

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 В. М. Рябенський
д.т.н., професор

« 15 » грудня 2025 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

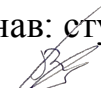
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка навантаження змінного струму з мікропроцесорним керуванням

Виконав: студент

6321М групи

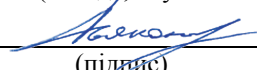
В. С. Пустомельник


(підпис)

Керівник роботи:

доцент каф. ПЕЕТ, к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

 О. С. Дьяконов

(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій
Спеціальність	171 «Електроніка»
Освітня програма	Електронні системи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми
 В. М. Рябенський
(підпис)

« 09 » жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Пустомельнику Валерію Станіславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка навантаження змінного струму з мікропроцесорним керуванням

керівник роботи Дьяконов Олексій Сергійович, доцент каф. ПЕЕТ, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 1217 від « 14 » жовтня 2025 року.

2. Термін подання роботи: 09 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані по роботі:

потужність електронного навантаження – до 2 кВА,

мікроконтролерна апаратно-програмна платформа – Arduino.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

Сфери застосування регульованих навантажень змінного струму та основні технічні вимоги до розроблюваного пристрою

Розробка апаратної частини керованого RLC-навантаження

Розробка програмної частини

Організація процесу виробництва та охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів Актуальність та мета роботи.

Завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження. Практична значимість дослідження.

Аналіз характеристик сучасних керованих навантажень змінного струму потужністю до 2 кВА. Вибір стратегії комутації RLC-компонентів. Схема детектору переходу через нуль мережевої напруги. Схема керування транзисторними ключами.

Розробка людино-машинного інтерфейсу керованого навантаження.

Розробка програмного коду. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Тубальцев А.М., доц. каф. екології та природоохоронних технологій		

7. Дата видачі завдання « 15 » жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Систематизація основних технічних характеристик прототипів керованих навантажень.	вересень 2025 р.	виконано
2.	Розробка технічних вимог до керованого навантаження змінного струму.	01.10.25 – 15.10.25	виконано
3.	Розробка апаратної частини. Схемотехнічна реалізація запропонованого рішення.	15.10.25 – 31.10.25	виконано
4.	Розробка людино-машинного інтерфейсу системи керування навантаженням.	01.11.25 – 15.11.25	виконано
5.	Розробка програмного коду.	15.11.25 – 30.11.25	виконано
6.	Охорона праці.	15.11.25 – 30.11.25	виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки	01.12.25 – 08.12.25	виконано

Студент

(підпис)

В. С. Пустомельник

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

О. С. Дьяконов

(прізвище та ініціали)

Анотація

Кваліфікаційна робота присвячена проектуванню керованого електронного RLC-навантаження змінного струму. На основі проведеного в роботі аналізу існуючих прототипів було запропоновано у якості силових вентилів використовувати схему з двома MOSFET-транзисторами, з'єднаними back-to-back. Це дає змогу здійснювати перемикання банків навантаження при переході кривої струму через нуль. Наведено схему детектору переходу через нуль та його моделювання у середовищі LTSpice. У якості апаратно-програмної платформи для реалізації системи керування була обрана плата Arduino Mega. Робота містить рекомендації по організації охорони праці під час виробництва розробленого керованого навантаження.

Ключові слова: RLC-навантаження, блок керування, детектор переходу через нуль.

Abstract

The qualification work is devoted to the design of a controlled electronic AC RLC load. Based on the analysis of existing prototypes carried out in this paper, it was proposed to use a circuit with two MOSFET transistors connected back-to-back as power valves. This makes it possible to switch load banks when the current curve passes through zero. A diagram of the zero transition detector and its simulation in the LTSpice environment are presented. The Arduino Mega board was chosen as the hardware and software platform for implementing the control system. The paper contains recommendations for organizing labor protection during the production of the developed controlled load.

Keywords: RLC Load, Control Unit, Zero transition detector.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів..	6
Вступ.....	7
Розділ 1. Сфери застосування регульованих навантажень змінного струму та основні технічні вимоги до розроблюваного пристрою.....	12
1.1. Сфери застосування регульованих RLC-навантажень змінного струму.....	12
1.2. Огляд сучасних RLC-навантажень змінного струму.....	14
1.3. Формування основних технічних вимог до регульованого блоку RLC-навантаження змінного струму	23
Розділ 2. Розробка апаратної частини керованого RLC-навантаження	26
2.1. Модель RLC-навантаження.....	26
2.2. Технічні вимоги до керованого RLC-навантаження	26
2.3. Визначення значень компонентів R, L, C	27
2.4. Стратегії комутації навантаження	27
2.5. Динамічні процеси при перемиканні навантаження	28
2.6. Врахування додаткових параметрів при моделюванні керованого RLC-навантаження	29
2.7. Комплексний підхід при розробці керованого RLC-навантаження.....	29
2.8. Комутація банків навантажень.....	30
2.9. Вибір елементної бази.....	35
2.10. Вибір контрольно-вимірювальних приладів.....	38
Розділ 3. Розробка програмної частини	44
3.1. Розробка людино-машинного інтерфейсу	44
3.2. Вибір мікроконтролерної платформи.....	44
3.3. Розробка програмного коду.....	47
Розділ 4. Організація процесу виробництва та охорона праці.....	57
4.1. Організація електромонтажних робіт.....	57
4.2. Охорона праці при пайці	58

Висновки	61
Список використаних джерел	62
Додаток А.....	65
Повний код програми	65

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

CC – Constant Current;
CR – Constant Resistance;
CV – Constant Voltage;
CP – Constant Power.
CF – Crest Factor;
PF – Power Factor;
THD – Total Harmonic Distortion;
OP – Over Power;
OC – Over Current;
OT – Over Temperature;
OV – Over Voltage.
UV – Under Voltage.

					171.6321М.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток електроніки, силових перетворювачів та систем автоматизації значною мірою залежить від можливості якісного тестування та моделювання різних режимів роботи електричних навантажень. Оскільки електротехнічні пристрої працюють у широкому спектрі умов, надзвичайно важливим є створення лабораторних і стендових засобів, здатних відтворювати реальні навантажувальні характеристики з високою точністю та передбачуваністю. У зв'язку з цим одним із ключових інструментів є кероване RLC-навантаження змінного струму, яке дозволяє реалізувати різноманітні комбінації активної, індуктивної та ємнісної складових. Саме такі навантаження необхідні для дослідження роботи джерел живлення, інверторів, стабілізаторів, автономних електроустановок малої потужності та інших пристроїв, що функціонують у змінному електричному полі.

На ринку представлено ряд комерційних електронних навантажень, проте більшість із них орієнтовані на високі потужності, мають складну структуру та значну вартість, що робить їх малодоступними для навчальних лабораторій, невеликих наукових центрів і приватних інженерних проєктів. Крім того, багато промислових рішень пропонують переважно активний режим навантаження, тоді як можливість формування керованих індуктивних та ємнісних компонент у широких межах залишається обмеженою. Тому розроблення компактного, доступного та функціонально гнучкого керованого RLC-навантаження потужністю до 2 кВА є актуальною задачею, яка поєднує потреби освітніх, інженерних та дослідницьких застосувань.

В умовах переходу до енергоефективних та інтелектуальних електротехнічних систем виникає потреба у точному моделюванні спотворень, фазових зсувів, реактивних складових і нелінійних ефектів навантаження. Таке моделювання необхідне під час тестування інверторів, безперебійних джерел живлення, перетворювачів частоти, генераторів малої потужності, пристроїв на базі сучасних схем комутації на MOSFET та IGBT.

					171.6321М.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Кероване RLC-навантаження дозволяє відтворювати різні режими – від чисто активного до переважно реактивного – а також моделювати пускові струми, резонансні явища та змінні профілі споживання.

Метою роботи є розробка керованого RLC-навантаження змінного струму малої потужності (до 2 кВА), яке забезпечуватиме можливість плавного або дискретного регулювання R-, L- та C-складових, матиме достатню точність параметрів, відповідатиме вимогам електробезпеки та охорони праці, а також буде технологічно придатним до виготовлення в умовах навчальної лабораторії або малого виробництва. Для досягнення цієї мети необхідно проаналізувати існуючі рішення, визначити оптимальні конструктивні та електричні схеми, обрати елементну базу, розробити функціональну структуру керування й виконати розрахунки основних параметрів. Окрему увагу приділено забезпеченню стабільності роботи навантаження в усьому діапазоні потужностей, мінімізації теплових втрат та підвищенню надійності.

Результатом роботи стане створення проєкту компактного та універсального RLC-навантаження, здатного ефективно використовуватися для дослідних, навчальних і тестових задач. Реалізація такого пристрою сприятиме розширенню можливостей стендових випробувань, підвищенню якості електротехнічних досліджень і розвитку сучасних методів моделювання електричних систем малої та середньої потужності.

Актуальність роботи – Стрімкий розвиток силової електроніки, систем автономного живлення, інверторних технологій та джерел безперебійного живлення потребує надійних методів перевірки їхніх характеристик у різноманітних режимах роботи. Для адекватного тестування таких пристроїв необхідні керовані навантаження, здатні відтворювати як активні, так і реактивні компоненти споживання.

Особливо актуальною є розробка RLC-навантаження саме для діапазону потужностей до 2 кВА, оскільки саме в цьому класі працює

					171.6321М.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

переважна більшість побутових, промислових і навчальних стендів. Здатність точно моделювати фазовий зсув, реактивну потужність, пускові струми та різні профілі споживання стає критично важливою для оцінювання енергоефективності, стійкості та сумісності обладнання з сучасними електромережами. Тому створення керованого RLC-навантаження малої потужності має високу прикладну значущість і відповідає актуальним тенденціям у сфері силової електроніки та тестування електротехнічних пристроїв.

Об'єкт дослідження - електронні та електротехнічні системи навантаження змінного струму малої потужності, що використовуються для тестування джерел живлення, перетворювачів та інших пристроїв силової електроніки.

Предмет дослідження – процеси формування та керування параметрами RLC-навантаження змінного струму потужністю до 2 кВА, а також технічні рішення, схемотехніка, методи керування та вибір елементної бази для реалізації регульованого активного, індуктивного та ємнісного навантаження.

Практична значимість дослідження полягає в можливості створення доступного, технологічно простого та гнучкого пристрою, здатного замінити дорогі промислові електронні навантаження для діапазону до 2 кВА. Розроблене кероване RLC-навантаження може застосовуватися:

- у навчальних лабораторіях для демонстрації процесів у колах змінного струму, дослідження фазових зсувів, резонансних явищ і властивостей активних та реактивних навантажень;
- у дослідницьких центрах для експериментальної перевірки алгоритмів керування інверторами, перетворювачами частоти, UPS та іншими силовими електронними пристроями;
- на виробництві як стендове обладнання для тестування малопотужних перетворювачів, генераторів, стабілізаторів і джерел живлення;

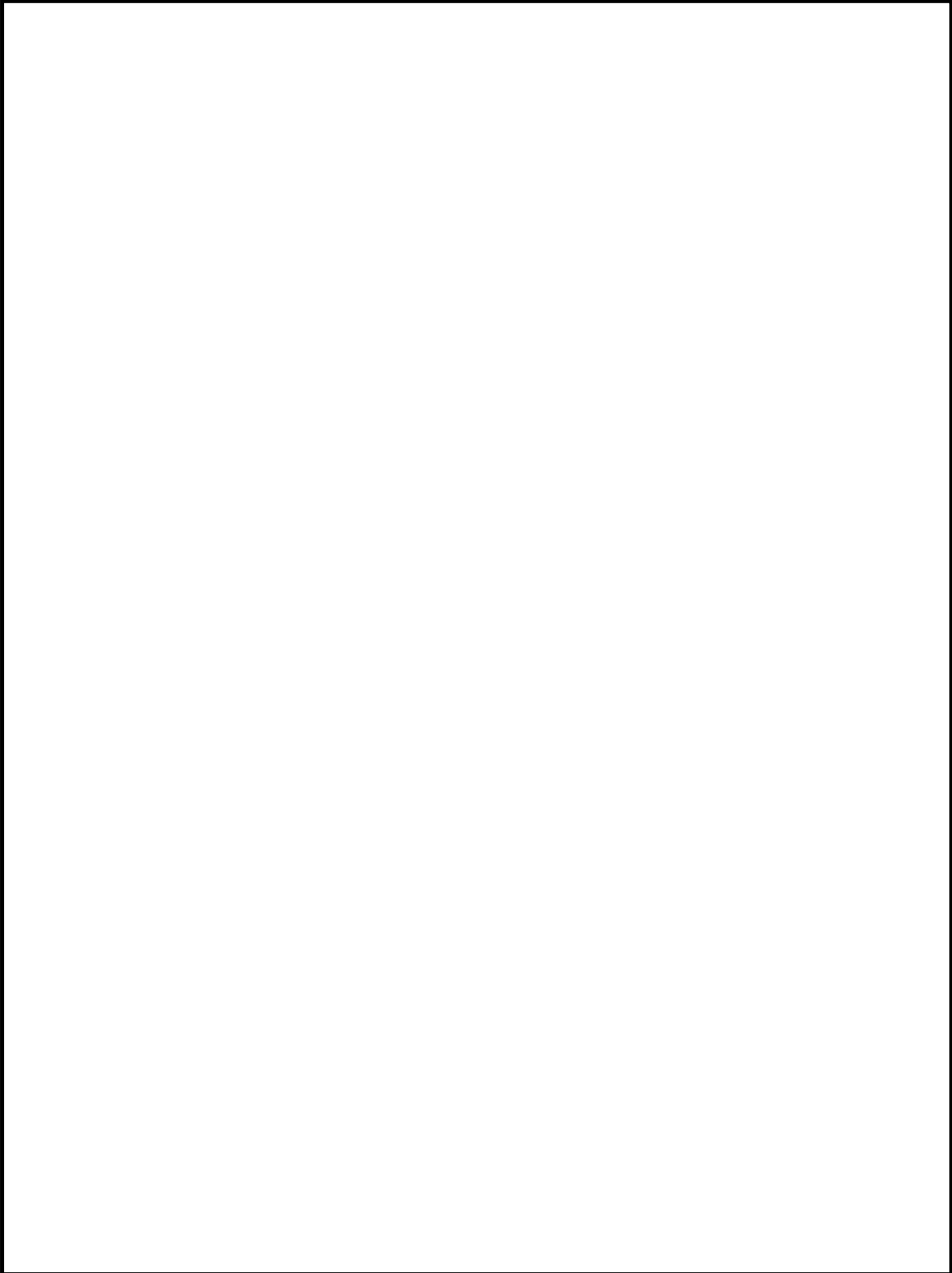
					171.6321М.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

– у приватних інженерних розробках, де важливі компактність, доступність та гнучкість конфігурації навантаження.

Практичний результат роботи — пристрій, здатний точно та стабільно формувати потрібні параметри RLC-компонентів, забезпечувати безпечну експлуатацію та бути адаптованим під конкретні дослідницькі або навчальні задачі. Це відкриває можливість значно розширити спектр лабораторних та випробувальних робіт без потреби у дорогому комерційному обладнанні.

Результати роботи доповідалися на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Автоматика та електротехніка» 04–05 грудня 2025 року. Тема доповіді: «Розробка навантаження змінного струму з мікропроцесорним керуванням».

					171.6321М.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.Р1			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Пустомельник В. С.			Сфери застосування регульованих навантажень змінного струму та основні технічні вимоги до розроблюваного пристрою	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							11	14
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Дьяконов О. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 1. СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗМІННОГО СТРУМУ ТА ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОВОГО ПРИСТРОЮ

1.1. Сфери застосування регульованих RLC-навантажень змінного струму

Регульовані RLC-навантаження змінного струму (резистивно-індуктивно-ємнісні) широко застосовуються у випробуваннях, налаштуванні та моделюванні електричних систем. Нижче наведено типові приклади їх використання у різних галузях:

– *Випробування джерел живлення та інверторів.* Мета: імітація реального навантаження споживачів (активного, індуктивного, ємнісного). Приклад: перевірка стабільності вихідної напруги інвертора при різних коефіцієнтах потужності ($PF = 0.8$ індуктивний або ємнісний). Використовуване обладнання: програмовані електронні навантаження типу Chroma 63800, IT8600, NH Research 9430 тощо.

– *Випробування джерел безперебійного живлення (UPS).* Мета: моделювання споживачів з різним характером навантаження для оцінки роботи UPS при змінному PF і гармонічних спотвореннях. Приклад: оцінка динамічної реакції UPS при переході з ємнісного на індуктивне навантаження.

– *Тестування генераторів та систем автоматичного регулювання напруги (AVR).* Метою цього тестування є визначення стійкості та якості регулювання напруги під час зміни реактивної складової струму. Приклад: підключення регульованого RLC-навантаження до синхронного генератора для побудови характеристики зовнішнього навантаження $U=f(I)$.

– *Лабораторні стенди та навчальні установки.* Використовуються з метою демонстрації фазових зсувів, резонансу, коефіцієнта потужності. Приклад: лабораторна робота з вивчення послідовного або паралельного

					171.6321M.KP.ПЗ.P1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

резонансу в колі змінного струму. Обладнання: регульовані стенди типу De Lorenzo DL 1015, Lucas-Nülle RLC Trainer тощо.

– *Калібрування та перевірка вимірювального обладнання.* Навантаження використовується для створення контрольованого навантаження з точно заданим фазовим зсувом для перевірки ватметрів, аналізаторів мережі, електролічильників. Приклад: перевірка точності вимірювання коефіцієнта потужності електролічильником у діапазоні $PF = 0.5 \dots 1.0$.

– *Дослідження систем електроприводу.* Використовується з метою імітації навантаження на виході частотного перетворювача або контролера двигуна. Приклад: використання регульованого RLC-навантаження для тестування стабільності ШІМ-інвертора при різних режимах навантаження двигуна.

– *Випробування побутової та промислової апаратури.* Проводиться для перевірки відповідності стандартам електромагнітної сумісності та енергоспоживання (IEC 61000, EN 50564). Приклад: тестування LED-драйверів, зарядних пристроїв, трансформаторів під змінним реактивним навантаженням.

Параметри RLC-навантаження для різних сфер застосування наведені в табл. 1.1.

Слід зазначити, що регулювання навантаження здійснюється механічно (перемикачами), електронно (через тиристори, MOSFET, IGBT) або автоматично (через контролер). Залежно від задачі, навантаження може бути активним (R), індуктивним (L), ємнісним (C) або комбінованим (RLC). У сучасних лабораторіях використовуються програмовані електронні навантаження (наприклад, Chroma 63800, ITECH IT8600, NH Research 9430), які дозволяють задавати R, L, C та фазовий зсув з високою точністю.

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Параметри RLC-навантаження для різних сфер застосування

№	Галузь застосування	Мета використання	Тип навантаження	Орієнтовні діапазони параметрів	Типова напруга / частота
1	Випробування інверторів, UPS, блоків живлення	Імітація споживача з регульованим коефіцієнтом потужності (PF)	R, RL, RC, RLC	$R = 1 \dots 500 \Omega$; $L = 1 \text{ мГн} \dots 1 \text{ Гн}$; $C = 1 \mu\text{Ф} \dots 200 \mu\text{Ф}$	230 V / 50 Hz або 400 V / 50 Hz
2	Тестування генераторів та AVR	Оцінка стабільності напруги при зміні реактивної складової	RLC (регульований)	$R = 10 \dots 1000 \Omega$; $L = 10 \text{ мГн} \dots 10 \text{ Гн}$; $C = 2 \dots 100 \mu\text{Ф}$	230–480 V / 50–60 Hz
3	Лабораторні стенди навчального призначення	Вивчення резонансу, фазових зсувів, PF	R, L, C окремо або комбіновано	$R = 100 \Omega \dots 10 \text{ к}\Omega$; $L = 50 \text{ мГн} \dots 2 \text{ Гн}$; $C = 0.1 \dots 100 \mu\text{Ф}$	0–250 V / 50 Hz
4	Калібрування вимірювальних приладів (ватметри, аналізатори мереж)	Створення контрольованих фазових кутів між I та U	RLC (регульований фазовий зсув)	$R = 50 \dots 500 \Omega$; $L = 5 \text{ мГн} \dots 1 \text{ Гн}$; $C = 1 \dots 50 \mu\text{Ф}$	230 V / 50 Hz
5	Дослідження електроприводів і частотних перетворювачів	Імітація навантаження електродвигуна	RL (переважно індуктивне)	$R = 1 \dots 100 \Omega$; $L = 5 \text{ мГн} \dots 100 \text{ мГн}$	230–400 V / 50–400 Hz
6	Перевірка побутових і промислових пристроїв	Аналіз енергоспоживання та EMC при різному PF	RC або RLC	$R = 100 \dots 1000 \Omega$; $C = 1 \dots 100 \mu\text{Ф}$	230 V / 50 Hz

1.2. Огляд сучасних RLC-навантажень змінного струму

1.2.1 Банки RLC-навантаження загального призначення

Серед постачальників можна виділити:

– виробник Rata Load Banks. Банки RLC-навантаження мають регульований коефіцієнт потужності 0-1 з випередженням/відставанням. Є моделі на дуже великі номінали (cnloadbank.com).

– виробник LBI Resistive-Reactive Load Banks. Виробляє моделі RLC-навантажень від 20 кВА до 5000 кВА (prototypownia.com.pl).

– виробник Vilva. У модельному ряду є однофазні RLC-банки невеликої потужності (модель AC115 V-2 kW-RLC).

Розглянемо основний функціонал та характеристики моделі AC115 V-2 kW-RLC. Зовнішній вигляд регульованого однофазного RLC-навантаження наведено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд регульованого однофазного RLC-навантаження AC115 V-2 kW-RLC

Блок навантаження змінного струму VILVA-AC115V-2KW-RLC в основному використовується для тестування малих електростанцій, джерел змінного струму, приміщень обробки та зберігання даних, інверторів тощо. Аналогове резистивне навантаження може імітувати роботу різних навантажень джерела змінного струму електростанції.

Резистивне навантаження використовує новий компонент споживання енергії, а саме, – резистори, які термоусаджені та герметизовані і встановлені у трубках із нержавіючої сталі. Зовнішня частина сталеві трубки ізолювана радіатором, що забезпечує добру стійкість до вологи та корозії, гарну

					171.6321M.KP.ПЗ.P1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

тепловіддачу, високу ізоляцію, безпечність та надійність. Висока щільність потужності резистивного елемента, відсутність явища червоного нагрівання та незалежний вентилятор охолодження забезпечують тепловіддачу та збільшують термін служби всієї системи.

Цей продукт має високий рівень безпеки, низькі витрати на обслуговування, низький рівень шуму та високу стійкість до перевантаження.

Блок оснащений осьовим вентилятором, який забезпечує гарне тепловідведення та характеризується низьким рівнем шуму.

Основні технічні характеристики блоку навантаження наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики однофазного RLC-навантаження AC115 V-2 kW-RLC

Параметр	Значення
Номинальна напруга	115 В/50 Гц
Номинальна потужність	2 кВА
Регулювання навантаження	Точність регулювання реактивного опору та активного опору становить 1%
Реактор	Реактор має порожнисту структуру, оснащену шунтом опору, який можна встановлювати та виймати вручну
Підвищення температури реактора	За номінальних умов підвищення температури реактора не перевищує 65 К
Точність вимірювання	Точність відображення 0,5
Робоче джерело	АС 220В 5%
Електричне підключення	L+N+PE, лінія навантаження
Спосіб роботи	Безперервне тестування
Рівень захисту	IP20
Метод керування	Локальне ручне керування ножовим вимикачем
Витримувана напруга ізоляції	Вхід навантаження до шасі – витримувана напруга АС 3000 В 1 хв без пробою та перекриття
Температура навколишнього середовища	+10°C ...+50°C
Рівень шуму	<75 дБ на рівні 1 метра

Зазначимо, що розглянутий блок навантаження має фактично лише покрокове ручне перемикання.

1.2.2 Програмоване електронне навантаження змінного/змінно-постійного струму Chroma серії 63800

Зовнішній вигляд програмованого електронного навантаження Chroma 63802 представлений на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Модель 63802 (1.8 кВт / 18 А / 350 В)

Коротко перерахуємо основні технічні характеристики даного навантаження:

- потужність навантаження: 1800 Вт;
- діапазон напруги: від 50 В до 350 В середньоквадратичного значення;
- діапазон струму: до 18 А середньоквадратичного значення;
- роздільна здатність навантаження: 2 мА;
- піковий струм: до 54 А.
- функція паралельного підключення для потужних навантажень та 3-фазних застосувань;
- діапазон частот: від 45 до 440 Гц, режим постійного струму;
- діапазон коефіцієнта амплітуди: від 1,414 до 5,0.
- $\cos\phi$: від 0 до 1, випереджаючий або запізнюючий (режим випрямляча);
- режими CC, CR, CV, CP для навантаження постійного струму;
- режими постійного та випрямного навантаження для навантажень змінного струму;
- аналоговий монітор напруги та струму;

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- вимірювання часу при тестуванні акумуляторів, тестуванні ДБЖ, запобіжників та автоматичних вимикачів;
- вимірювання: V , I , PF , CF , P , Q , S , F , R , I_p +/- та THD_v ;
- моделювання короткого замикання;
- механізми безпеки: OP , OC , захист OT та сигналізація OV ;
- інтерфейси: $GPIB$ та $RS-2324$;
- розміри: висота 177 мм, ширина 440 мм, глибина 595 мм;
- вага 37 кг.

Електронне навантаження Chroma 63802 схемотехнічно реалізує типову схему випрямляча (рис. 1.3), що дає можливість моделювання нелінійних випрямлених навантажень для широкого спектру застосувань під час випробувань.

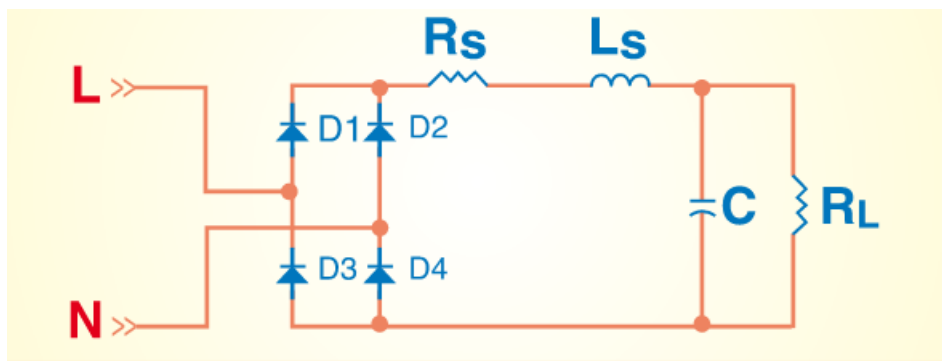


Рисунок 1.3 – Типова схема випрямляча

Для моделювання випрямленого навантаження доступні три режими навантаження: RLC , CP та пусковий струм.

Електронне навантаження Chroma 63802 має режим автоматичного регулювання смуги пропускання. Розглянемо цю функцію більш детально. У режимі активного навантаження (CC , CP) звичайні навантаження змінного струму працюють із фіксованою смугою пропускання. Коли навантаження працює з вузькою смугою керування, воно обмежує навантаження, імітуючи його з високим пік-фактором. І навпаки, розширена смуга впливає на стабільність контуру керування, особливо при високому вихідному імпедансі пристрою, що тестується.

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		18

Для вирішення цієї проблеми із звичайними навантаженнями змінного струму навантаження змінного та постійного струму Chroma 63800 динамічно регулює робочу смугу пропускання, визначаючи імпеданс пристроїв, що тестуються, з метою зниження ризику нестабільності системи.

На рис. 1.4 наведені осцилограми струмів і напруг навантаження при моделюванні джерела безперебійного живлення (ДБЖ).

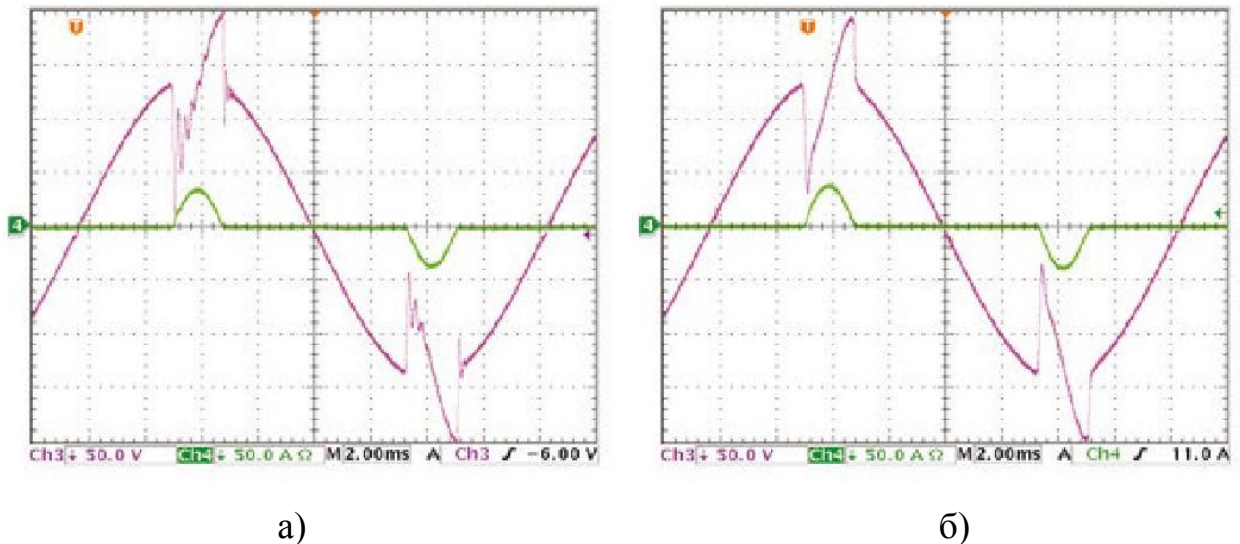


Рисунок 1.4 – Моделювання навантаження ДБЖ: а) – при фіксованій смузі пропускання, б) – при увімкненій функції автоматичного регулювання смуги пропускання

Як бачимо з рис. 1.4 увімкнення функції автоматичного регулювання смуги пропускання дозволяє позбавитись високочастотних коливань при перехідних процесах у моментах комутації силових вентилів.

Функція автоматичної корекції коефіцієнту потужності. Як бачимо з виразу:

$$PF = \frac{P_{active}}{U_{RMS} I_{RMS}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}} \quad (1.1)$$

коефіцієнт потужності PF є функцією напруги і струму від аргументу – часу. Традиційні концепції навантаження змінного струму припускають, що форма сигналу напруги постійно синусоїдальна, як показано на рис. 1.5, а. Це

нереально, тому що форма сигналу напруги може бути спотворена після прикладання навантаження, як показано на рис. 1.5, б).

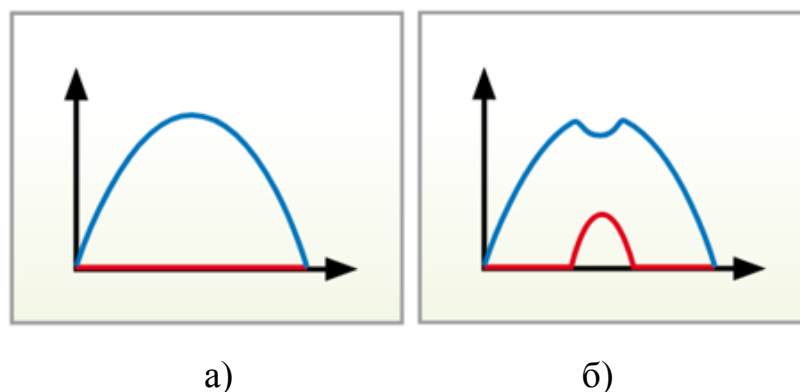


Рисунок 1.5 – Зміна форми кривої напруги після прикладання навантаження (б), форма кривої напруги до прикладання навантаження (а)

Якщо керування коефіцієнтом потужності виходить із припущення, що форма сигналу напруги є синусоїдальною, це призведе до більш низького коефіцієнта потужності, ніж запрограмовано користувачем, що в свою чергу стане причиною перевантаження випробуваного зразка. Навантаження Chroma 63800 змінного струму постійно контролює коефіцієнт потужності та використовує ці дані для динамічного регулювання форми кривої навантаження. Це робить налаштування коефіцієнта потужності точним і не створює надмірного навантаження на випробуваний зразок.

1.2.3 Електронне навантаження змінного струму ITECH AC IT8615L(G)

Зовнішній вигляд блоку навантаження наведено на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд навантаження IT8615L(G)

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		20

Перерахуємо основні технічні параметри даного електронного навантаження:

- діапазон частот: 45 Гц~450 Гц;
- діапазон потужності: 0~14,4 кВА;
- діапазон напруги: 50~420 В середньоквадратичне значення, 15~260 В середньоквадратичне значення;
- діапазон струму: 0~160 ампер;
- паралельне підключення/трифазне керування, потужність може бути розширена до 43,2 кВА;
- 7-дюймовий РК-екран;
- функція осцилографа з підтримкою відображення форми сигналу напруги та струму;
- високошвидкісна дискретизація аналого-цифрового перетворювача, захоплення форми сигналу в реальному часі;
- вимірювання V_{rms} , V_{pk} , V_{dc} , I_{rms} , I_{pk} , I_{dc} , W , VA , VAR , CF (crest factor), PF та $FREQ$;
- вимірювання THD_v до 50-ї гармоніки;
- електронне навантаження змінного струму: режими $CC/CR/CP$;
- електронне навантаження постійного струму: режими $CC/CR/CP/CV$;
- зовнішній аналоговий керуючий вхід 0~10 В, напруга та струм;
- функція захисту OT , OC , OV , UV та OP ;
- інтерфейси зв'язку LAN та USB, а також інтерфейс зовнішнього USB-флеш-диска.

Основні застосування (тестування):

- ДБЖ;
- інверторів
- перетворювачів частоти
- генераторів;
- джерел змінного струму;
- електронних компонентів.

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Функція вимірювання та аналізу гармонік. IT8600 забезпечує потужну функцію вимірювання даних, яка може не тільки проводити вимірювання звичайних параметрів, таких як V_{rms} , V_{pk} , V_{dc} , I_{rms} , I_{pk} , I_{dc} , W , VA , VAR , CF , PF та $Freq$, але й забезпечує унікальну функцію аналізу гармонік напруги для перевірки гармонічних перешкод об'єкта (ДБЖ, генераторів тощо), що вимірюється, в мережі. Функція вимірювання гармонік підтримує аналіз до 50-ї гармоніки напруги та може відображати відсоток результатів аналізу кожної гармоніки в різних формах (рис. 1.7).



а)

б)

Рисунок 1.7 – Результати гармонійного аналізу кривої напруги: у вигляді стовпчикової діаграми (а), у вигляді текстової таблиці (б)

Функція осцилографа. Найбільш унікальною особливістю IT8600 є функція осцилографа, яка може відображати форму вхідної напруги та струму вимірюваного пристрою. За допомогою клавіші функції знімка екрана можна зберегти поточне зображення екрана на периферійний диск через передній USB-інтерфейс, що спрощує повторний аналіз (рис. 1.8).

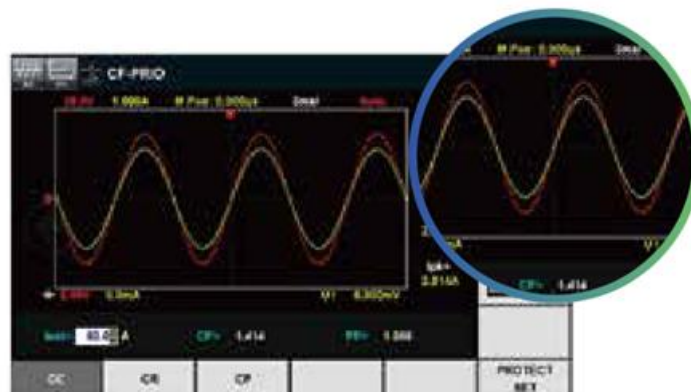


Рисунок 1.8 – Активована функція осцилографу

Регульоване значення CF/PF . IT8600 має режими роботи CC, CR та CP. У режимах роботи CC та CP для програмування доступні PF або CF, або обидва параметри. Діапазон коефіцієнта потужності становить PF $-1... \sim 1$ з випередженням або затримкою, діапазон налаштувань коефіцієнту амплітуди CF становить $1,414 \sim 5$, окрім CF та PF, IT8600 також має різні режими налаштувань для вибору для реалізації моделювання фактичного струму. Приклад кривих струму для різних параметрів CF та PF наведено на рис. 1.9.

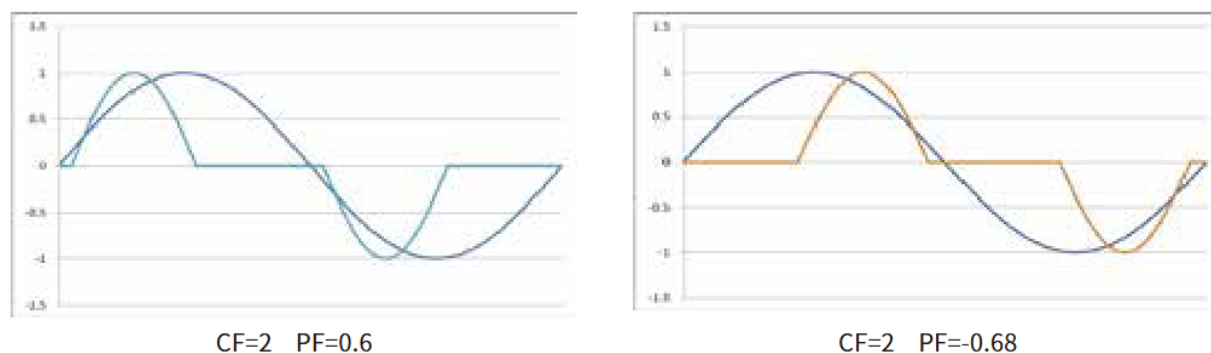


Рисунок 1.9 – Приклад кривих струму для різних параметрів CF та PF

1.3. Формування основних технічних вимог до регульованого блоку RLC-навантаження змінного струму

Сформуємо основні вимоги до розробки:

1. Розрахункова потужність навантаження – 2 кВА, однофазне, номінальна напруга – 220 В.
2. Навантаження повинно мати ступінчате регулювання банків R, L, C.
3. Призначення – для тестування лабораторного обладнання, а саме, - сонячних інверторів фірми Solis та Victron.
4. Діапазон зміни коефіцієнту потужності – від -0.6 до 0.6.
5. Навантаження повинно мати вимірювальні прилади для відображення поточної напруги, споживаного струму, активної потужності, PF. Також необхідно передбачити індикацію $\cos\phi$ (випередження / відставання).
6. Навантаження повинно мати мікропроцесорну систему керування для можливості завдання різних перехідних режимів.

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		23

Висновки до розділу

У даному розділі було проаналізовано сфери застосування регульованих RLC-навантажень. Зазначено, що дані навантаження можуть бути використані при випробуванні:

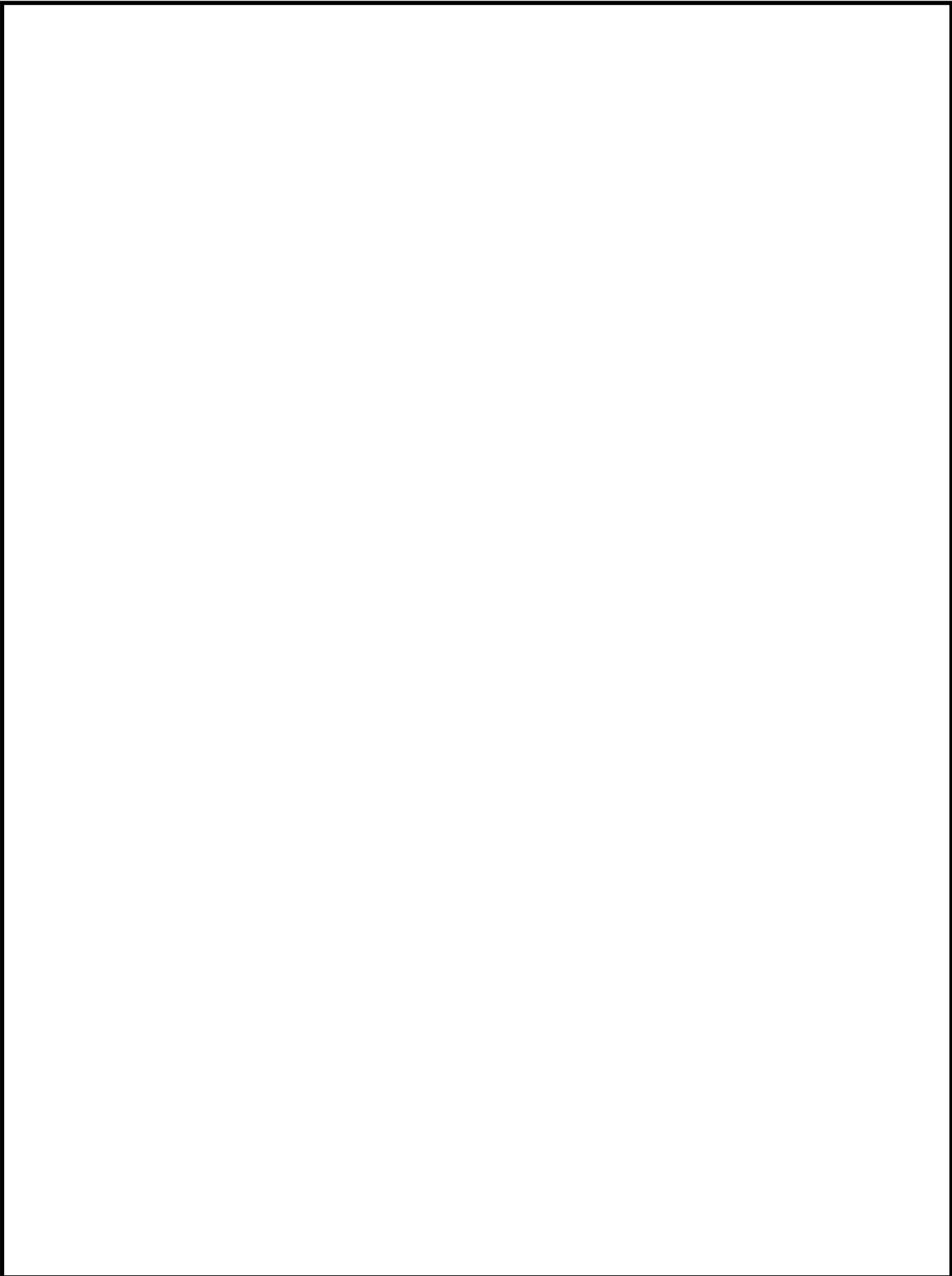
- джерел живлення та інверторів;
- джерел безперебійного живлення (UPS);
- генераторів та систем автоматичного регулювання напруги (AVR);
- побутової та промислової апаратури.

Крім того регульовані навантаження змінного струму можуть бути у складі:

- лабораторних стендів та навчальних установок;
- стендів для калібрування та перевірки вимірювального обладнання;
- лабораторних стендів для дослідження систем електроприводу.

У розділі також сформульовано основні технічні вимоги до розроблюваного RLC-навантаження.

					171.6321М.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Пустомельник В. С.			Розробка апаратної частини керованого RLC-навантаження	Літ.	Арк.	Аркушіів
Консультант							25	18
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Дьяконов О. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ КЕРОВАНОГО RLC-НАВАНТАЖЕННЯ

2.1. Модель RLC-навантаження

RLC-навантаження – це електричне коло змінного струму, що поєднує опір (R), індуктивність (L) та ємність (C). Таке навантаження можна представити двома способами:

– послідовно з'єднані елементи R – L – C . Для синусоїдальної напруги середньоквадратичного значення U , повний комплексний опір даної схеми визначається наступним чином:

$$Z = R + j(\omega L - 1/\omega C),$$

отже, струм $I = U/Z$, а видима потужність $S = UI^*$, з активною потужністю P та реактивною потужністю Q ;

– паралельно з'єднані елементи R – L – C . Для цієї схеми маємо комплексну провідність:

$$Y = 1/R + j(\omega C - 1/(\omega L)).$$

2.2. Технічні вимоги до керованого RLC-навантаження

На практиці, для банку навантаження або тестового навантаження до ~ 2 кВА, «керований» означає, що кінцевий користувач зможе незалежно змінювати:

- резистивну частину – ефективний опір R – для зміни активної споживаної потужності P ;
- індуктивну частину L для зміни реактивної потужності Q_L ;
- ємнісну частину C для регулювання реактивної потужності Q_C .

Можлива реалізація перемикання режимів: постійний імпеданс, постійний струм, постійна потужність або режим RLC (тобто задані P та Q). Наприклад, у деяких комерційних блоках навантаження змінного струму режим RLC дозволяє вказувати активну потужність та коефіцієнт потужності

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

/ реактивну потужність, а контролер відповідно встановлює необхідні значення R , L та C .

Керування також може означати перемикання елементів (для ступінчастих навантажень) або використання силової електроніки (IGBT/Н-мосту) для динамічної емуляції імпедансу.

2.3. Визначення значень компонентів R , L , C

З бажаних значень активної потужності P та реактивної потужності Q при відомій номінальній напрузі можна отримати еквівалентні значення R , L , C .

Для послідовного RLC -навантаження при U_n маємо:

$$P = U_n^2 / R \rightarrow, \text{отже } R = U_n^2 / P.$$

Для реактивної потужності: $Q_L = U_n^2 / \omega L$ для індуктивної, або $Q_C = U_n^2 \omega C$ для ємнісної. Якщо потрібна чиста реактивна потужність Q (додатна для індуктивної, від'ємна для ємнісної), вибирається L або C відповідно (або їх комбінація).

Тоді величина імпедансу дорівнює $\sqrt{R^2 + X^2}$, де $X = \omega L - 1/(\omega C)$.

2.4. Стратегії комутації навантаження

Розглянемо можливі стратегії зміни параметрів RLC -навантаження:

– ступінчасте регулювання R (наприклад, вмикання/вимикання резисторів) або змінний резистор (можливо, електронним способом через MOSFET або IGBT) для зміни активної потужності P .

– комутувана змінна індуктивність та конденсаторні батареї для зміни реактивної частини, переходу від відстаючого до випереджаючого коефіцієнта потужності.

Для реалізації ступінчатого регулювання навантаження можна використовувати контролер (мікроконтролер або ПК), який на основі заданої активної потужності P та коефіцієнту потужності (або реактивної потужності

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Q) обчислює та перемикає відповідну комбінацію $R + L + C$ для наближення до цільового значення.

Якщо використовувати електронне навантаження, тоді можна емулювати імпеданс за допомогою керованого джерела напруги, а не виключно пасивних компонентів – це підвищує швидкість та динамічну характеристику навантаження.

2.5. Динамічні процеси при перемиканні навантаження

При швидкій зміні навантаження (ступінчасті зміни), слід враховувати такі динамічні явища:

- струми індуктивності та напруги на конденсаторах можуть викликати коливання (LC-резонанс), якщо не забезпечити їхнє ефективне згасання;
- вмикання/вимикання великих індуктивностей/конденсаторів може спричинити перехідні процеси або стрибки напруги (особливо коли конденсатори заряджені);
- «керований» режим навантаження може призвести до появи неідеальних форм кривих струму та напруги, гармонік та спотворених форм замість чистих синусоїдальних навантажень. Іноді такий режим роботи є опцією виробника, коли навпаки треба відтворити реальні нелінійні навантаження. У такому випадку навантаження може імітуватися випрямлячем з LC-фільтром;
- окрім резистивного нагріву активного опору та індуктивного нагріву осердя при динамічних режимах роботи може спостерігатися нагрів конденсатора струмом пульсацій;
- динамічні режими роботи навантаження можуть призводити до перевантаження по струму, тому в системі необхідно реалізувати відповідний захист від перевантаження по струму та короткому замиканню.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

2.6. Врахування додаткових параметрів при моделюванні керованого RLC-навантаження

Математичні моделі, зазначені у п. 2.1, не враховують додаткових параметрів, а саме:

- реальні навантаження часто неідеальні: наприклад, вхід випрямляча + конденсатор, двигуни, несинусоїдальні струми. Чисте RLC-навантаження може не враховувати гармоніки, динамічні перемикання, насичення тощо;
- якщо швидко перемикати великі реактивні батареї, можна збудити коливання; для реалізму моделі можуть знадобитися паразитні характеристики (врахування активного опору індуктивності, опору ESR конденсатору тощо);
- ефект від взаємодії джерела та навантаження, тобто зміна навантаження може спричинити реакцію джерела (падіння напруги, зсув частоти, введення гармонік), тому може знадобитися моделювати динаміку цих джерел, щоб отримати повну картину перехідних процесів у даній системі;
- теплові та безпекові обмеження: особливо для реального обладнання. Моделювання повинно враховувати охолодження, робочі цикли, умови навколишнього середовища - хоча для моделювання суто електричних процесів це можна опустити.

2.7. Комплексний підхід при розробці керованого RLC-навантаження

Сформулюємо алгоритм проєктування керованого навантаження:

- визначення робочого діапазону: максимальної повної потужності, напруги, частоти, діапазону коефіцієнта потужності;
- використання моделювання для перевірки розмірів компонентів, динамічної поведінки (наприклад, перемикання з $PF=0,6$ індуктивного навантаження на $PF=0,95$ ємнісного навантаження);

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- включення до реального обладнання захисту: від перевантаження по струму, перегріву, аварійної зупинки, забезпечення безпечного перемикавання реактивних елементів (особливо конденсаторів);
- якщо під час моделювання спостерігається нестабільність або дзвін під час перемикавання реактивних елементів, необхідно включити демпфування (послідовний резистор або снаббер) у модель;
- якщо метою розробки є імітація певної поведінки «нелінійного навантаження» (наприклад, випрямляч + конденсатор), можна реалізувати «режим RLC-CP» або імітацію спотворення форми сигналу.
- розробка логіки керування навантаженням: що відбувається, коли користувач змінює задані значення навантаження, як швидко буде змінюватися навантаження, розміри кроків, логіка захисту/відключення.

2.8. Комутація банків навантажень

Припустимо, що нам необхідно комутувати банк резистивного навантаження в діапазоні провідності $0 - 9G$. Найпростіша схемотехнічна реалізація – це використання дев'яти резисторів номіналом $1G$. При цьому кожен резистор комутується окремим силовим ключем. Серед переваг такого підходу – це ступінчата зміна провідності без проміжного стану комутації, тобто в момент зміни G стан змінює тільки один силовий вентиль. Недоліком цього підходу є перевитрата резистивних компонентів та силових вентилів.

Розглянемо іншу схему комутації з меншою кількістю резистивних компонентів (рис. 3.1).

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

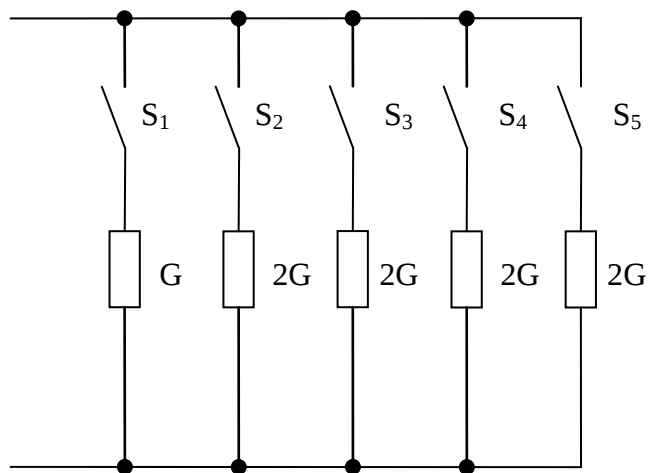


Рисунок 2.1 – Схема комутації резистивних елементів

Як бачимо з таблиці комутації (табл. 2.1) при збільшенні номера комбінації з 0 до 9 безпечними (змінюється стан тільки одного вентиля) є переходи $0 \rightarrow 1$, $2 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 5$, $8 \rightarrow 9$.

Таким чином, якщо для цієї схеми використовувати звичайні реле, то при перемиканні між сусідніми комбінаціями будемо мати паразитні комутації, наприклад, перехід $1 \rightarrow 2$ може відбутися за сценарієм $G \rightarrow 0 \rightarrow 2G$ чи $G \rightarrow 3G \rightarrow 2G$. Для плавного збільшення / зменшення навантаження це не припустимо.

Таблиця 2.1 – Таблиця комутації силових вентилів

Номер комбінації	Стан вентиля					Сумарна провідність
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
0						0
1	x					G
2		x				2G
3	x	x				3G
4		x	x			4G
5	x	x	x			5G
6		x	x	x		6G
7	x	x	x	x		7G
8		x	x	x	x	8G
9	x	x	x	x	x	9G

Вирішити цю проблему може синхронна комутація вентилів при переході кривої струму навантаження через нуль. В такому випадку у якості

силових вентилів використовуються транзистори MOSFET, включені по схемі back-to-back.

Нагадаємо, що конфігурація MOSFET back-to-back використовує два MOSFET-транзистори, з'єднані послідовно, з витоками, спрямованими один до одного, для створення двонаправленого перемикача, який блокує зворотний струм. Ця схема долає обмеження одного MOSFET-транзистора, який має власний діод, що проводить струм в одному напрямку, шляхом використання двох MOSFET-транзисторів, з'єднаних послідовно. Один MOSFET керує струмом в одному напрямку, блокуючи зворотний струм, а інший MOSFET керує струмом у протилежному напрямку.

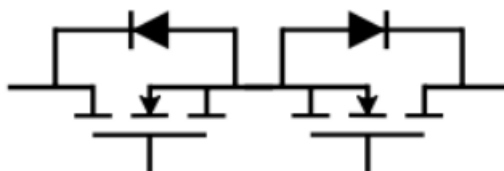


Рисунок 2.2 – Конфігурація MOSFET back-to-back

На рис. 2.3 зображена принципова схема детектору переходу через нуль мережевої напруги.

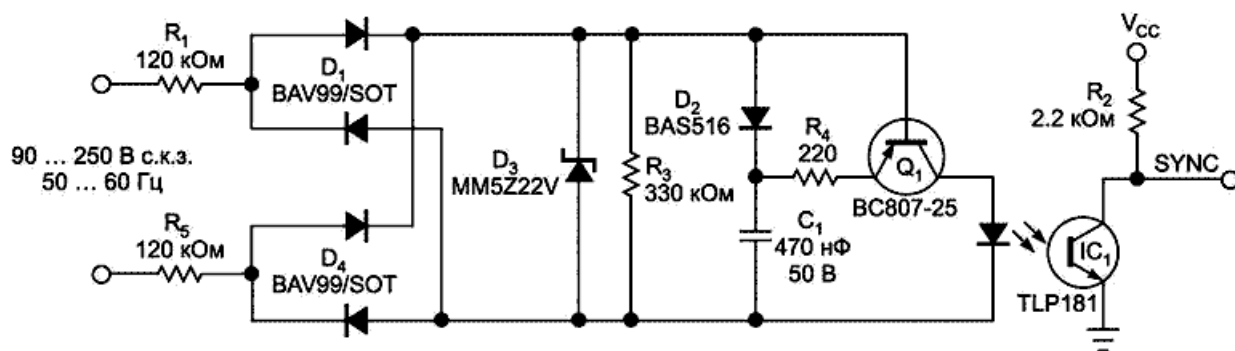


Рисунок 2.3 – Детектор переходу через нуль

Дана схема містить мінімальну кількість високовольтних компонентів та забезпечує гальванічну розв'язку. Детектор формує короткий імпульс при переході напруги через нуль. Імпульс виникає приблизно за 200 мкс до перетину нуля. Оскільки імпульс генерується тільки тоді, коли вхідна

напруга мережі близько до нуля, споживана схемою потужність невелика і становить близько 200 мВт при вхідній напрузі 230/50 Гц.

Конденсатор C1 заряджається до 22 В – рівня обмеження стабілітрона D3. Вхідний струм обмежується резисторами R1 та R5. Коли випрямлена вхідна напруга опускається нижче напруги на конденсаторі C1, відкривається транзистор Q1 і генерує імпульс тривалістю кілька сотень мікросекунд. Оптопара IC1 загострює фронти і робить вихідний імпульс прямокутнішим. Вимоги до R1 та R5 визначаються середньоквадратичним значенням вхідної напруги.

Вхідна напруга схеми ділиться порівну між резисторами R1 і R5, так що номінальна вхідна напруга дорівнюватиме 400 В - цілком достатньо для роботи в мережі 230 В. Більше жодного високовольного компонента для схеми не потрібно. Зазначимо тільки, що стабілітрон D3 з номінальною напругою стабілізації 22 В може пробиватися при напрузі до 30 В, у зв'язку з чим робочу напругу конденсатора 470 нФ (C1) треба вибирати із запасом, скажімо 50 В. І переважно, щоб C1 був керамічним, оскільки керамічні надійніше електrolітичних, - алюмінієвих або танталових, - особливо при підвищених температурах.

Резистор R4 обмежує піковий струм світлодіода оптопари. Первинне обмеження струму відбувається за рахунок плавного нахилу випрямленої змінної напруги, що не дозволяє Q1 генерувати піки струму в той час, коли він розряджає конденсатор C1.

Результат моделювання схеми в пакеті LTspice представлено на рис. 2.4.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

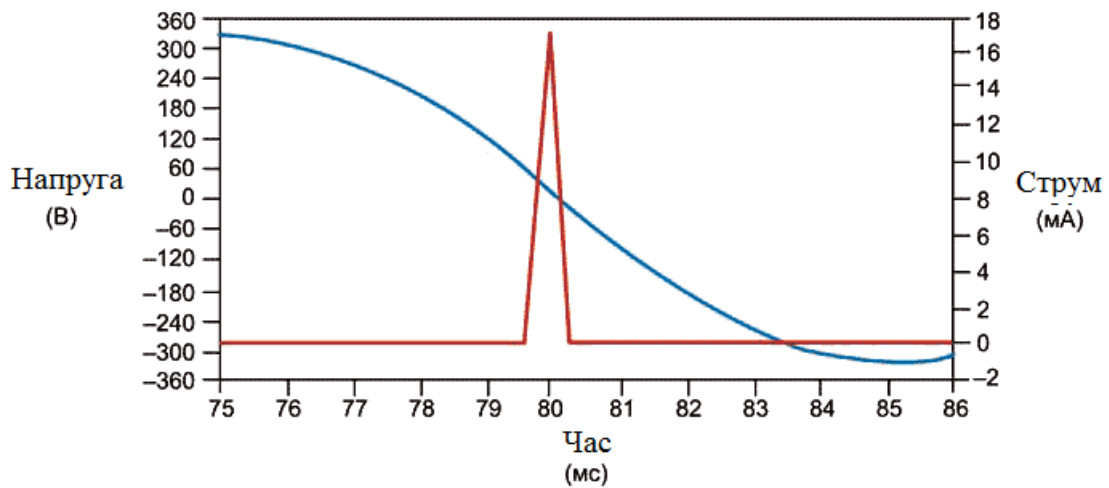


Рисунок 2.4 – Результат моделювання схеми детектора в LTspice

При вхідній напрузі 230 В/50 Гц піковий струм світлодіода оптопарі дорівнює 17 мА. Модель демонструє хороші результати в діапазоні мережних напруг від 90 до 250 при частоті як 50, так і 60 Гц. У мережі 110 В/60 Гц піковий струм через світлодіод дорівнює 8.5 мА, для роботи IC1 цього ще достатньо. Для збільшення струму світлодіода треба зменшити опір R3 або збільшити ємність конденсатора C1.

Тестування реальної схеми продемонструвало гарний збіг із моделлю (рис. 2.5).

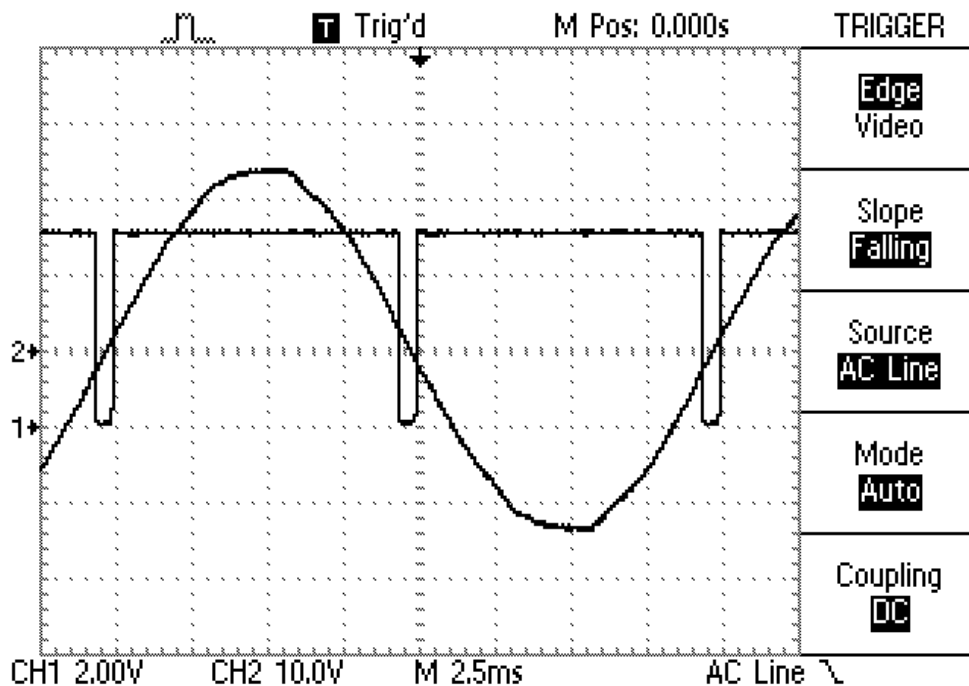


Рисунок 2.5 – Результати тестування реальної схеми

2.9. Вибір елементної бази

Припустимо, що нам треба комутувати ланку з навантаженням потужність $S = 100 \text{ VA}$ при напрузі змінного струму $U = 230 \text{ В}$. При цих умовах маємо пікове значення напруги 325 В та середньоквадратичний струм навантаження $I = S/U = 0.43 \text{ А}$.

Для типового перемикачання 230 В змінного струму (пік $\approx 325 \text{ В}$) зазвичай достатньо MOSFET на 650 В . Якщо потрібне дуже швидке перемикачання, робота за високих температур або стійкість до перехідних процесів, можна розглянути MOSFET на 1200 В SiC (Microchip, ST, Vishay). Вони мають вищу вартість, але значно кращу поведінку перемикачання та стійкість до перехідних процесів.

Зазначимо, що при середньоквадратичному струмі лише $\sim 0,44 \text{ А}$, майже будь-яка з деталей на 800 В буде сильно переоцінена на провідність, але при цьому слід перевірити втрати на перемикачання, $R_{DS(on)}$ при вибраній напрузі затвора та енергію лавини у випадку перемикачання індуктивних навантажень.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

У таблиці 2.2 наведені характеристики для N-канального MOSFET 2SK3673-01MR. Як бачимо, максимальна напруга сток-виток складає 700 В.

Таблиця 2.2 – Характеристики транзистора 2SK3673-01MR

■ **Maximum ratings and characteristic** Absolute maximum ratings

● (Tc=25°C unless otherwise specified)

Item	Symbol	Ratings	Unit
Drain-source voltage	V _{DS}	700	V
	V _{DSX} *5	700	V
Continuous drain current	I _D	±10	A
Pulsed drain current	I _{D(puls)}	±40	A
Gate-source voltage	V _{GS}	±30	V
Repetitive or non-repetitive	I _{AR} *2	10	A
Maximum Avalanche Energy	E _{AS} *1	242.2	mJ
Maximum Drain-Source dV/dt	dV _{DS} /dt *4	40	kV/μs
Peak Diode Recovery dV/dt	dV/dt *3	5	kV/μs
Max. power dissipation	P _D	Ta=25°C	2.16
		Tc=25°C	80
Operating and storage temperature range	T _{ch}	+150	°C
	T _{stg}	-55 to +150	°C
Isolation Voltage	V _{iso} *6	2	kVrms

*1 L=4.45mH, Vcc=70V, Tch=25°C, See to Avalanche Energy Graph *2 Tch≤150°C

*3 I_F≤-I_D, -di/dt=50A/μs, Vcc≤BV_{DSS}, Tch≤150°C *4 V_{DS}≤700V *5 V_{GS}=-30V

*6 t=60sec, f=60Hz

У таблиці 2.3 наведені характеристики для N-канального MOSFET 2SK2611 фірми TOSHIBA. Максимальна напруга сток-виток для цього транзистора складає 900 В.

Таблиця 2.3 – Характеристики транзистора 2SK2611

Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristics		Symbol	Rating	Unit
Drain-source voltage		V_{DSS}	900	V
Drain-gate voltage ($R_{GS} = 20 \text{ k}\Omega$)		V_{DGR}	900	V
Gate-source voltage		V_{GSS}	± 30	V
Drain current	DC (Note 1)	I_D	9	A
	Pulse (Note 1)	I_{DP}	27	A
Drain power dissipation ($T_c = 25^\circ\text{C}$)		P_D	150	W
Single pulse avalanche energy (Note 2)		E_{AS}	663	mJ
Avalanche current		I_{AR}	9	A
Repetitive avalanche energy (Note 3)		E_{AR}	15	mJ
Channel temperature		T_{ch}	150	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	$-55 \sim 150$	$^\circ\text{C}$

На рис. 2.6 наведена принципова схема керування транзисторами.

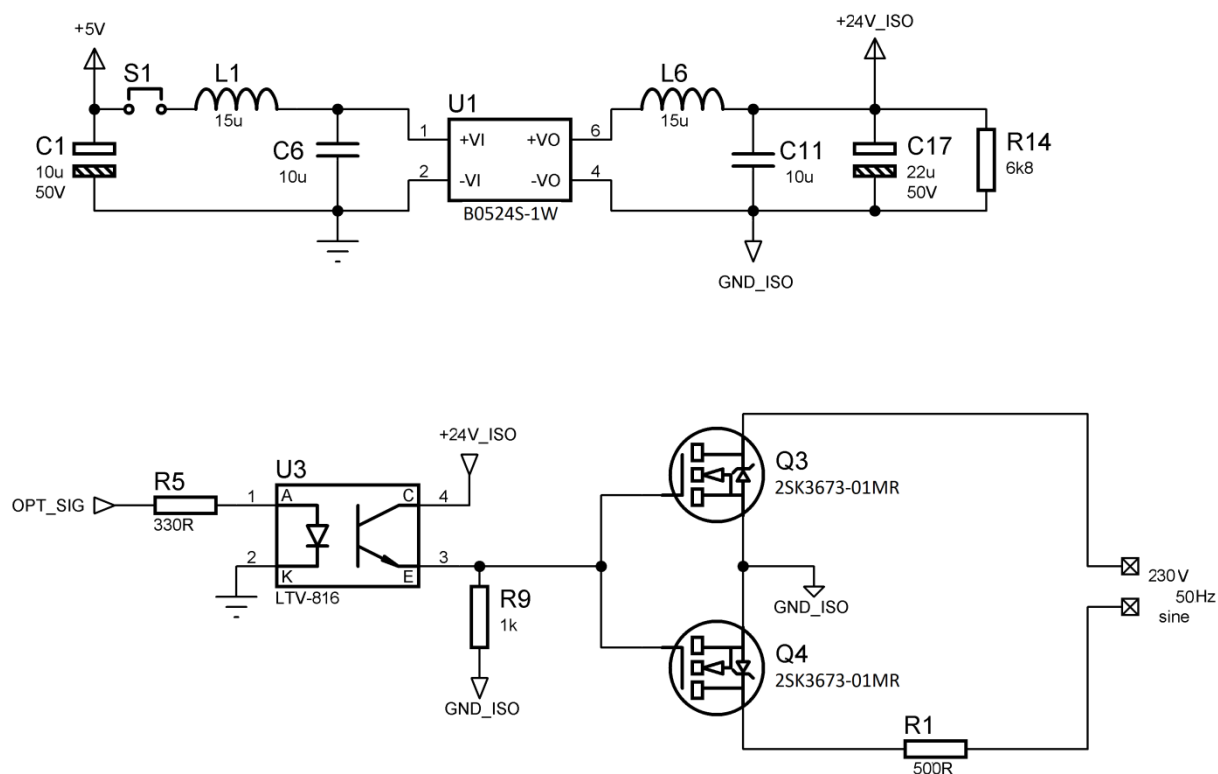


Рисунок 2.6 – Схема керування транзисторними MOSFET-ключами

Для забезпечення гальванічної розв'язки по живленню використовується DC-DC перетворювач U1 B0524S-1W потужністю 1 W. Гальванічна розв'язка по сигналу керування з мікроконтролеру здійснюється транзисторною оптопарою U3 LTV-816.

2.10. Вибір контрольно-вимірювальних приладів

У якості вимірювального приладу електричних параметрів навантаження виберемо PZEM-020, зовнішній вигляд якого зображено на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд мультиметра PZEM-020

Перерахуємо основні технічні характеристики вимірювального модуля PZEM-020:

- діапазон струму: 0-10A;
- діапазон напруги AC: 80-260V.

Функції:

1. Вимірювання напруги, струму, активної потужності, енергії, частоти, коефіцієнта потужності.
2. Сигналізація перевантаження.
3. Попереднє встановлення порогу сигналізації потужності.
4. Скидання лічильника енергії.
5. Зберігання даних після вимкнення живлення.
6. Великий РК-екран
7. Функція підсвічування.

Рекомендована схема підключення вимірювального модуля наведена на рис. 2.8.

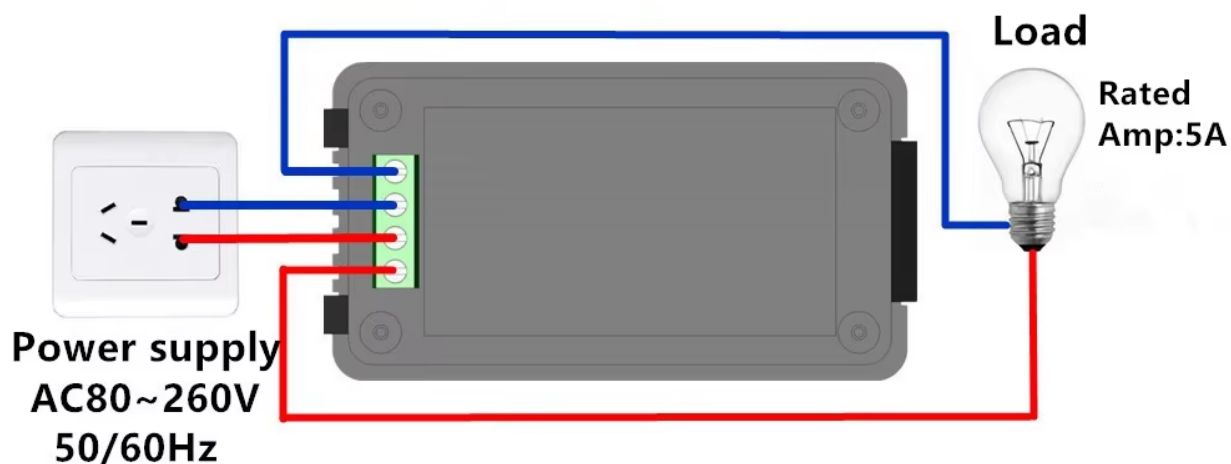


Рисунок 2.8 – Рекомендована схема підключення мультиметра PZEM-020

Слід зазначити, що вимірювальний модуль PZEM-020 ніяк не відображає характер навантаження (індуктивний чи ємнісний), тому додамо до навантаження ще вимірювач $\cos\varphi$ (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд вимірювача $\cos\varphi$ (фазометра)

Схема підключення вимірювача $\cos\varphi$ представлена на рис. 2.10, а внутрішня принципова схема приладу – на рис. 2.11.

