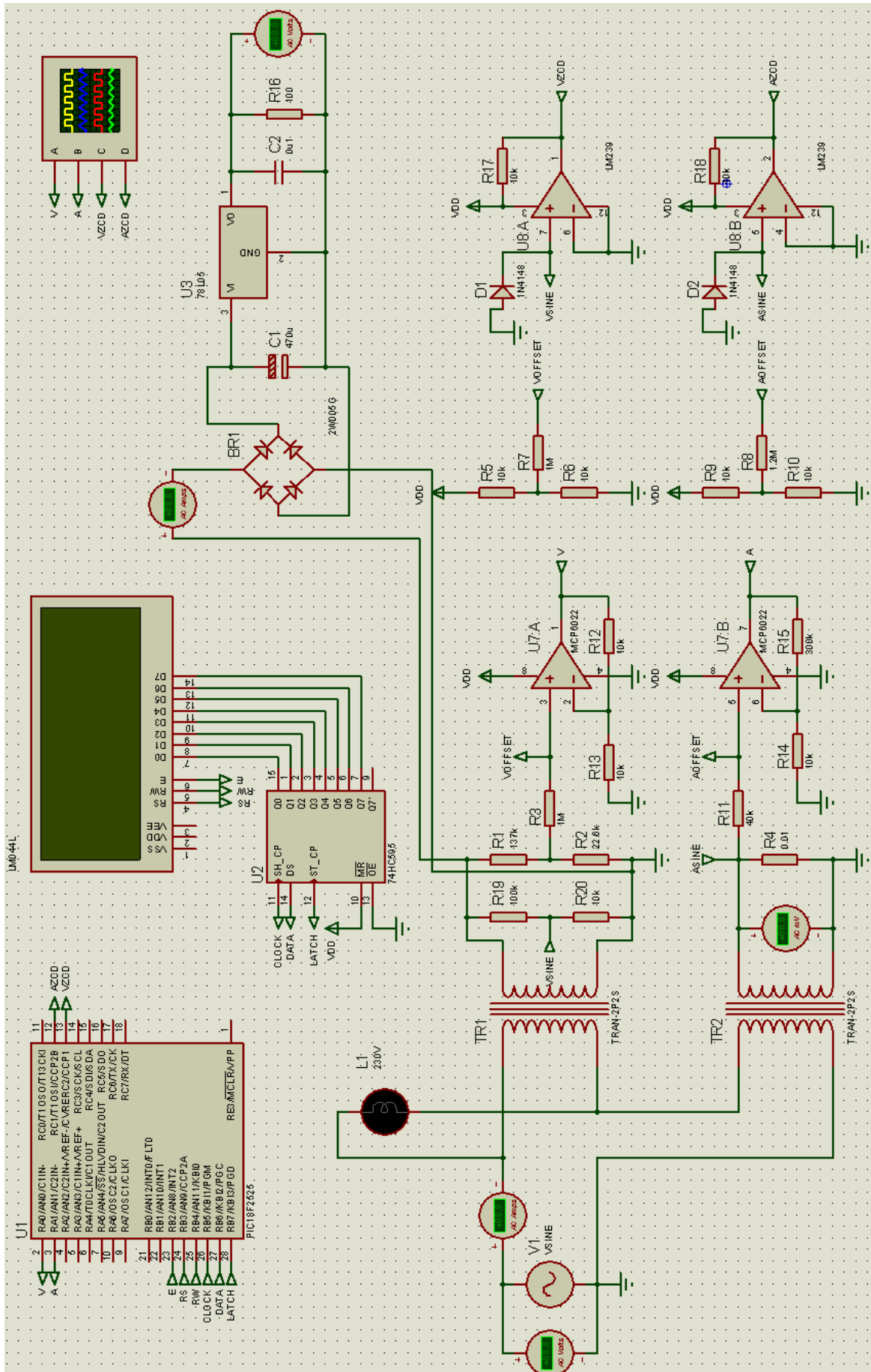
float S = V * A;
sprintf(buff, "S=%5.0fVA\0", S);
LCDPrintString(buff, 1, 3);
}
}

```

					<i>БР 3.6.141.440 ПЗ</i>	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		37

# ДОДАТОК Б

## Електрична принципова схема вимірювального пристрою



БР 3.6.141.440 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата