

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
Інститут Електроенергетики
(інститут)
Електротехнічний факультет
(факультет)
Кафедра електропривода
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студента Рубана Дениса Сергійовича
(ПІБ)
академічної групи 141М-19-4
(шифр)
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(офіційна назва)
на тему Система підтримки раціональної енергоефективності асинхронного електропривода механізмів
тривалого режиму роботи
затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 20.11.2020р №965-с
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Бородай В.А.			
розділів:				
1,2,3	Бородай В.А.			
4	Тимошенко Л.В.			

Рецензент	Рогоза М.В.			
-----------	----------------	--	--	--

Нормоконтролер	Казачковський М.М.			
----------------	-----------------------	--	--	--

Дніпро

2020

								Арк.
								1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ			

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри

електропривода

(повна назва)

Казачковський М.М.

(підпис) (прізвище, ініціали)

«_01_» _____ 09 _____ 2020 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ступеня магістра

(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Рубану Денису Сергійовичу академічної групи 141М-19-4

(прізвище та ініціали)

(шифр)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(офіційна назва)

на тему Система підтримки раціональної енергоефективності асинхронного електропривода механізмів тривалого режиму роботи

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 20.11.2020р №965-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
1	Актуальність теми	12.10.2020
2	Теоретична частина	02.11.2020
3	Дослідницька частина	22.11.2020
4	Техніко-економічне обґрунтування	13.12.2020

Завдання видано _____ Бородай В.А _____

(підпис керівника)

(прізвище, ініціали)

Дата видачі 01 вересня 2020

Дата подання до екзаменаційної комісії _____ 17.12.2020 _____

Прийнято до виконання _____ Рубан Д.С _____

(підпис студента)

(прізвище, ініціали)

Арк.

ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ

2

Зм. Арк. № докум. Підпис Дата

Реферат

Пояснювальна записка: 54 стор., 11 рис., 5 табл., 16 джерел, 13 сторінок презентації.

Об'єкт детальної розробки: ШІМ перетворювач з індивідуальним фільтро-компенсуючим пристроєм системи підтримки раціональної енергоефективності асинхронного електропривода механізмів тривалого режиму роботи

Мета роботи: розробка системи підтримки раціонального регулювання, яка буде забезпечувати необхідний рівень потужності в залежності від виробничого завдання та потужності, необхідної для їх виконання.

В проєкті виконано аналіз заходів щодо модернізації існуючих способів покращення показника економії електроенергії у системах управління асинхронним двигуном, який працює в довготривалому режимі з мало змінним рівнем навантаження.

Модернізована схема на основі дискретних елементів, що буде задовольняти потребу потужності двигуна в залежності від навантаження та виробничих завдань за допомогою заміни частини елементів програмованим мікроконтроллером.

Виконана розробка програмного забезпечення для програмованого мікроконтроллера, що заміщує дискретні елементи та виконує аналогічну з ними функцію.

Доведена економічна ефективність впровадження технічних рішень.

АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД,
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ТРИВАЛИЙ РЕЖИМ РОБОТИ,
ПРОГРАМОВАНИЙ МІКРОКОНТРОЛЛЕР

						Арк.
					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Abstract

Explanatory note: 54 pages, 11 figures, 5 tables, 16 sources, 13 sheets of the graphic part.

The object of detailed development: System of rational energy efficiency support for asynchronous electric drive of long mode of operation mechanisms.

Purpose: development of a rational control system that will provide required level of power depending on the production task and the power required to perform them.

The project analyzes methods of modernization for existing proposals to improve energy efficiency in asynchronous motor control systems operating in long-term mode with low variable load.

The scheme on the basis of discrete elements that will satisfy need of power of the engine depending on loading and production tasks is modernized by means of replacement of a part of elements by the programmable microcontroller.

Developed software for a programmable microcontroller that replaces discrete elements and performs a similar function

The economic efficiency of implementation of technical solutions is proved.

AUTOMATIC CONTROL, ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, ENERGY EFFICIENCY, LONG OPERATING MODE, PROGRAMMED MICROCONTROLLER

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		4

Зміст

Реферат.....	3
Вступ.....	6
1. Актуальність теми.....	12
1.1 Сучасні проблеми енергоощадності.....	12
1.2 Огляд літературних джерел.....	15
1.3 Обґрунтування доцільності та визначення задач	17
Висновки.....	19
2. Теоретична частина.....	20
2.1 Обґрунтування параметрів регулювання напруги.....	20
2.2 Розробка та побудова схеми перетворювача.....	23
2.3 Визначення параметрів ланцюга компенсації навантаження.....	25
2.4 Реалізація системи засобами мікроконтролера.....	29
Висновки.....	32
3. Дослідницька частина.....	33
3.1 Реалізація ступеневого регулювання та формування рекомендацій.....	33
3.2 Реалізація плавного регулювання та оформлення рекомендацій.....	36
Висновки.....	39
4. Економіка.....	40
4.1. Технікоеконімічне обґрунтування.....	40
4.2. Визначення річної економії від впровадження науково-технічного рішення.....	42
Висновки.....	45
Загальні висновки.....	46
Перелік літератури.....	48
Додатки А.....	51
Додатки Б.....	53
Додатки В.....	54

						ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			5

Вступ

Актуальність теми

Відомо, що промислово-господарчий комплекс України задовольняє власні потреби в енергоносіях приблизно на половину від необхідного [1]. В той час інша половина ринку забезпечена імпортом, частка якого у залежності від виду корисних копалин становить від 20% до 85% потреби. Очевидно, що у випадку непередбачуваних ситуацій існує вірогідність руйнування штатного режиму електропостачання.

З іншого боку промисловість та комунальні структури користуються морально та фізично застарілим обладнанням з низькою енергоефективністю. Як наслідок, висвітлені проблеми мають суттєвий вплив на енергоемність будь-якого виробництва, а їх дія призводить до втрати економікою України конкурентоздатності і привабливості для довгострокових інвестицій.

Зважаючи на вищесказане, питання енергоефективності та енергоощадності є гостро актуальним.

Мета і завдання досліджень

Головною задачею роботи є розробка системи автоматичного регулювання, яка забезпечить необхідний рівень потужності в залежності від виробничого завдання на входи АД.

Для досягнення цієї мети встановлені та вирішені наступні задачі:

- Обрати та обґрунтувати перспективні напрямки енергозбереження існуючими засобами електроприводу, з оглядом на досвід іноземних розробників;

						Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	

- Обрати спосіб регулювання потужності асинхронного приводу для механізмів тривалого режиму роботи;
- Визначити рівень потужності для розмежування нормального режиму роботи та режиму роботи з підвищеною енергоощадністю;
- Розробити мікросхематичне рішення регулятора за умов експлуатації з підвищеним ККД;
- Розрахувати параметри ланцюга локальної компенсації реактивної потужності системи асинхронного електропривода та системи сприяння гарантованої комутації керуючих ключів перетворювача.

Методи досліджень

Для вирішення поставлених задач використовувались методи теоретичних досліджень, які базуються на фундаментальних положеннях теорії електричних машин, теорії електропривода, методів математичного і комп'ютерного моделювання засобами схемотехнічного проектування систем автоматичного керування у компоненті Multisim математичного моделювання Matlab електронної лабораторії National Instruments.

Об'єктом досліджень є електромагнітні процеси в системі асинхронного електропривода механізмів тривалого режиму роботи задля досягнення раціональної енергоефективності.

Предметом досліджень є енергоефективний регулятор напруги асинхронного двигуна.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		7

Наукові положення і результати, винесені на захист:

- Розроблено та побудовано цифрові моделі системи імпульсно-фазового керування для ступеневого і плавного регулювання напруги живлення двигуна із залученням способу широтно-імпульсної модуляції мережної напруги;

- надано рекомендації щодо рівня просідання навантаження, за якого потрібно зменшити напругу живлення і її величина при релейному керуванні;

- випробування системи плавного керування з координатно-фазовим управлінням шпаруватості для досягнення раціональної енергоефективності привода.

Наукова новизна роботи:

Зроблений обґрунтований вибір межі перемикання релейного регулятора з режиму нормальної роботи в режим енергоефективного використання, визначений рівень раціональної величини вихідної напруги перетворювача за якої досягається раціонально-енергоефективне керування приводом, розроблений алгоритм визначення параметрів РС фільтруючого ланцюга з метою одночасного забезпечення найкращих умов комутації силових ключів перетворювача та здійснення безперервної компенсації реактивної потужності двигуна за умови експлуатації перетворювача із підвищеним ККД.

Відмінністю від результатів, отриманих іншими авторами є використання нового способу синтезу системи енергоефективності асинхронного двигуна і підтверджена можливість використання запропонованої схеми для досліджень

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		8

параметрів асинхронного двигуна з мало змінним режимом роботи та підвищеним ККД

Практичне значення роботи

Впровадження спрощеної системи перетворення із підвищеним ККД дозволить створити автоматичну систему керування асинхронного привода, завдяки якій можливо досягти збереження енергоресурсу на ланках двигуна, перетворювача та енергосистеми, за умови мінімальних капітальних вкладень на її виготовлення та модернізацію існуючих систем

Основний зміст роботи

Перший розділ присвячений аналізу питання енергозбереження засобами електропривода на сучасному виробництві, їх позитивним якостям і недолікам.

В результаті роботи над першою частиною, досліджені відомі засоби енергозбереження засобами електропривода на виробництві, методи їх реалізації, а також переваги, недоліки, специфічні вимоги до використання та особливості сфери застосування перетворювачів, доступних на ринку.

Другий розділ присвячений визначенню раціонального значення напруги живлення при роботі в енергоефективному режимі при переході через позначку в 60% від номінального моменту навантаження на прикладі двигуна 4A132M8У3.

Також у другому розділі виконана розробка та побудова принципової схеми перетворювача, покрокове визначення покладеного на нього функціоналу та детально описані процеси, що виникають у перетворювачі під час роботи.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		9

Третій розділ присвячений проектуванню та моделюванню схем та формуванню рекомендацій щодо сприятливих умов для їх роботи.

Була створена модель широтно-імпульсної модуляції системи ступеневого керування енергоефективністю асинхронного двигуна та проведенні процеси штучного моделювання в програмному забезпеченні Multisim та Autocad. При запуску схеми починається відлік часу роботи схеми і відбувається віртуальне моделювання її роботи.

Також була створена модель перетворювача з плавним пуском проведенні процеси штучного моделювання в програмному забезпеченні Multisim та Mathcad. При запуску схеми починається відлік часу роботи схеми і відбувається віртуальне моделювання її роботи.

Четвертий розділ присвячений економіко-технічному обґрунтуванню доцільності використання запропонованих методів регулювання з використанням фільтрокомпенсуючих пристроїв та розробки та використання спеціальних керуючих схем, працюючих на базі широтно-імпульсної модуляції.

Під час роботи над четвертим розділом розраховане річне споживання електроенергії двигуном 4A132M8У3 при використанні традиційного і керованого методів живлення при різних режимах навантаження. Зроблені висновки щодо доцільності використання запропонованого енергоефективного регулятора.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		10

Ключові терміни

АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МЕХАНІЗМИ ТРИВАЛОГО РЕЖИМУ РОБОТИ, ПРОГРАМОВАНИЙ МІКРОКОНТРОЛЛЕР, МАЛО-ЗМІННИЙ ГРАФІК НАВАНТАЖЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЙНІ ТА НАСОСНІ УСТАНОВКИ, РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Розділ 1.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

1.1. Аналіз сучасних способів енергозбереження засобами асинхронного приводу.

В наш час електропривод є невід'ємною частиною переважної більшості сучасних промислових механізмів, побутових пристроїв та інших складних пристроїв [2]-[3]. Близько 70% електроенергії в електричній мережі призначені а частку електричного приводу. Слід припустити, що енергозбереження засобами електропривода є доцільним і потребує подальшого розвитку. При цьому значна її частина витрачається на роботу насосно-вентиляційних установок, які, будучі потужними системами з тривалим режимом роботи, визначаються як механізми з високим енергоспоживанням.

Більшість існуючих промислових електроприводів використовують асинхронні двигуни, які завдяки відносній прості конструкції мають достатню надійність за одночасної невисокої енергоефективності у порівнянні із іншими електромеханічними системами. Зазвичай їх номінальний електричний ККД коливається у межах 70–92 % при коефіцієнті потужності 0,8-0,92, а його енергетичний ККД не перевищує 82 % [4]. Як наслідок, до 44 % споживної енергії витрачається на розігрів обмоток, елементів основної конструкції та розсіювання у навколишнє середовище потоків, що створюються електромагнітною системою асинхронного двигуна.

Сучасні методи забезпечення енергоефективності асинхронних приводів базуються на використанні перетворювачем частоти або тиристорних регуляторів в системі з асинхронним двигуном. Використання системи з тиристорними

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

регуляторами в умовах фазового способу управління мережевою напругою призводить до зменшення коефіцієнту потужності тиристорного перетворювача, що, в свою чергу, призводить до збільшення витрат енергії на етапі перетворення. Такі наслідки не задовольняють меті дослідження, однак, за умов відсутності необхідності у регулюванні швидкості, система з тиристорними регуляторами має значно меншу ціну капітальних витрат, що неможна залишити без уваги.

У ланці електромережі необхідно виділити проблему генерації реактивної потужності, що є прямим наслідком активно-індуктивного характеру навантаження двигуна, і, як наслідок, призводить до перевантаження мережі і зростанню витрат відповідно. За приблизними підрахунками споживають біля 10% від виробленої електроенергії.[5] Тиристорні електроприводи, з одного боку, споживають активну потужність, як швидкість незворотного перетворення електроенергії в теплову, а також витрачену на виконання механічної роботи, а з іншого – реактивну потужність, як швидкість оберненого перетворення енергії електричного поля в енергію магнітного і навпаки. І хоча виробництво реактивної потужності не потребує додаткових ресурсів, її передача пов'язана з втратами активної потужності на всіх ділянках електропередач, починаючи від синхронного генератора електростанції та закінчуючи трансформаторами і лініями електропередач.

Виходячи з цих фактів, можна виділити основні проблеми, які слід вирішити в роботі, а саме;

- 1) безперервна компенсація реактивного опору асинхронного двигуна, оскільки це дозволить в певній мірі вирішити

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		13

проблему енергозбереження на етапі транспортування електроенергії через мережу;

- 2) пошук більш досконалого схемного рішення та способу керування перетворювача напруги, який володіє високою енергетикою за умови прийнятної вартості на керуюче обладнання;
- 3) Вирішення питань комутації керуючих ключів.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.2. Огляд літературних джерел

З наведених причин розробниками електричного привода застосовуються різноманітні способи заощадження електроенергії у електромеханіці:

- використання нерегульованого приводу із середнім коефіцієнтом завантаження в 0,6 відносних одиниць [5], що не є раціональним за умови постійно змінних виробничих завдань;
- використання двигунів із підвищеним вмістом активних матеріалів [6], що дозволяє підняти їх ККД до 5 % на забезпечує енергозбереження до 30% , але потребує значних економічних впливань для модернізації. Окрім цього, ця розрахункова економія можлива лише при незначній зміні навантаження і відповідно налагодженій силовій частині, проте, витрати енергії з безпосередньо двигуном залишаються великими;
- зниження витрат на ділянці мережі завдяки компенсації реактивної потужності стаціонарними централізованими або локальними фільтро-компенсуючими пристроями та конденсаторами;
- регулювання електропривода за допомогою силових перетворювачів [7], де використання регуляторів напруги має перевагу над перетворювачами частоти [8], в наслідок суттєво меншій вартості;
- залучення систем перетворення із підвищеним ККД, які базуються на принципах широтно-імпульсної модуляції [9]. Системи такого типу мають відносно складне схемне рішення, що відповідно підвищує їх початкову вартість.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		15

Таким чином, можливо стверджувати, що комплексне використання різних засобів енергозбереження є необхідним при вирішенні проблеми енергоощадності. Крім того, є доцільним використання для електромеханічних систем із тривалим режимом роботи регуляторів напруги із спрощеною схемою керування і принципом широтно-імпульсної модуляції, яка одночасно враховує питання локальної компенсації реактивної потужності та вирішує питання комутації керуючих ключів перетворювача.

Загальновідомим засобом компенсації реактивної потужності є батареї конденсаторів, перевага яких над напівпровідниковими фільтро-компенсуючими пристроями є низька вартість та простота в експлуатації.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.3. Обґрунтування доцільності та визначення задач

Ресурсозбереження – це наріжне питання використання природних ресурсів та розвитку технологій, що забезпечує зниження енергоємності на одиницю продукції та більш раціональне використання корисних копалин. Основною ознакою розвитку підприємства у сфері ресурсозберігаючої є визначення найперспективніших напрямів та використання комплексного підходу до питання економії. Об'єктивні умови для їх реалізації повинна забезпечити цілісна система управління ресурсозбереженням на підприємстві. Під системою управління ресурсозбереженням підприємства слід розуміти сукупність дій щодо здійснення впливу управлінських органів на процес ресурсозбереження за допомогою реалізації функцій, спрямованих на досягнення постійного підвищення ефективності використання всіх ресурсів підприємства і, як наслідок, підвищення ефективності фінансово-господарської діяльності [10]. Питання раціонального використання енергоресурсів підприємств є перспективним та доцільним напрямом розвитку досліджень через скінченність корисних копалин та природних енергоносіїв і, як наслідок, їх стрімким подорожчанням.

Енергозбереження – комплекс дій та заходів, що призводить до зменшення кількості використовуваної енергії. В Україні це стимулюється одночасно декількома факторами. З одного боку діє Закон України «Про енергозбереження» – Закон, що визначає правові, економічні, соціальні та екологічні основи енергозбереження для всіх підприємств, об'єднань та організацій, розташованих на території України, а також для громадян. З іншого боку зростаюча цікавість населення та бізнесу до технологій у сфері енергозбереження. Їх розвиток призводить до

						Арк.
					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєвого зниження грошових витрат за рахунок більш ефективного використання паливно-енергетичних ресурсі. Зростаючі ціни на енергоносії стимулюють економно їх використовувати: безпаливні установки для виробництва електроенергії, акумулювання теплової енергії, ізолювання приміщень від теплових втрат, перехід на двотарифну оплату за електроенергію, в заміні ламп розжарювання на люмінесцентні та енергозберігаючі лампи, створенні та впровадженні інфрачервоних датчиків руху і присутності, використанні в ЖКГ частотно-регульованих приводів і багатьох інших напрямках. Вектор нашого сьогодення і майбутнього в розвитку і життєдіяльності людини лежить через енергозберігаючі технології [11].

Основні напрямки в енергозберігаючих технологіях можна поділити на кілька категорій: економія теплової енергії при виробництві, в транспорті і споживанні; економія електричної енергії; економія води при водозаборі, транспортуванні та споживанні; економія палива у виробництві електричної і теплової енергії; облік води, газу, тепла і електрики; енергоаудит, складання енергетичних паспортів, енергетичні обстеження, створення енергетичних паспортів; поновлювані джерела теплової та електричної енергії.

Досвід розвинених країн світу свідчить про скорочення споживання традиційних та перехід на альтернативні ресурси енергії. Важливим пріоритетом є підвищення ефективності енергозбереження у зв'язку з тим, що Україна належить до енергодефіцитних країн і за рахунок власних джерел задовольняє свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах менш ніж на 50%.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		18

Висновки

Отже, головною задачею роботи є розробка системи автоматичного регулювання, яка забезпечить необхідний рівень потужності в залежності від виробничого завдання на входи АД. Із наведеного аналізу і за умови фінансової доступності системи слідує, що реалізація поставленої мети можливе у випадку створення системи ступеневого способу управління електроприводом.

Найпростішою з точки зору реалізації та необхідного рівня енергоефективності, є двохступенева система, що у залежності від навантаження буде забезпечувати енергоефективне використання АД. Виходячи з досвіду та досліджень у сфері використання приводу електромеханічних систем з мало змінним рівнем навантаження, межу перемикання релейного регулятора слід встановити на рівні 60% від номінального навантаження АД. Таким чином, отримуємо два інтервали: 1-0,6 від номінального навантаження, при якому на двигун подається номінальна напруга, та нижче за 0,6 від номінального навантаження, за якого система встановлює напругу, що буде раціональною за встановленого навантаження[12].

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		19

Розділ 2.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Обґрунтування параметрів регулювання напруги

Принцип роботи енергоефективного регулятора полягає в регулюванні напруги живлення двигуна у залежності від зміни навантаження за одним із законів – мінімального струму статора або мінімальної потужності живлення. Для подальших кроків щодо синтезу регулятора, при кількох сталих значеннях навантаження асинхронного двигуна необхідно змінювати напругу безпосередньо на обмотках статора для отримання ряду потужностей АД.

Для визначення раціонального значення вихідної напруги у режимі перемикачів перетворювача скористаємось матеріалом джерела [13]. Так, для двигуна 4A132M8У3 встановленої потужності 5,5 кВт, номінальної швидкості обертання 750 об/хвил, напруги живлення 220 В отримано залежності рис.1, де P/P_n – потужність; $M_c/M_{сн}$ – навантаження; U_z – напруга завдання. З рисунку слідує, що за навантаження у 60 % номінального завдання на вході перетворювача становить 7,2 вольт.

Такі показники були отримані на основі даних зведеної таблиці лінії тренда і на її базі отримання математичної залежності за поліноміальним законом апроксимації

$$U_z = 0.028M_c^2 + 0.0868M_c + 5.8852 \quad (2.1)$$

коефіцієнт детермінації якої становить $R^2 = 0,9673$.

						Арк.
						20
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	

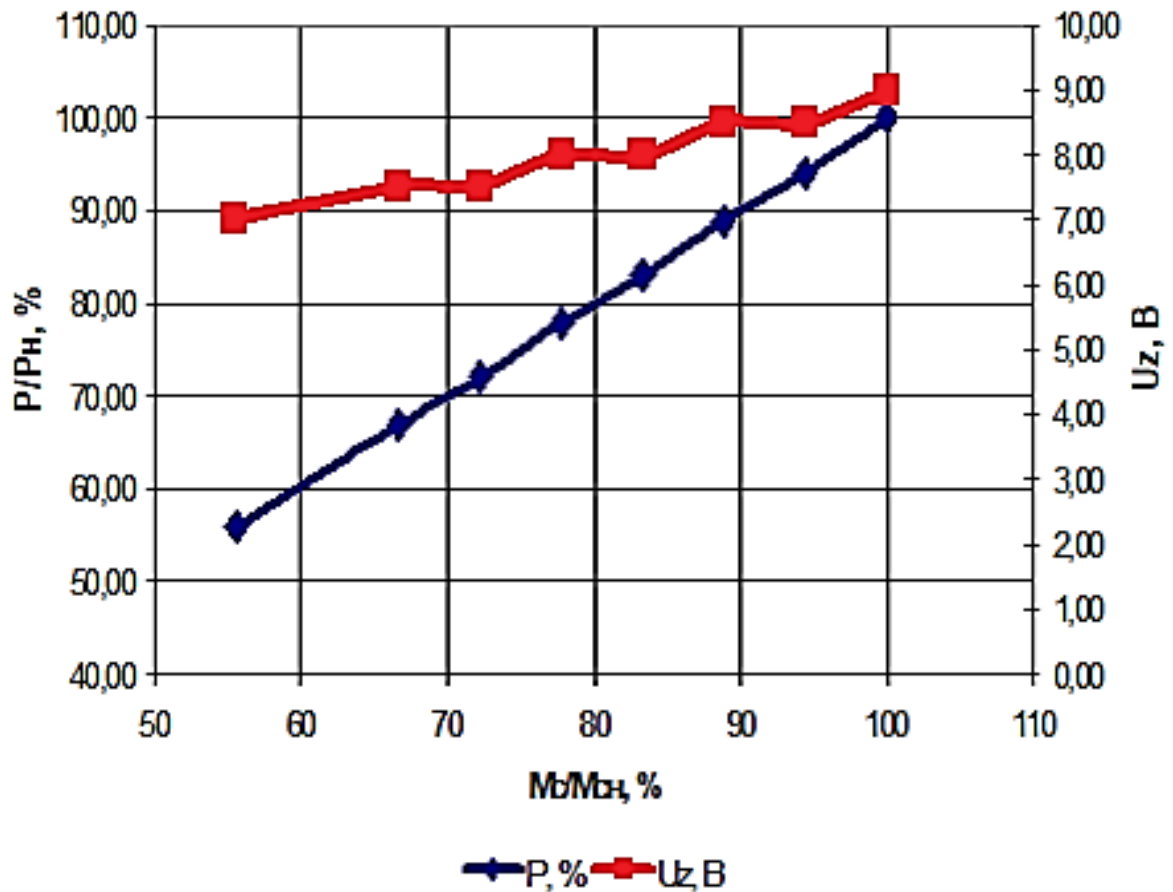


Рисунок 2.1. Визначення раціональної вихідної напруги перетворювача

Тобто, напруга перетворення, у цьому випадку, повинна становити 72 % вихідної номінальної, якщо прийняте максимальне вхідне значення напруги управління коливається у межах ± 10 вольт. Експериментальна перевірка працездатності запропонованої настройки динамічної моделі демонструє (рис.2.2) зниження активної потужності на 44 %, а реактивної на 49 %. На цій моделі зображені живильна поточна та номінальна потужності: **P, Pн** – активна; **Q, Qн** – реактивна; ω – кутова швидкість

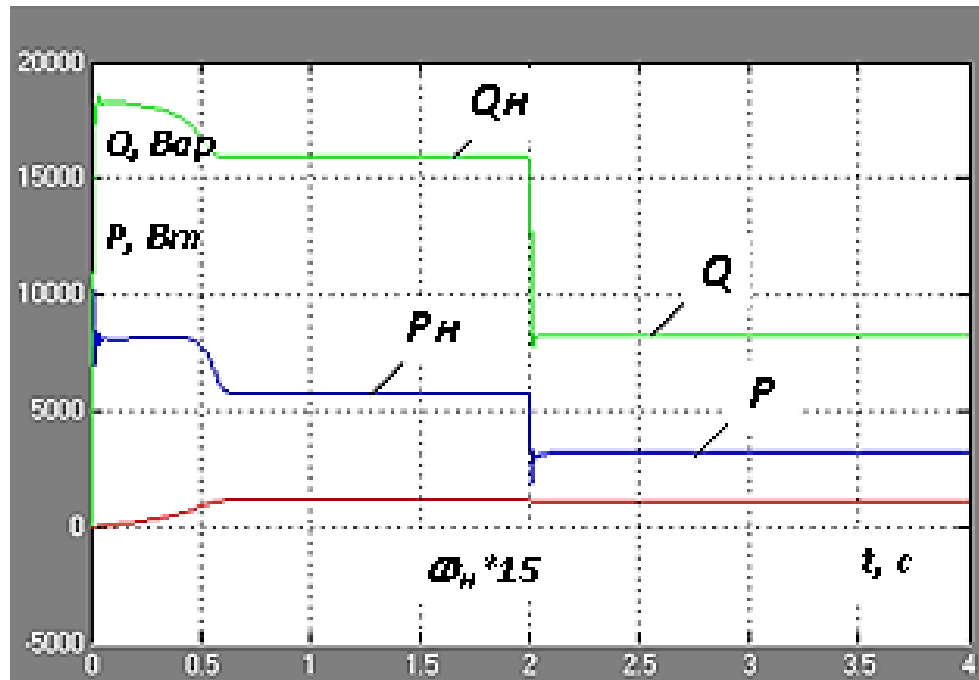


Рисунок 2.2. Графіки перехідних процесів пуску та сталого режимів

2.2. Розробка та побудова схеми перетворювача

За останні декілька років інтеграція силової електроніки і керуючих мікропроцесорних пристроїв перейшла на якісно новий рівень. Необхідний рівень підготовки фахівців обов'язково включає в себе ознайомлення з сучасними системами керування на базі мікропроцесорних систем та сучасної силової електроніки

Останнім часом розроблена значна кількість схем вмикання тиристорів, які дозволяють комутувати статорні кола асинхронного двигуна і регулювати на ньому напругу. За допомогою комутуючих та регулюючих тиристорних елементів (ТЕ) можна здійснити:

- пуск, реверс, гальмування асинхронного двигуна, а також обмеження струму, ривка або моменту, точну зупинку;
- безударне перемикання швидкостей багатошвидкісного двигуна;
- фіксоване зменшення або отримання низької стійкої "повзучої" швидкості; крокуючий або вібраційний режим;
- плавне регулювання швидкості, моменту та ін.

Як відомо суттєвим недоліком тиристорних регуляторів напруги із фазовим регулюванням є низький коефіцієнт потужності. На відміну від них, ШІМ перетворювачі мають кращі енергетичні показники, але їх суттєва конструктивна складність і відповідно висока вартість стримує розвиток цього напрямку систем електроприводу. Тому головною задачею роботи є розробка спрощеного схемного рішення ШІМ перетворювача задля регулювання енергоефективності приводу у залежності від падіння навантаження.

						Арк.
					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	23
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

Для пояснення структури і роботи схемного рішення скористаємось функціональною схемою рис.2.3, де ДПН – давач напруги мережі; БС – блоки синхронізації; БМС – блок модуляції сигналу; ПП – попередній підсилювач; R_n – навантаження; VT, VD – ключі та вентилі; ГРШ – генератор регульованої шпаруватості.

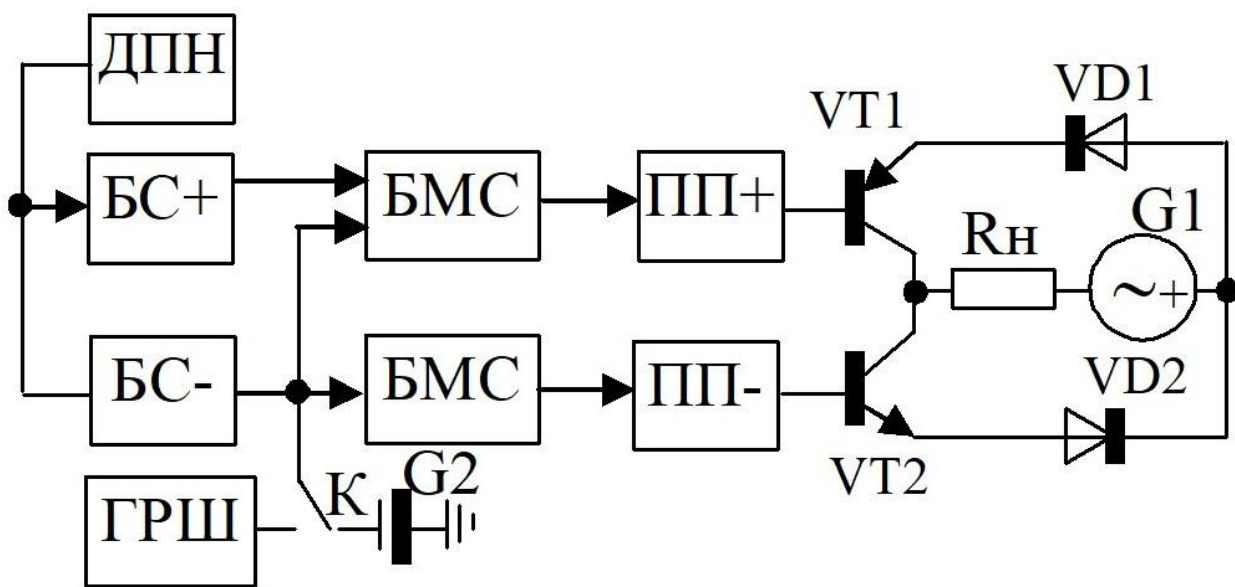


Рисунок 2.3. Функціональна схема ШІМ перетворювача напруги

Сигнал з давача напруги промислової мережі фіксується блоками синхронізації БС+ позитивної і БС- негативної напівхвилі та утримується у одиничному стані протягом усієї протяжності напівперіодів напруги живлення. Пульсуюча форма сигналів керування утворюється завдяки блокам модуляції БМС, виходи з яких відповідно подаються на попередні підсилювачі ПП+ та ПП- для утримування потужності керування до рівня достатнього для управління силовими ключами VT1, VT2. Завдяки неоднаковій провідності ключів VT1, VT2 та подачі керування у протифазі струм через навантаження R_n має синусоїдальну форму, а його регулювання здійснюється шляхом зміни шпаруватості генератора ГРШ.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	24

2.3. Визначення параметрів ланцюга компенсації навантаження

Попереднє випробування системи перетворення, вказаної в розділі 3.1, (рис.3.1) на активне навантаження дали досить хороші результати. Регулювання напруги вдалося здійснити плавно і у широкому діапазоні. У випадку роботи перетворювача на активно-реактивне навантаження, де у якості споживача обрано схему заміщення (рис.2.4) асинхронного двигуна 4A100L4У3 потужності 4 кВт швидкості обертання 1000 об/хвил і номінальної напруги живлення 220 вольт, виявило повну його непрацездатність, що фіксувалось у вигляді значних кидків напруги при кожному перемиканні силових ключів.

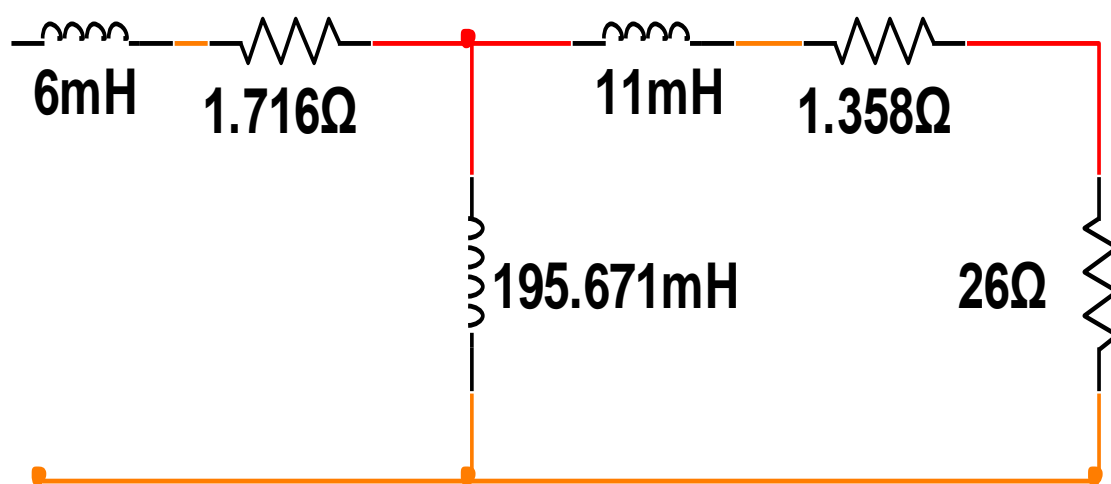


Рисунок 2.4. Схема заміщення АД 4A100L4У3 сталого режиму.

При цьому експеримент здійснювався для сталого режиму за номінального ковзання $s=0,05$, де опір ротору розраховано за рівнянням $r_2 \cdot (1-s)/s = 26 \text{ Ом}$. Зрозуміло, що аварійна робота перетворювача пов'язана з виникненням викидів енергії, яка накопичується на індуктивностях електричної машини. Окрім того, спотворення форми напруги в мережі живлення відбувається через те, що протягом напівперіоду опір навантаження змінюється

(різко падає при відкритті вентилів), в результаті чого зростає струм і збільшується падіння напруги на опорах джерела та мережі. Форма напруги стає несинусоїдальною, що особливо несприятливо для асинхронних двигунів.

Компенсувати наслідки такого стану роботи перетворювача пропонується завдяки RC ланцюгу, що приєднується у паралель до клем живлення схеми заміщення. Визначення параметру ланки компенсації пропонується за такою послідовністю:

згортання опору схеми заміщення у комплексному вигляді

$$Z_L = 20.826 + 12.047j, \text{ Ом}, \quad (2.2)$$

де $j = \sqrt{-1}$;

прирівнювання $x_L = x_C$ і визначення з цього рівняння ємності, де активний опір залишається на рівні 20,826 Ом. При такому розрахунку ємність компенсації дорівнює 228.5 мкФ на фазу двигуна.

- визначена ємність забезпечує коефіцієнт потужності рівний майже 1, що при змінах навантаження може призвести до перекомпенсації системи. Тому на цьому етапі будується залежність коефіцієнта потужності від величини компенсуючого конденсатора, ємність якого знижують від визначеної розрахункової до рівня мінімально прийнятої, де $\cos(\varphi) = 0,88$;
- далі за графіком залежності обирається мінімальна ємність конденсатора за раціонально обраного $\cos(\varphi)$.

						Арк.
					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	26
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

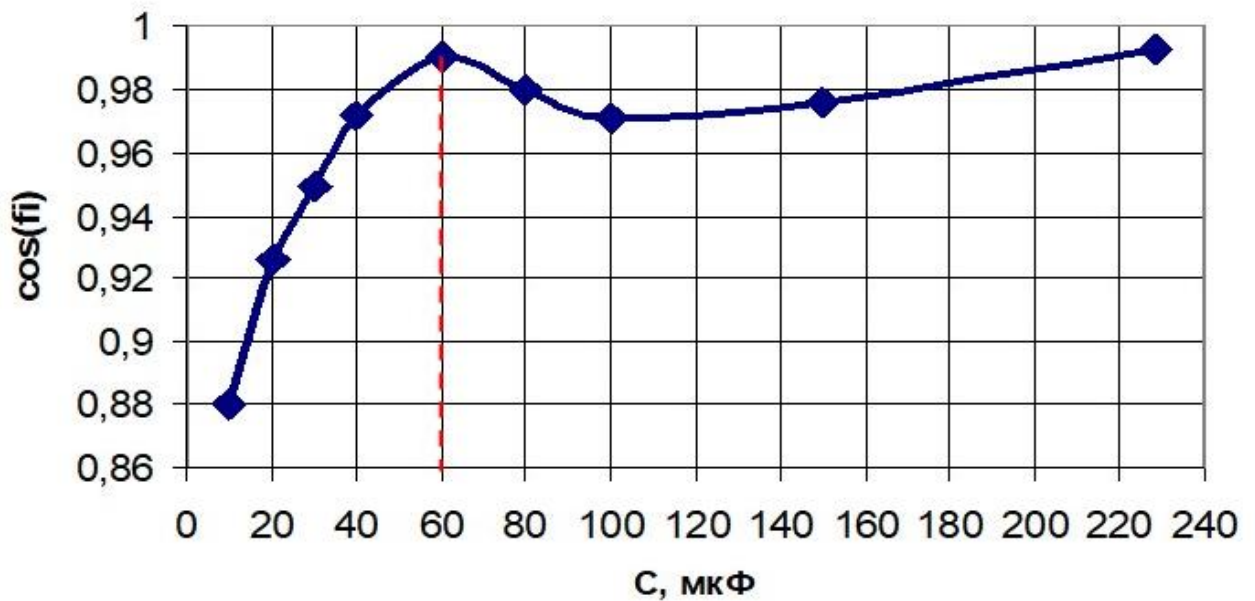


Рисунок 2.5. Експериментальна залежність до визначення раціональної ємності.

За запропонованим алгоритмом і з використанням схеми моделі рис.3.1 отримано залежність рис.6. Із неї раціональна ємність визначається такою, що дорівнює 60 мкФ. При перевірці роботи перетворювача можливо спостерігати, що у режимах номінальній рис.2.6, а) кидки напруги в моменти переходу з позитивного напівперіода у негативний мають допустимий рівень, а ефективний рис.2.6, б) широтно-імпульсна модуляція має вигляд майже такий, як і при роботі перетворювача на активне навантаження.

Отже, отримані форми залежностей рис.2.6 наглядно демонструє стійку роботу системи за умови надійної комутації силових ключів та підтримки $\cos(\varphi)$ системи на рівні не гіршого за 0,987.

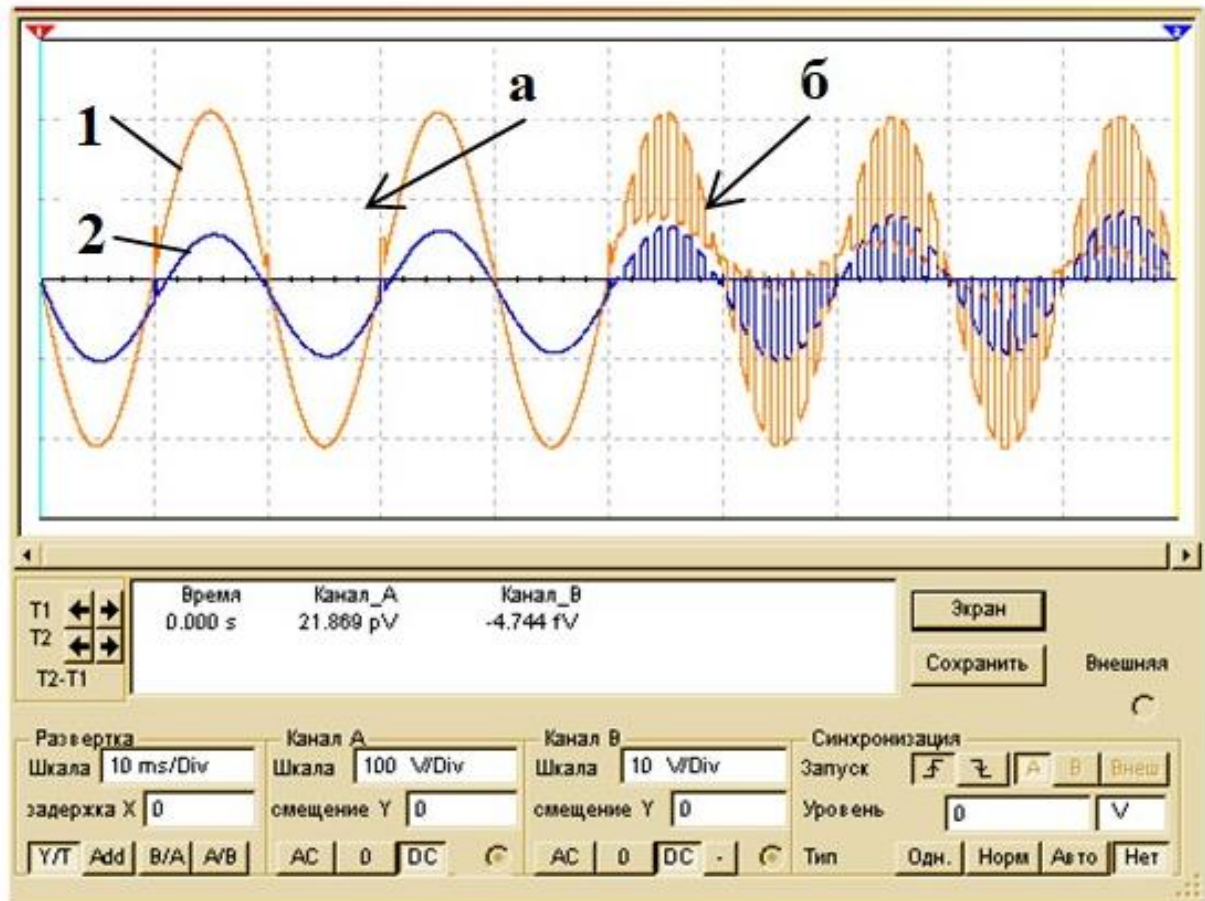


Рисунок 2.6 Експериментальна залежність роботи перетворювача на активно-індуктивне навантаження.

2.4. Реалізація системи засобами мікроконтролера

Існуючі методи базуються на створенні схеми системи імпульсно-фазового керування з використанням великої кількості дискретних елементів, що ускладнює виготовлення блоку управління, та забезпечує низький рівень ремонтпридатності. Це, в свою чергу, підвищує витрати на обслуговування, ремонт та заміну блоку управління, що не вписується в принцип мінімізації фінансових витрат.

Для вирішення питання, що поставлене і за умови доступності пропонуються замінити існуючу схеми з дискретною елементною реалізацією на частково або повністю мікроконтролерну схему з подальшою розробкою алгоритму виконання необхідних функцій.

При аналізуванні ринку мікроконтролерів, були виявлені такі, що задовольняють усім потребам задачі, а саме мінімальна необхідна кількість I/O портів, мінімальна швидкодія, розрядність та ін.:

- PIC(*peripheral interface controller*) – Незважаючи на невибагливість щодо умов використання та невисоку вартість мають малу кількість портів та використовуються у випадку специфічної перефінансування;
- AVR(*Advanced Virtual RISC*) – повністю задовольняє заданих умов та мають широко розповсюджену архітектуру (Arduino) та велику кількість різних користувацьких модифікацій з широким функціоналом;
- ARM Cortex(*Advanced RISC Machine*) – один з найпрогресивніших представників RISC з широким функціоналом та розвиненою архітектурою програмування, що підтримується компаніями Apple, Nvidia, Broadcov,

						Арк.
					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	29
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

Samsung, має поліпшений теплообмін, але відносно дорогий та складний у використанні.

Таким чином, спираючись на співвідношення ціна/функціонал та загальний досвід реалізації проектів з використанням мікроконтролерів, доцільним є використання AVR, як мінімально необхідний варіант реалізації схеми.

Основний алгоритм мікроконтролера при запропонованому схемному рішенні із заміщенням частини елементів буде виконувати ті ж самі функції, що і блоки 1, 2, 4 8 на схемі 3.1 приведеній в наступному розділі, а саме блок синхронізації, блок модуляції, що накладає імпульси прямокутної форми з регульованою шпаруватістю на імпульси синхронізації що дозволяє реалізовувати широтно-імпульсну модуляцію, генератор регульованої шпаруватості та релейний регулятор, що реалізується, як перемикач у схемі, але буде грати важливу роль в програмованому мікроконтролері.

Крокова діаграма програмного забезпечення приведена на рис. 2.7.

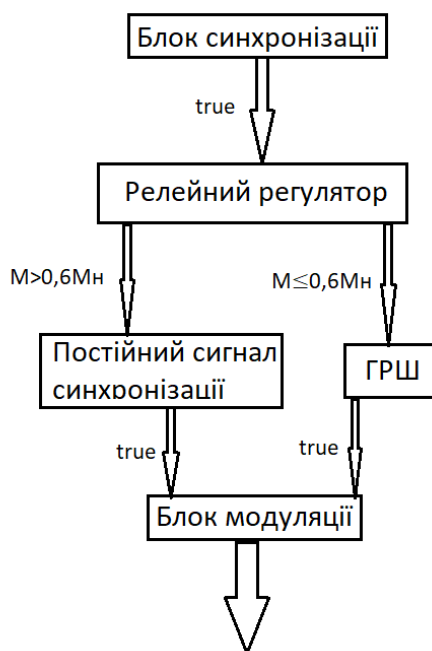


Рисунок 2.7. Крокова діаграма виконання програми для заміщення блоків схеми.

Програма реалізована шляхом постійного виконання в формі циклу з заданою малою частотою, по принципу ПЛК програмування. Блок синхронізації виконує ті самі функції, що і у схемі, а також передає дозвіл на релейний регулятор для кожної півхвилі окремо. Релейний регулятор в свою чергу порівнює отримане значення моменту з попередньо внесеним значенням номінального моменту і в залежності від отриманого результату надсилає сигнал в один з двох блоків – в блок постійного сигналу синхронізації, що буде підтримувати постійний дозвіл на відкриття, при якому силовий блок буде відкритий на протязі усєї півхвилі, або в блок генератора регульованої шпаруватості, який буде створювати необхідну форму попередньо розрахованого сигналу. Наступним кроком один з цих блоків передає сигнал на блок модуляції, що, в свою чергу через операційні підсилювачі буде керувати силовою частиною.

В реалізації такого алгоритму будуть використані наступні вводи/виводи

Табл. 2.1 – перелік сигнальних вводів та виводів алгоритму

№	Тип	Функція
1	I	Сигнал для порівняння моменту з номінальним.
2	I	Сигнал наявної напівхвилі для роботи блоку синхронізації
3	Q	Сигнал блоку модуляції, що прямує до операційних підсилювачів

Окрім сигналів, слід також враховувати живлення, та «нуль», які приходять на контролер для його функціонування та інші «технічні» з'єднання.

Висновки

Раціонального значення напруги живлення при роботі в енергоефективному режимі при переході через позначку в 60% від номінального моменту навантаження на прикладі двигуна 4A132M8Y3 було експериментально визначено, як 7,2 В, тобто напруга перетворення становить 72 % вихідної номінальної, за умови, що максимальне вхідне значення напруги управління коливається у межах ± 10 вольт. Результати віртуального моделювання динамічної моделі демонструє (рис.2.2) зниження активної потужності на 44 %, а реактивної на 49 %.

Розроблено спрощене схемне рішення ШІМ перетворювача задля регулювання енергоефективності приводу у залежності від падіння навантаження та зменшення капітальних витрат на модернізацію. Наведена функціональна схема та надано пояснення структури і роботи схемного рішення

Проведено попереднє випробування системи перетворення, вказаної в розділі 3.1, наведений спосіб позбавлення від значних кидків напруги при кожному перемиканні силових ключів за рахунок точного розрахунку параметрів ланцюга компенсації навантаження.

Розглянута можливість заміни значної кількості дискретних елементів мікроконтролером, визначені мінімальні необхідні параметри та виконано підбір оптимального існуючого рішення за поставлених умов для досягнення умов .

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		32

Розділ 3.

Дослідницька частина

3.1 Реалізація ступеневого регулювання та формування рекомендацій

У нашому випадку, за ступеневого регулювання, шпаруватість одноразово налагоджується до початку роботи приводу на напругу, що визначена у підпункті 2.1, а далі користуючись релейним регулятором К здійснюють перемикання номінального режиму в положення приєднано до G2 або енергоефективного приєднано до ГРШ. Принципова схема системи імпульсно-фазового керування реалізована засобами електронної лабораторії National Instruments складової Multisim [14] зображена на рис. 3.1. Показана схема вміщує один канал. Повний комплект у трифазному виконанні таких каналів повинен мати три, а їх синхронізація мусить здійснюватись за кожною фазою окремо.

Моделювання електричного кола в пакеті Multisim складається з двох етапів. На першому етапі відбувається креслення досліджуваної схеми на робочому полі і підключення до неї вимірювальних приладів. На другому - запуск схеми та зняття необхідних результатів. Для креслення схеми використовуються компоненти з відповідних бібліотек, номінали яких можуть бути задані користувачем. При запуску схеми починається відлік часу роботи схеми і відбувається віртуальне моделювання її роботи.

Рекомендації, щодо необхідних для коректного функціонування схеми умов, надані в підпункті 2.3.

						Арк.
						33
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	

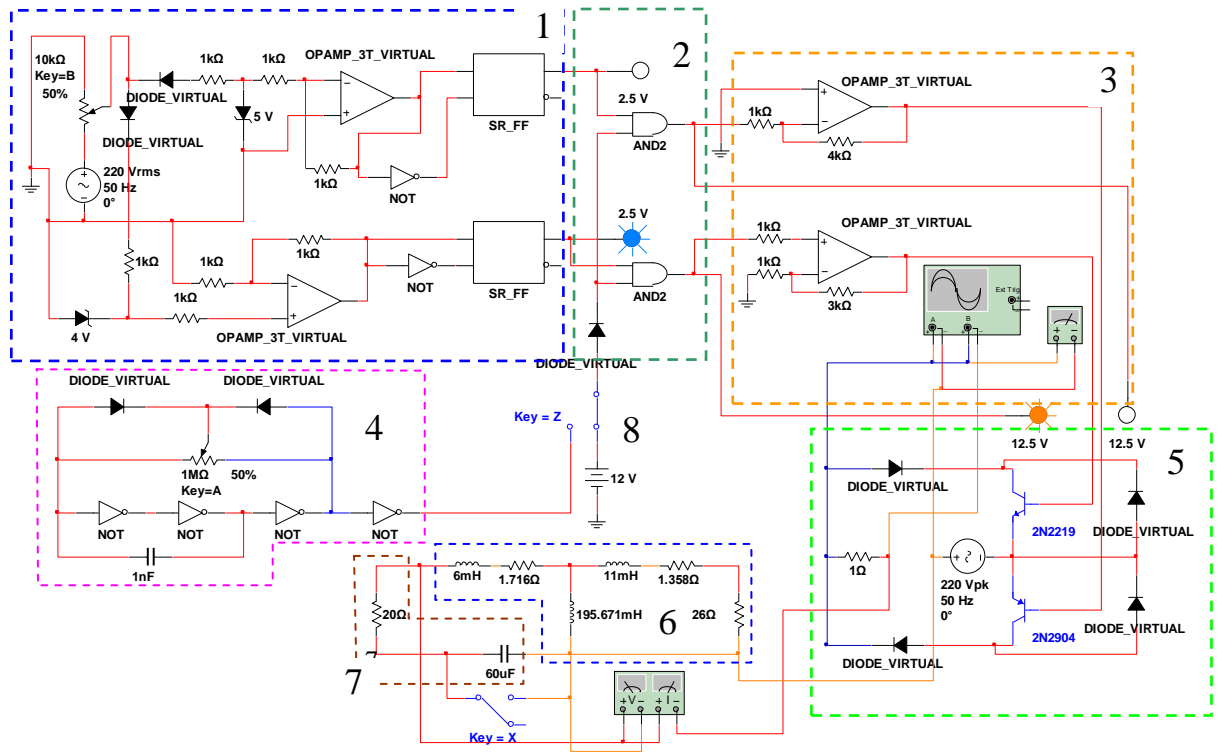


Рисунок 3.1. Модель ШІМ системи ступеневого керування енергоефективністю АД.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На рис. 3.1 модель розбита на блоки для кращого розуміння принципу її роботи, де **1** – блок синхронізації ; **2** – блок модуляції, що накладає імпульси прямокутної форми з регульованою шпаруватістю на імпульси синхронізації; **3** – попередні підсилювачі; **4** – генератор регульованої шпаруватості; **5** – силовий блок; **6** – навантаження; **7** – ланцюг компенсації; **8** – релейний регулятор.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

3.2 Реалізація плавного регулювання та оформлення рекомендацій

Проробка питання щодо більш точного відпрацювання регулювання енергоефективності асинхронного електропривода показала, що плавне управління має переваги, хоча у цьому випадку слід погодитись на складність, меншу надійність, а саме головне підвищену початкову вартість перетворювача. Тому для промисловців, які згодні йти на такі умови може бути запропонована система із координатно-фазовим регулюванням шпаруватості [15] і додатковим індивідуальним фільтро-компенсуючим пристроєм, що розроблений у цій роботі. Схемне рішення, що реалізує таку систему приведене на рис.3.2, а його завершеність буде за наявності в системі нелінійного регулятора корекції ефективності [13] в залежності від навантаження.

Результуючі залежності рис.3.3 випробування схеми рис.3.2 не відрізняються від залежностей, які показані на рис.3.1, що дає підстави стверджувати - система плавного керування працює також стійко і без проблем комутації із безперервною компенсацією реактивної потужності. При цьому коефіцієнт потужності в обох випадках залишається на рівні не гірше 0,987

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		36

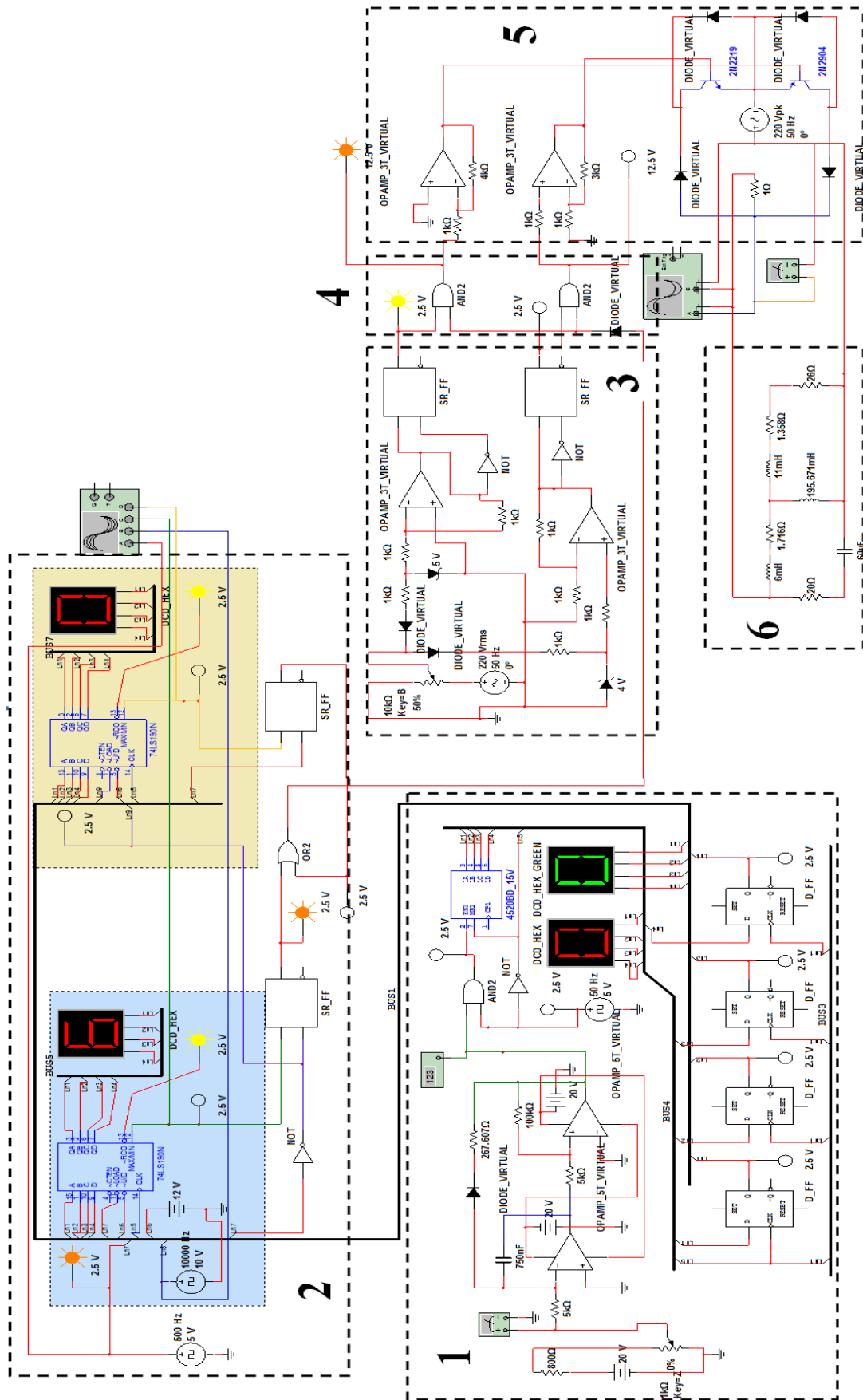


Рисунок 3.2. Модель перетворювача з плавним регулюванням

Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата
-----	-----	----------	--------	------

На рис. 3.1 модель розбита на блоки для кращого розуміння принципу її роботи, де 1 - АЦП; 2 – фазові таймери; 3 – блок мережної синхронізації; 4 – модулятори; 5 – силовий блок; 6 - навантаження

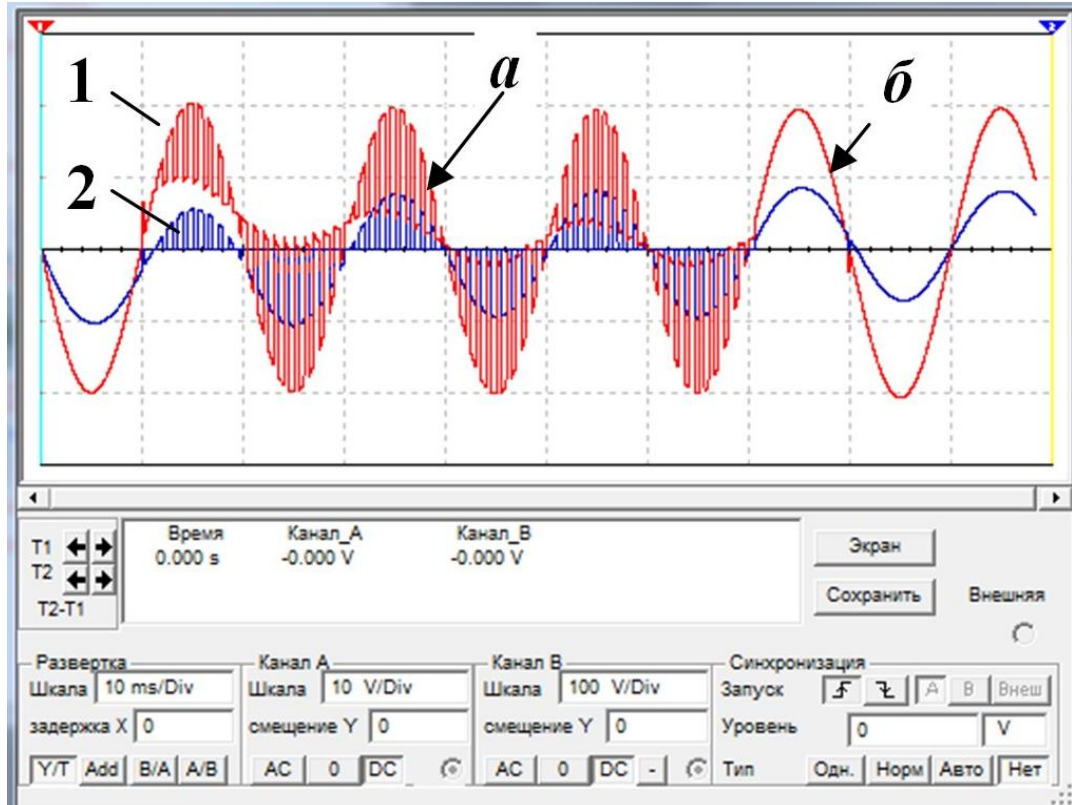


Рисунок 3.3. Результати моделювання за плавного регулювання.

На рис. 3.3 зображені характеристики, отримані за допомогою вбудованих в математичну модель вимірювальних приладів. Цифрою **1** на ньому позначена напруга з масштабом 100В/ділення, цифрою **2** – струм з масштабом 10А/ділення, а літерами **а** і **б** позначені ділянки режиму регулювання та номінального режиму роботи відповідно.

Висновки

Третій розділ присвячений проектуванню та моделюванню схем та формуванню рекомендацій щодо сприятливих умов для їх роботи.

Створені моделі широтно-імпульсної модуляції системи ступеневого керування енергоефективністю асинхронного двигуна та перетворювача з плавним пуском та експериментально перевірені їх характеристики при симуляції робочих умов. Для зручного використання схеми розбиті на функціональні блоки, що можуть бути підлагоджені незалежно одне від одного.

Експериментально встановлено, характеристики, отримані за умов використання запропонованих моделей майже не відрізняються від нормальної синусоїди. Під час випробувань, отримана система показала значне зменшення динаміки, відносно нерегульованої, що позитивно відобразиться на механічних елементах кріплення валу, підшипниках тощо.