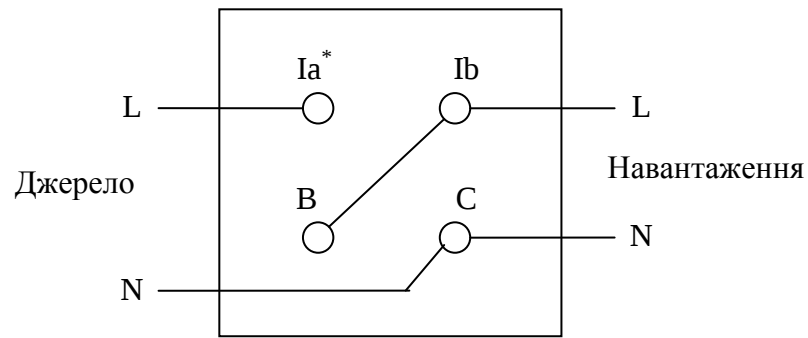
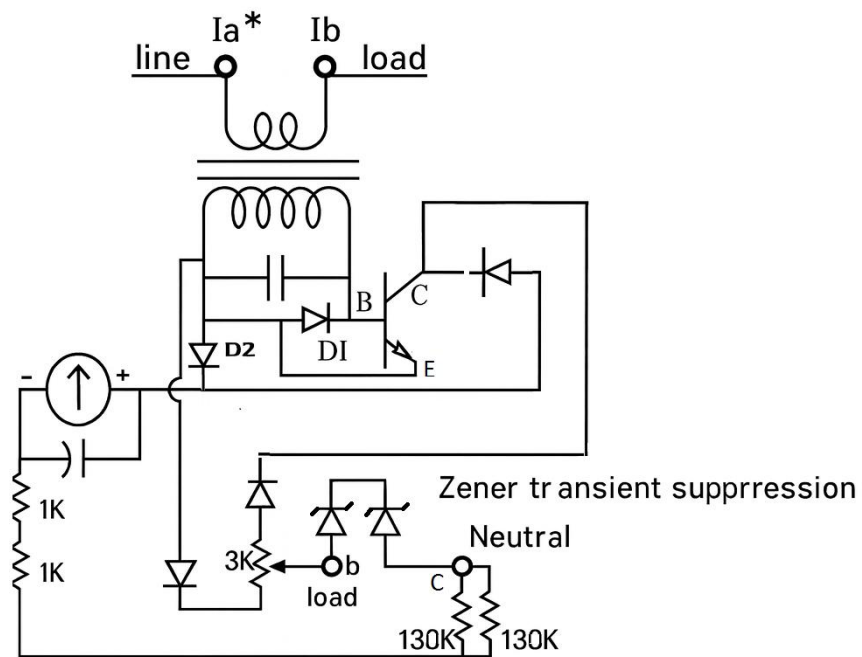


Рисунок 2.10 – Схема підключення вимірювача $\cos\varphi$



Phase detector

Рисунок 2.11 – Принципова схема фазометру

Висновки до розділу

У даному розділі були розглянуті технічні вимоги до апаратної частини керованого RLC-наванження. Проаналізовано схеми комутації банків навантажень. Запропоновано для мінімізації кількості комутованих елементів використовувати у банку навантаження 5 елементів, комутація яких здійснюється за рахунок електронних ключів, побудованих за схемою MOSFET back-to-back. Для усунення зайвих перехідних процесів при комутації елементів навантаження їхнє перемикання синхронізоване з моментом переходу кривої струму навантаження через нуль.

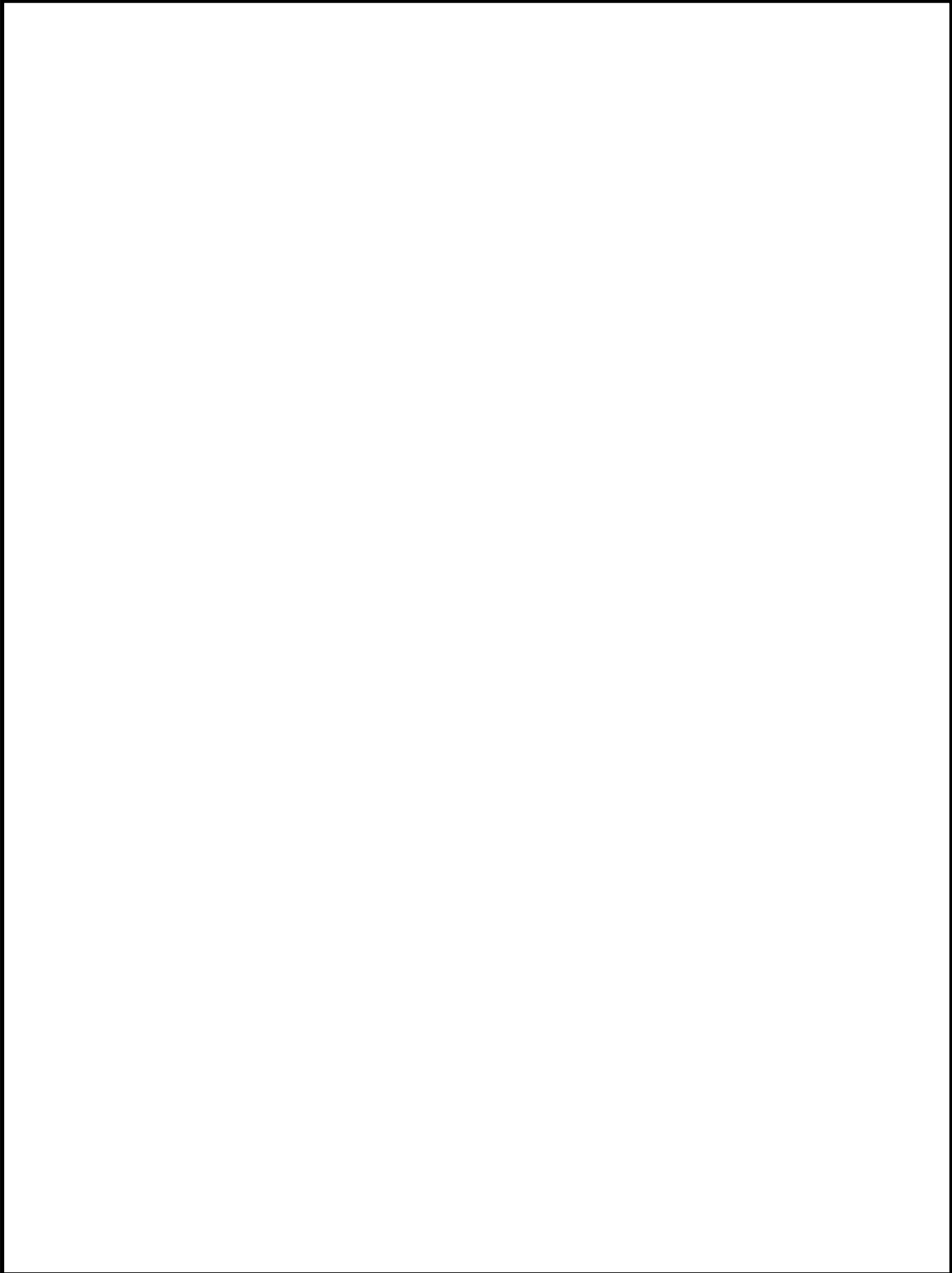
Accuracy Class

Class 1.5

Demchenko, Peter, «Improved optocoupler circuits reduce current draw, resist LED aging» EDN, Dec 14, 2007, pg 60.

«LTspice IV,» Linear Technology Corp.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.РЗ			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Пустомельник В. С.			Розробка програмної частини	Літ.	Арк.	Аркушів
Консультант							43	13
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Дьяконов О. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ

3.1. Розробка людино-машинного інтерфейсу

Для зручного користування регульованим навантаженням необхідно розробити людино-машинний інтерфейс, який включає у себе засоби відображення інформації та органи керування.

На рис. 3.1 представлено інтерфейс лицьової панелі регульованого навантаження.



Рисунок 3.1 – Інтерфейс лицьової панелі регульованого навантаження

Візуально панель розділена на три частини. Ліва частина містить автоматичний вимикач живлення системи керування навантаженням та індикаторну лампу; середня частина має мультиметр PZEM-020, рідкокристалічний індикатор та три енкодери для завдання параметрів навантаження; на правій частині розміщено індикатор $\cos\phi$.

3.2. Вибір мікроконтролерної платформи

Виходячи з запропонованої лицьової панелі зробимо підрахунок кількості вводів/виводів.

Рідкокристалічний дисплей може бути підключений до мікроконтролера по шині I2C (рис. 3.2). Підходящим є LCD I2C QC1602A, він має два рядки по 16 символів в кожній та працює зі стандартною бібліотекою LiquidCrystal з поставки Arduino IDE. Отже при використанні такого варіанту буде задіяний 2 порти шини I2C мікроконтролера.

Для синхронізації моментів комутації силових вентилів використовується зовнішнє переривання int0 мікроконтролера; схемотехнічно буде задіяний ще один цифровий вхід.

Для комутації кожного з трьох банків навантаження нам потрібно задіяти по 5 цифрових виходів мікроконтролера.

Отже, маємо:

1 цифровий вхід зовнішнього переривання;

2 цифрових входів/виходів шини I2C;

6 цифрових входів для підключення енкодерів;

15 цифрових виходів для комутації силових вентилів.

Всього: 24 цифрових піна.

Платформа Arduino Mega має 54 цифрових піна (з них 15 з підтримкою ШІМ) та 16 аналогових входів. Загальна кількість пінів введення-виведення становить 70.

Цифрові піни: 54 од., включаючи 15 од. з підтримкою ШІМ.

Аналогові входи: 16 од.

Загальна кількість пінів вводу-виводу: 70 од.

Інші виводи: включають порти живлення, USB, кнопку скидання (Reset) та роз'єм програмування ICSP.

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

3.3. Розробка програмного коду

Увесь програмний код можна умовно поділити на смислові блоки.

Розглянемо фрагмент коду, який зчитує дані з трьох енкодерів:

```
// Encoder pins
// Encoder CLK DT SW
// ENC1 89 90 91
// ENC2 92 93 94
// ENC3 95 96 97
// KY-040 has 20 pulses per revolution

//===== Encoder pin assignment =====
struct EncoderPins {
    uint8_t clk;
    uint8_t dt;
    uint8_t sw;
};

EncoderPins enc[3] = {
    {89, 90, 91}, // Encoder 1
    {92, 93, 94}, // Encoder 2
    {95, 96, 97} // Encoder 3
};

// =====Encoder state variables =====
long encoderValue[3] = {0, 0, 0};
int lastCLK[3] = {HIGH, HIGH, HIGH};
unsigned long lastButtonTime[3] = {0, 0, 0};

// switch position [0] - R, [1] - L, [2] - C
int switchPosition[3] = {0, 0, 0};

// =====
// ROTARY ENCODER POLLING LOGIC
// =====
void readEncoder(int id) {
    int currentCLK = digitalRead(enc[id].clk);

    if (currentCLK != lastCLK[id]) {
        // Direction check via DT
        if (digitalRead(enc[id].dt) != currentCLK) {
            encoderValue[id]++; // CW
        } else {
            encoderValue[id]--; // CCW
        }

        Serial.print("ENC");
        Serial.print(id + 1);
        Serial.print(" value: ");
        Serial.println(encoderValue[id]);
    }
}
```

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

    delay(1); // optional bounce suppression
}

lastCLK[id] = currentCLK;
}

// =====
//                               BUTTON WITH DEBOUNCE
// =====
void readButton(int id) {
    if (digitalRead(enc[id].sw) == LOW) {
        if (millis() - lastButtonTime[id] > 250) {
            lastButtonTime[id] = millis();

            Serial.print("ENC");
            Serial.print(id + 1);
            Serial.println(" button pressed!");
        }
    }
}

```

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

ARDUINO MEGA 2560 PINOUT

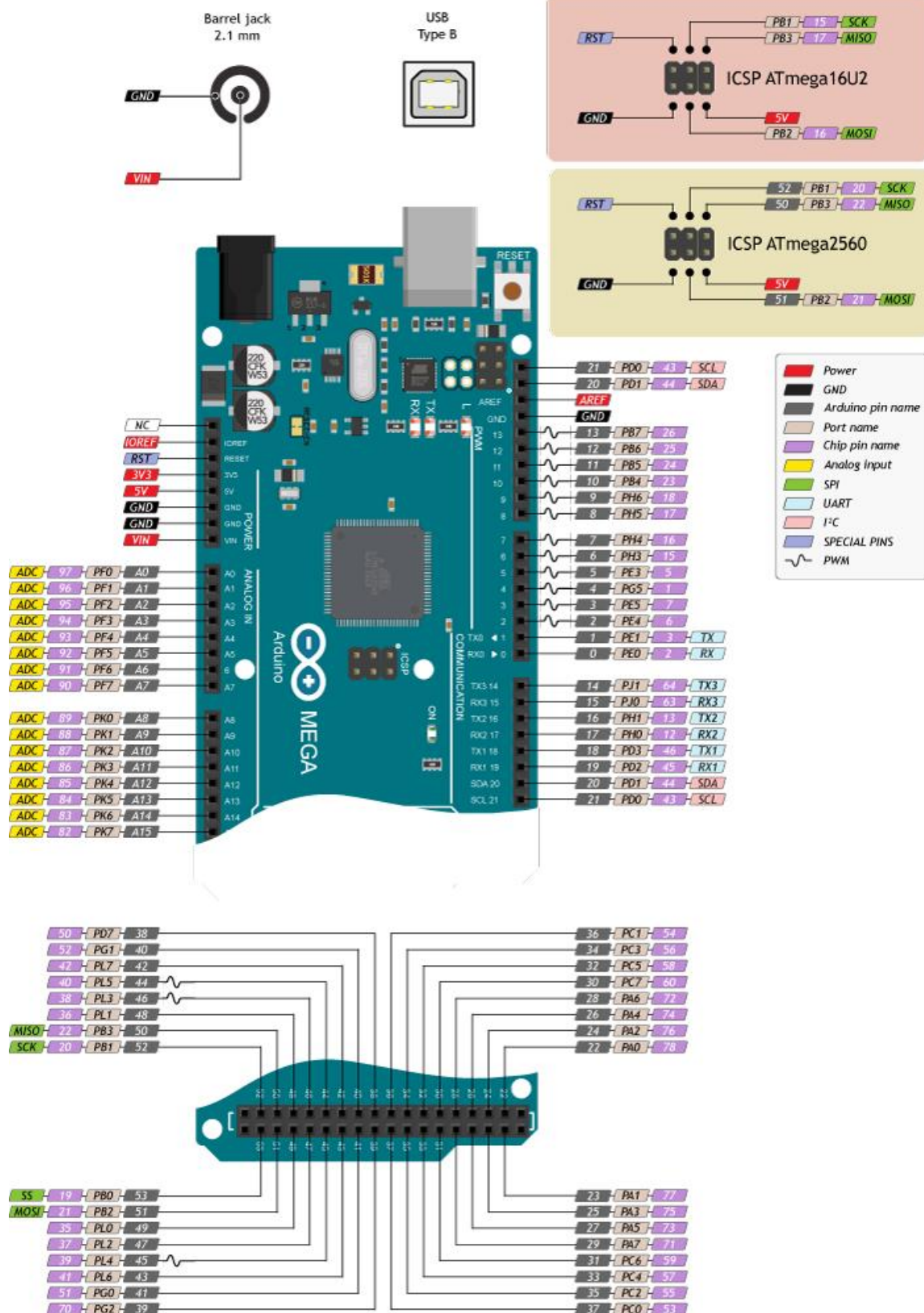


Рисунок 3.5 – Розпинування плати Arduino Mega 2560

Опитування енкодерів здійснюється функцією `readEncoder(int id)`, де параметр `id` визначає номер енкодера, що опитується. Цю функцію необхідно викликати періодично в тілі основної програми `loop()`.

Фрагмент коду ініціалізації енкодерів наведено нижче:

```
// init encoders
for (int i = 0; i < 3; i++) {
    pinMode(enc[i].clk, INPUT_PULLUP);
    pinMode(enc[i].dt, INPUT_PULLUP);
    pinMode(enc[i].sw, INPUT_PULLUP);
    lastCLK[i] = digitalRead(enc[i].clk);
}
```

Для програмного обмеження змінних, які містять пораховану кількість імпульсів з енкодера, використовується функція `limitEncoderValue(long encoderValue)`. Ліміт обмеження задається від 0 до `MAX_ENCODER_VALUE` (9). Функція фактично повертає номер комутованої позиції відповідного банку навантаження.

```
// =====
//                               LIMIT ENCODER VALUE
// =====

int limitEncoderValue(long encoderValue) {
    if (encoderValue < 0) {
        encoderValue = 0;
    }

    if (encoderValue > MAX_ENCODER_VALUE) {
        encoderValue = MAX_ENCODER_VALUE;
    }

    return (int) (encoderValue>>1);
}
```

Таблиця комутації силових вентилів (табл. 2.1) програмно реалізується функцією `getPinMask(char SwitchPos)`, яка у якості вхідного параметру отримує номер комбінації від 0 до 9, а повертає бітову маску, що згодом записується у відповідний порт мікроконтролеру:

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

// =====
//                               SWITCH DECODER
// =====
// SwitchPos - from 0..9
char getPinMask(char SwitchPos)
{
    char mask=0;
    switch (SwitchPos)
    {
        case 0:
            return 0;
        break;
        case 1:
            return (1<<1);
        break;
        case 2:
            return (1<<2);
        break;
        case 3:
            return (1<<2) | (1<<1);
        break;
        case 4:
            return (1<<3) | (1<<2);
        break;
        case 5:
            return (1<<3) | (1<<2) | (1<<1);
        break;
        case 6:
            return (1<<4) | (1<<3) | (1<<2);
        break;
        case 7:
            return (1<<4) | (1<<3) | (1<<2);
        break;
        case 8:
            return (1<<5) | (1<<4) | (1<<3) | (1<<2);
        break;
        case 9:
            return (1<<5) | (1<<4) | (1<<3) | (1<<2) | (1<<1);
        break;
        default:
            // unknown switch combination
            return 0;
        break;
    }
}

```

Як було вже зазначено у розділі 2, комутація банків навантаження повинна бути синхронізована з моментом переходу через нуль кривої струму.

					171.6321М.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Зсув кривої струму відносно кривої напруги для активного навантаження складає 0, для індуктивного ($+\pi/2$), для ємнісного ($-\pi/2$). Схема на рис. 2.3 формує короткий негативний імпульс при переході кривої напруги через нуль. Для визначення знаку фази всю схему керування треба доповнити такою же схемою синхронізації як на рис. 2.3, виключивши з неї діодний міст D1 – D4 и залишивши один діод, який буде виконувати функцію однонапівперіодного випрямляча.

Фазовий зсув при комутації будемо здійснювати програмно за допомогою таймеру Timer1. Нагадаємо, що у платформі ардуіно апаратний таймер Timer0 зарезервований для реалізації бібліотечних функцій роботи з часовими затримками.

Програмний код ініціалізації таймера Timer1 наведено нижче:

```
cli();

// -----
// Timer1 setup: CTC mode, 45 Hz
// -----
TCCR1A = 0;
TCCR1B = 0;

TCCR1B |= (1 << WGM12);           // CTC mode
TCCR1B |= (1 << CS12);           // prescaler 256
OCR1A = 694;                      // → 89.98 Hz

TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);          // enable Timer1
compare match A

// -----
// INT0 setup: falling edge
// -----
EICRA |= (1 << ISC01);           // falling edge
EICRA &= ~(1 << ISC00);

EIMSK |= (1 << INT0);            // enable INT0

sei();
```

Обнулення таймеру Timer1 програмно синхронізовано із зовнішнім перериванням int0:

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

volatile unsigned long lastInt0Time = 0; // last accepted
interrupt time (µs)
const unsigned long INTO_FILTER_US = 500; // noise filter
threshold (microseconds)
// =====
//                               EXTERNAL INTERRUPT HANDLER
// =====

// External interrupt INT0 (falling edge)
ISR(INT0_vect)
{
    unsigned long now = micros();

    // ----- Noise filter -----
    // Reject events occurring too soon after the previous one
    if ((now - lastInt0Time) < INTO_FILTER_US) {
        return; // ignore noise
    }
    lastInt0Time = now;
    // -----

    // SYNC TIMER: restart timer cycle immediately
    TCNT1 = 0;
    // setup comparator for 1/2 period of 100 Hz
    OCR1A = 312;

    //switch resistive load
    PORTA = getPinMask(switchPosition[0]);
}

```

Як бачимо, для усунення хибних спрацьовувань переривання використовується noise filter.

У цьому ж перериванні здійснюється синхронна комутація банків резистивного навантаження

```
PORTA = getPinMask(switchPosition[0]).
```

Код обробника переривання таймеру Timer1 наведено нижче:

```

// =====
// Timer1 CTC at ~45 Hz
// External INT0 falling-edge sync with noise filter
// =====

// Timer1 CTC interrupt (90 Hz)
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    if (digitalRead(POSITIVE_U_PIN)){
        // positive U wave
    }
}

```

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

        //switch L load
        PORTL = getPinMask(switchPosition[1]);
    }
    else {
        // negative U wave
        // switch C load
        PORTC = getPinMask(switchPosition[2]);
    }
}

```

Комутація банків індуктивного чи ємнісного навантаження залежить від знаку кривої напруги (зчитується на піні POSITIVE_U_PIN).

На рідкокристалічному індикаторі будемо відображати поточну позицію комутації для відповідних банків навантаження. Нагадаємо, що діапазон зміни даної позиції від 0 до 9:

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// pins for LCD
// SDA pin 20
// SCL pin 21
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // adjust to 0x3F if needed

// у функції setup():
// init lcd
    lcd.init();

// у функції loop():

// limit encoders values

    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        switchPosition[i]=limitEncoderValue(encoderValue[i]);
    }

// update LCD
// ----- First row -----
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("R=");
lcd.print(switchPosition[0]);

// ----- Second row -----
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("L=");
lcd.print(switchPosition[1]);
lcd.print(", C=");
lcd.print(switchPosition[2]);

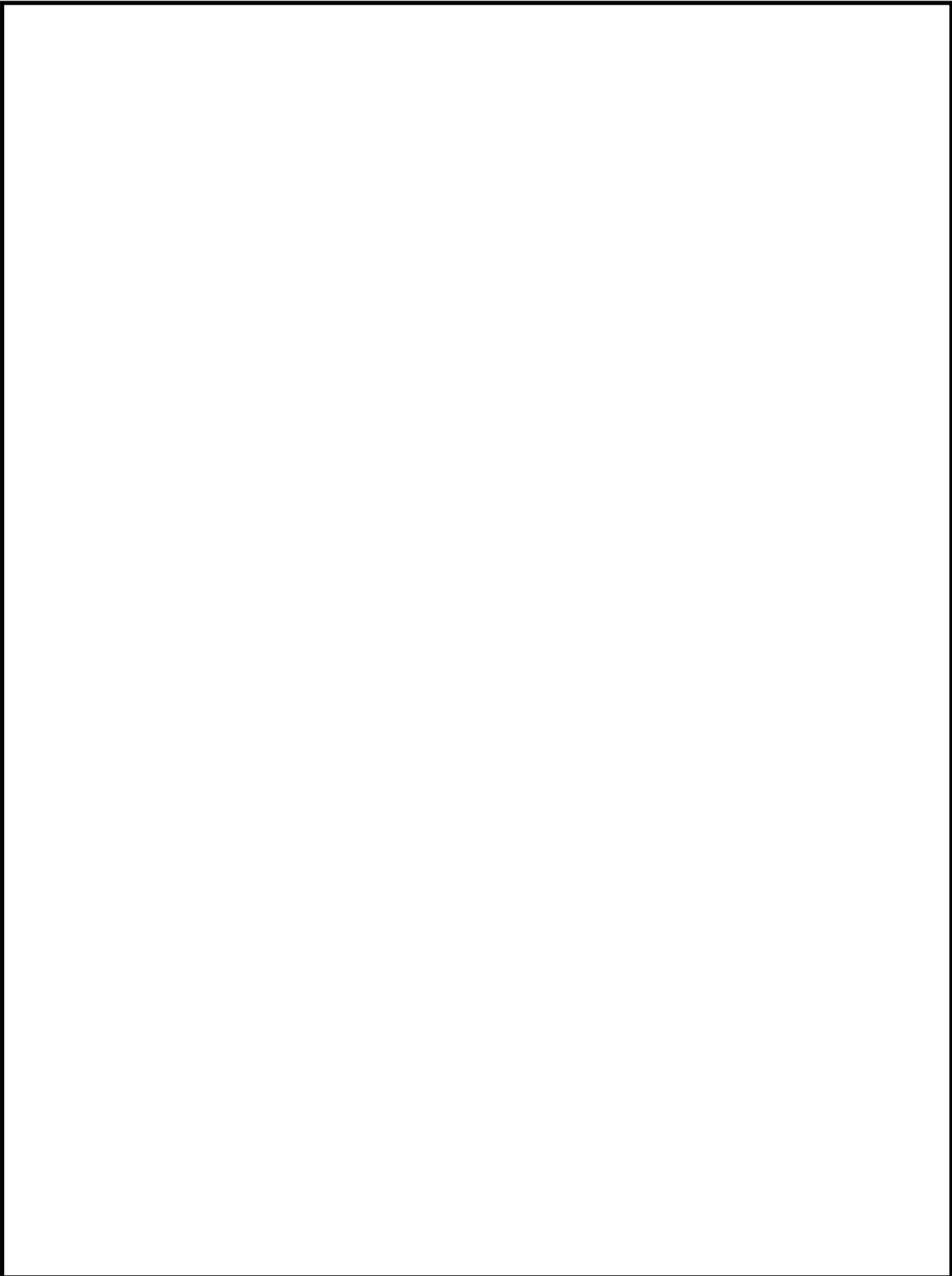
```

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

Висновки до розділу

У цьому розділі за допомогою модульного підходу був розроблений програмний код для мікропроцесорної системи керування банками навантаження. У якості програмно-апаратної платформи для реалізації була обрана відлагоджувальна плата Arduino Mega. Також розроблено ескіз лицьової панелі керованого навантаження.

					171.6321М.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Пустомельник В. С.			Організація процесу виробництва та охорона праці	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант		Губальцев А. М.					56	5
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Дьяконов О. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 4. ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Організація електромонтажних робіт

Підготовчі заходи (планування електромонтажних робіт з робочою напругою до 1000 В) включають наступні етапи:

- визначення обсягу робіт, схеми підключення, технічних умов (ТУ) і проектної документації;
- підготовка наряду-допуску або дозволу на роботу.

Електромонтажні роботи виконуються працівниками з відповідною групою з електробезпеки. Перед проведенням робіт необхідно провести інструктаж з охорони праці та перевірку знань.

Під час виконання електромонтажних робіт працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), мати відповідний інструмент і обладнання. Також необхідно перевірити стан вимірювальних приладів.

Організація робочого місця й безпеки забезпечується:

- маркуванням місць виконання робіт, огорожами, попереджувальними плакатами;
- порядком робіт у знеструмленому режимі: перевіркою відсутності напруги, заземлення, lock-out/tag-out. Роботи під напругою виконуються за спеціальними допусками.

Технологія монтажу включає:

- ознайомлення з монтажною схемою;
- монтаж механічних елементів, укладання кабелів;
- підключення захистів, заземлення, занулення;
- контроль затяжки контактів.

Після етапу монтажу виконується етап випробовування:

- вимірювання опору ізоляції, перевірка фазування, захисного заземлення;

					171.6321М.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

– оформлення протоколів випробувань.

Заключний етап введення в експлуатацію складається з:

- оформлення актів приймання;
- інструктажу експлуатаційного персоналу.

4.2. Охорона праці при пайці

Пайка - це не просто робота з проводами чи електрикою, це робота з нагрітим паяльником, розплавленим металом, флюсом, можливо - токсичними або хімічно активними речовинами. Тому вентиляція, чистота робочого місця, гідне зберігання матеріалів - критично важливі.

Неправильно організоване робоче місце (без витяжки, захистів, з безладом) може призвести до опіків, пожежі, отруєння парами, а також до травм, уражень електричним струмом або професійних захворювань.

Крім того погана ергономіка та незручне робоче місце підвищують втому, знижують концентрацію, що підвищує ризик помилки або нещасного випадку.

Робоче місце має відповідати загальним вимогам охорони праці, тобто роботодавець повинен створити безпечні і нешкідливі умови праці.

Робоче місце має бути облаштоване з урахуванням ергономіки: зручний стіл, простір для ніг, відповідне крісло, можливість виконувати роботу в зручній, без надмірного фізичного навантаження позі.

Не допускається захащення робочої зони сторонніми предметами, матеріалами, відходами — усе, що не потрібно для виконання поточної роботи, має зберігатись окремо.

Робітники, які виконують пайку, мають бути інструктовані з охорони праці, безпеки, пожежної безпеки, знати порядок дій при аварійній ситуації (пожежа, отруєння парами, ураження електричним струмом). Це частина обов'язків роботодавця згідно із загальними правилами.

					171.6321М.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Робочі місця підлягають атестації за умовами праці - роботодавець має забезпечити відповідність нормам мікроклімату, освітлення, вентиляції, ергономіки тощо.

Також можуть бути запроваджені внутрішні нормативні документи, а саме, локальні інструкції з безпеки, інструктажів, обліку робіт та контролю стану устаткування.

При пайці електронних компонентів зазвичай мають місце особливі небезпеки - гарячий паяльник, шкідливі випари флюсу, можливі токсичні речовини, підвищене тепловиділення тощо. Тому до організації місця додаються додаткові вимоги:

- вентиляція та повітрообмін: приміщення має бути обладнане ефективною місцевою витяжною або загальною вентиляцією, щоб видаляти випари припою та флюсу. Такі вимоги є загальними для виробництв, де є шкідливі чи токсичні випаровування.

- вогне- та пожежна безпека: паяльне місце не повинно бути поруч із легкозаймистими матеріалами (папір, тряпки, пластик тощо). Повинна бути можливість швидкої евакуації, а сам робочий пост спроектований так, щоб у разі займання можна було оперативно вийти або приборкати загоряння. Відстані від паяльника і джерел тепла/вогню до інших предметів – з урахуванням пожежних норм (не менше, ніж передбачено для робочих місць із нагрівальними/вогнебезпечними приладами).

- розміщення обладнання та робочих поверхонь: стіл повинен мати достатньо простору для рук, інструментів, матеріалів; простір для ніг – не менше ніж рекомендовано ергономічними нормами.

- організація зберігання матеріалів, інструменту та відходів: повинні бути спеціальні місця/контейнери для зберігання припою, флюсу, частинок відпаяних компонентів, відходів — так, щоб не створювати загрозу травм, забруднення чи пожежі.

					171.6321M.KP.ПЗ.P4	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

– контроль шкідливих факторів: якщо у процесі пайки є шкідливі випари, компоненти флюсу або інші речовини – потрібно забезпечити, щоб концентрація забруднювачів у повітрі не перевищувала гранично допустимі норми.

– електробезпека: паяльник та інші електроінструменти повинні бути справними, із заземленням (за потреби), а сама робоча зона - відповідати вимогам безпечної експлуатації електроустановок, якщо використовується електроживлення.

Висновки до розділу

Оскільки електронне навантаження представляє собою композицію силового електротехнічного обладнання (силові резистори, конденсатори, індуктивності) та мікроконтролерної системи керування його виробництво може бути організовано як два незалежних підпроцеси, для яких у даному розділі сформульовані вимоги щодо організації охорони праці.

					171.6321М.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній роботі запропонована стратегія комутація ланок банку навантаження змінного струму. Для плавного перемикавання ланок навантаження використовуються електронні ключі на основі схеми двох MOSFET-транзисторів, включених back-to-back. Моменти комутації ланок відбуваються при переході кривої струму через нуль. Для синхронізації мікроконтролерної системи керування транзисторами з напругою, що прикладена до навантаження, використовується детектор переходу через нуль. Потрібний фазовий зсув розраховується мікроконтролером в залежності від типу навантаження (R, L чи C).

Наведені заходи щодо організації процесу виробництва даного електронного навантаження. Надані рекомендації з охорони праці при виробництві.

					171.6321М.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chroma 63802 Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/CHROMA-63802-Datasheet.pdf> .
2. Programmable AC/DC Electronic Load. User Manual for IT8600 Series. Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.itechate.com/uploadfiles/%E7%94%A8%E6%88%B7%E6%89%8B%E5%86%8C/user%20manual/it8600/IT8600%20User%20Manual-EN.pdf> .
3. AC115V-2KW-RLC load bank. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.vilva.net/en/index.php?c=product&id=154> .
4. Demchenko, Peter, «Improved optocoupler circuits reduce current draw, resist LED aging» EDN, Dec 14, 2007, P. 60.
5. Serna-Motoya L. F., et al. Implementation of a Programmable Electronic Load for Three-Phase Systems [Електронний ресурс] / L. F. Serna-Motoya, J. A. Londoño-Arévalo, M. A. Viveros-Hurtado // Electronics (MDPI). - 2022. - Vol. 11, No. 7, Art. 106. - Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2073-431X/11/7/106> . - Дата звернення: 04.12.2025.
6. «Programmable Electronic AC Loads: a Review on Hardware Topologies» [Електронний ресурс] / оглядова стаття (ResearchGate). — 2019 (огляд). - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/336156777_Programmable_Electronic_AC_Loads_a_Review_on_Hardware_Topologies . - Дата звернення: 04.12.2025.
7. Chroma ATE. Programmable AC & DC Electronic Load — Model 63800 Series. Datasheet [Електронний ресурс]. — Chroma ATE Inc., 2023 (оновлений даташит). - Режим доступу: <https://www.chromausa.com/pdf/63800%20Programmable%20AC%20Electronic%20Load%20052023.pdf> . - Дата звернення: 04.12.2025.
8. Keysight Technologies. Electronic Load Fundamentals [Електронний ресурс] — White paper / Keysight. - Режим доступу:

					171.6321М.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

<https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06481/white-papers/5992-3625.pdf> . -

Дата звернення: 04.12.2025.

9. Keysight Technologies. Power Supply Testing with Electronic Loads — Application Note [Електронний ресурс]. — Keysight, 2019 (application note). -

Режим

доступу:

<https://keysight.zinfi.net/concierge/OEMs/keysight/wwwcontent/Attachments/pdf/powerappnote/5952-4190.pdf> . - Дата звернення: 04.12.2025.

10. «Single-Phase AC Electronic Load With Energy Recovery» [Електронний ресурс] / наукова стаття (конференційний / технічний звіт). —

Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/901269563/Single-Phase-AC-Electronic-Load-With-Energy-Recovery> . - Дата звернення: 04.12.2025.

11. «Load Emulators for Testing of Power Supplies — A Review» / V. Vijay (огляд) [Електронний ресурс]. — 2013. — Режим доступу:

<https://cprijournal.in/index.php/pr/article/download/881/401> . - Дата звернення: 04.12.2025. (огляд методів емуляції навантажень для тестування джерел живлення).

12. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): Наказ Міненерговугілля України від 21 липня 2017 р. № 476.

13. Правила безпечної експлуатації електроустановок: НПАОП (чинні правила відповідно до нормативних документів у сфері охорони праці). Київ: Офіційне видання.

14. Правила застосування електрозахисних засобів: НПАОП 40.1-1.07-01. Київ: Держнаглядохоронпраці, 2001.

15. ДСТУ та галузеві стандарти відповідно до типу обладнання: чинні державні стандарти України у сфері електротехніки згідно з каталогом НОП (Національного органу стандартизації).

16. Про охорону праці: Закон України від 14 жовтня 1992 р. № 2694-XII (із змінами та доповненнями).

					171.6321М.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

17. Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок: Наказ Мінсоцполітики України від 19 квітня 2010 р. № 449 (НПАОП 0.00-1.28-10).

18. Державні санітарні норми і правила щодо умов праці: чинні санітарні норми відповідно до МОЗ України. Київ: Офіційне видання.

19. Норми пожежної безпеки України (НАПБ): чинні нормативні акти у сфері пожежної безпеки. Київ: ДСНС України.

20. ДСТУ з ергономічних вимог до робочих місць: чинні державні стандарти серії «Ергономіка» відповідно до переліку НОП.

21. Вимоги до організації робочих місць: загальні та галузеві нормативні документи з охорони праці підприємств. Київ: Офіційні видання.

					171.6321М.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Повний код програми

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define HALF_PERIOD_100HZ      312
#define PERIOD_100HZ           624

#define POSITIVE_U_PIN         10
#define MAX_ENCODER_VALUE     18

// pins for LCD
// SDA pin 20
// SCL pin 21
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // adjust to 0x3F if needed

// Encoder pins
// Encoder CLK DT SW
// ENC1  89  90  91
// ENC2  92  93  94
// ENC3  95  96  97
// KY-040 has 20 pulses per revolution

// ===== Encoder pin assignment
// =====
struct EncoderPins {
    uint8_t clk;
    uint8_t dt;
    uint8_t sw;
};

EncoderPins enc[3] = {
    {89, 90, 91}, // Encoder 1
    {92, 93, 94}, // Encoder 2
    {95, 96, 97}  // Encoder 3
};

// ===== Encoder state variables
// =====
long encoderValue[3] = {0, 0, 0};
int lastCLK[3] = {HIGH, HIGH, HIGH};
unsigned long lastButtonTime[3] = {0, 0, 0};

// switch position [0] - R, [1] - L, [2] - C
int switchPosition[3] = {0, 0, 0};
```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

//
=====
//                                ROTARY ENCODER POLLING LOGIC
//
=====
void readEncoder(int id) {
    int currentCLK = digitalRead(enc[id].clk);

    if (currentCLK != lastCLK[id]) {
        // Direction check via DT
        if (digitalRead(enc[id].dt) != currentCLK) {
            encoderValue[id]++;      // CW
        } else {
            encoderValue[id]--;      // CCW
        }

        Serial.print("ENC");
        Serial.print(id + 1);
        Serial.print(" value: ");
        Serial.println(encoderValue[id]);

        delay(1); // optional bounce suppression
    }

    lastCLK[id] = currentCLK;
}

//
=====
//                                BUTTON WITH DEBOUNCE
//
=====
void readButton(int id) {
    if (digitalRead(enc[id].sw) == LOW) {
        if (millis() - lastButtonTime[id] > 250) {
            lastButtonTime[id] = millis();

            Serial.print("ENC");
            Serial.print(id + 1);
            Serial.println(" button pressed!");
        }
    }
}

// =====
// Timer1 CTC at ~45 Hz
// External INT0 falling-edge sync with noise filter
// =====

volatile unsigned long lastInt0Time = 0;           // last
accepted interrupt time (µs)

```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		66

```

const unsigned long INT0_FILTER_US = 500;           // noise
filter threshold (microseconds)

// Timer1 CTC interrupt (90 Hz)
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    // PORTB ^= (1 << 7);    // Toggle pin 13
    if (digitalRead(POSITIVE_U_PIN)){
        // positive U wave
        //switch L load
        PORTL = getPinMask(switchPosition[1]);
    }
    else {
        // negative U wave
        // switch C load
        PORTC = getPinMask(switchPosition[2]);
    }
}

//
=====
//                                     EXTERNAL INTERRUPT HANDLER
//
=====

// External interrupt INT0 (falling edge)
ISR(INT0_vect)
{
    unsigned long now = micros();

    // ----- Noise filter -----
    // Reject events occurring too soon after the previous one
    if ((now - lastInt0Time) < INT0_FILTER_US) {
        return;    // ignore noise
    }
    lastInt0Time = now;
    // -----

    // SYNC TIMER: restart timer cycle immediately
    TCNT1 = 0;
    // setup comparator for 1/2 period of 100 Hz
    OCR1A = 312;

    //switch resistive load
    PORTA = getPinMask(switchPosition[0]);
}

//
=====
//                                     SETUP

```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```
//
=====

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    // set up the external interrupt
    // Attach the interrupt to the pin
    // INT0 is on pin 2
    // RISING is the trigger condition
    // interruptHandler is the function to be called
    //attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin),
interruptHandler_int0, FALLING);

    cli();

    //pinMode(13, OUTPUT);

    // -----
    // Timer1 setup: CTC mode, 45 Hz
    // -----
    TCCR1A = 0;
    TCCR1B = 0;

    TCCR1B |= (1 << WGM12);           // CTC mode
    TCCR1B |= (1 << CS12);           // prescaler 256
    OCR1A = 694;                     // → 89.98 Hz

    TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);         // enable Timer1
compare match A

    // -----
    // INT0 setup: falling edge
    // -----
    EICRA |= (1 << ISC01);           // falling edge
    EICRA &= ~(1 << ISC00);

    EIMSK |= (1 << INT0);           // enable INT0

    // init ports
    // port A for R
    DDRA = 0xFF;
    asm("nop");
    PORTA = 0;
    //Port L for L
    DDRL = 0xFF;
    asm("nop");
    PORTL = 0;
    //Port C for C
    DDRC = 0xFF;
    asm("nop");
    PORTC = 0;
}
```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

sei();

Serial.begin(115200);

// init encoders
for (int i = 0; i < 3; i++) {
    pinMode(enc[i].clk, INPUT_PULLUP);
    pinMode(enc[i].dt, INPUT_PULLUP);
    pinMode(enc[i].sw, INPUT_PULLUP);
    lastCLK[i] = digitalRead(enc[i].clk);
}

Serial.println("Three KY-040 encoders (polling mode) ready.");

// init lcd
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.clear();

}

//
=====
//                                LOOP
//
=====

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:

    //poll encoders
    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        readEncoder(i);
        readButton(i);
    }
    // limit encoders values

    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        switchPosition[i]=limitEncoderValue(encoderValue[i]);
    }

    // update LCD
    // ----- First row -----
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("R=");
    lcd.print(switchPosition[0]);

    // ----- Second row -----
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("L=");
    lcd.print(switchPosition[1]);

```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		69

```

    lcd.print(", C=");
    lcd.print(switchPosition[2]);
}

//
=====
//                                     LIMIT ENCODER VALUE
//
=====

int limitEncoderValue(long encoderValue) {
    if (encoderValue < 0) {
        encoderValue = 0;
    }

    if (encoderValue > MAX_ENCODER_VALUE) {
        encoderValue = MAX_ENCODER_VALUE;
    }

    return (int) (encoderValue>>1);
}

//
=====
//                                     SWITCH DECODER
//
=====

// SwitchPos - from 0..9
char getPinMask(char SwitchPos)
{
    char mask=0;
    switch (SwitchPos)
    {
        case 0:
            return 0;
            break;

        case 1:
            return (1<<1);
            break;

        case 2:
            return (1<<2);
            break;

        case 3:
            return (1<<2) | (1<<1);
            break;

        case 4:

```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

        return (1<<3) | (1<<2);
break;

case 5:
    return (1<<3) | (1<<2) | (1<<1);
break;

case 6:
    return (1<<4) | (1<<3) | (1<<2);
break;

case 7:
    return (1<<4) | (1<<3) | (1<<2);
break;

case 8:
    return (1<<5) | (1<<4) | (1<<3) | (1<<2);
break;

case 9:
    return (1<<5) | (1<<4) | (1<<3) | (1<<2) | (1<<1);
break;

default:
    // unknown switch combination
    return 0;
break;
}
}

```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		