Обидві системи показали високу стійкість за умови поліпшених умов комутації силових ключів, безперервною компенсацією реактивної потужності, та отримання коефіцієнта потужності рівня не гірше за 0,987.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		39

Розділ 4.

4.1. Техніко-економічне обґрунтування

У середньому, за даними джерела [2], близько 20% собівартості продукції складає закладена у неї вартість електричної енергії. Для забезпечення найліпшої економії електроенергії, зменшення собівартості продукції та підвищення прибутку підприємства, питання енергоефективності повинно вирішуватися комплексно.

У кваліфікаційній роботі пропонується лише один з кроків щодо енергозбереження, а саме розробка системи підтримки раціональної енергоефективності асинхронного електропривода механізмів тривалого режиму роботи, не потребуючих стабілізації швидкості (наприклад насосно-вентиляційних установок).

На сьогоднішній день частка механізмів з використанням нерегульованого електроприводу все ще досить велика. Навіть у великих виробничих комплексах все ще використовуються асинхронні двигуни з прямим пуском, а саме у вентиляційних установках (паро- та димовідсмоктувачах, наприклад), а рідше в насосних установках (пожежні системи, системи постачання технічної води для систем охолодження, та ін.), котрі працюють у довготривалих або постійних режимах. Використання перетворювачів частоти не є економічно доцільним через те що вартість таких пристроїв є досить великою, але використання функціоналу буде розкритим бодай на 10 відсотків від закладених в нього можливостей, В той самий час, використання приладів плавного пуску для запобігання пікових навантажень та стрибків току в момент пуску асинхронного двигуна ніяким чином не впливає на витрати електроенергії в процесі роботи механізму.

						ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			40

Використання запропонованого у роботі енергоефективного регулятора, котрий базується на законах мінімального струму статора, або мінімальної напруги живлення, у такому випадку виходить на перший план.

Основний принцип запропонованого методу полягає в розробці регулятора, котрий дозволить асинхронному двигуну забезпечити рух, з задовільними динамічними характеристиками, при мінімально можливій напрузі живлення, а отже раціонально споживати електроенергію залежно від рівня навантажень. Істотною перевагою такого підходу є те, що електрична схема не буде істотно змінена, так як ефект досягається зміною керуючої ланки існуючої системи.

Передбачається, що вартість спожитої електроенергії при залученні керованого живлення, порівняно з традиційними способами, повинна зменшитись майже наполовину.

Для обґрунтування економічної доцільності запропонованого в кваліфікаційній роботі науково-технічного рішення, пропонується розрахувати річну економію електроенергії при залученні класичної та модернізованої системи керування досліджуваного асинхронного двигуна.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		41

4.2. Визначення річної економії від впровадження науково-технічного рішення

Беручи до уваги графіки дослідження системи керування (рис.2.2) та експериментальні дані джерела[13], важко не помітити значну економію електроенергії, особливо на ділянці малих навантажень.

Табл.4.1– Залежність потужності живлення від прикладеного навантаження.

Мс, Нм	Qt, кВАР	Pt, кВ	St, кВА	Q, кВАР	P, кВ	S, кВА
5	4,99	5,3	7,28	2,44	2,9	3,79
6	4,99	5,3	7,28	2,72	3,45	4,39
7	4,99	5,4	7,35	3	4	5
8	4,99	5,4	7,35	3,4	4,47	5,62
9	4,99	5,5	7,43	4	5	6,4

Для демонстрації різниці між класичною та модернізованою, буде доцільно розрахувати вартість електроенергії для всіх рівнів навантаження за формулами:

$$C_e = W_p \cdot C_e, (\text{грн.}) \quad (4.1)$$

де C_e – тариф на електроенергію; W_p – кількість спожитої за рік електроенергії

$$W_p = \sqrt{P^2 + Q^2} \cdot T_p, (\text{кВт} \cdot \text{год}) \quad (4.2)$$

Де P – активна потужність двигуна, Q – реактивна потужність двигуна, T_p – час, який двигун відпрацьовує протягом року.

В таблицях 4.2 та 4.3 можна побачити річні витрати електроенергії, та їх фінансовий еквівалент відповідно.

Табл.4.2 – Річне споживання електроенергії двигуном

Мс, Нм	W _p , кВт·год	W _{рм} , кВт·год
5	14559	7580
6	14559	8786
7	14705	10000
8	14705	11232
9	14853	12806

Табл.4.3 – Річне витрати на електроенергію

Мс, Нм	С _e , грн	С _{ем} , грн
5	18635,52	9702,4
6	18635,52	11246,08
7	18822,4	12800
8	18822,4	14376,96
9	19011,84	16391,68

Вартість спожитої за рік електроенергії розрахована враховуючи середньодобову вартість електроенергії для промислових підприємств на 3 квартал 2020 року, а саме 1,28 грн/кВт·год. В залежності від навантаження та мережі, попит та коректність прогнозування, ціна на кВт може змінюватися від 0,38 грн/кВт·год. до 2, 42 грн/кВт·год.

Припускаючи, що один і той же двигун вентиляційної установки працює по 8 годин на день протягом робочого дня, з понеділка по п'ятницю протягом календарного року з урахуванням свят, можна порівняти споживання електроенергії для звичайної та модернізованої схеми управління.

									Арк.
									43
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ				

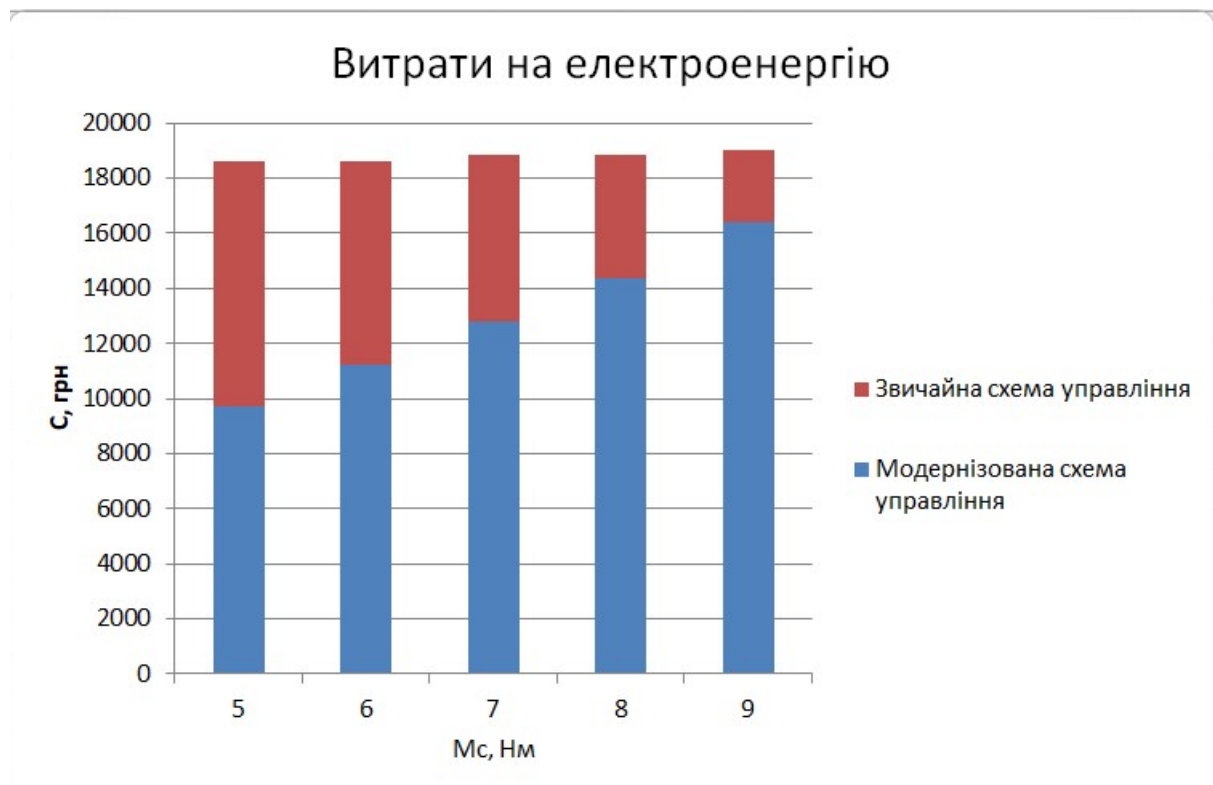


Рис.4.1 – Витрати на електроенергію при звичайній та модернізованій схемі управління асинхронного приводу

Графік 4.1 демонструє різницю споживання електроенергії при використанні енергоефективного регулятора. В залежності від навантаження 5-9 Нм економія електроенергії складає:

Табл.4.4 – Економія електроенергії при різних рівнях навантаження

Мс, Нм	5	6	7	8	9
%	47,94	39,65	32	23,62	13,78
Грн	8933,12	7389,44	6022,4	4445,44	2620,16

Висновки

Продемонстровані у попередньому розділі розрахунки показують, що запропонований регулятор дозволить значно зменшити витрати електроенергії для механізмів мало змінного графіку роботи тривалої дії без необхідності регулювання швидкості. Експериментальне моделювання електромеханічної системи в середовищах Multisim та Mathcad продемонстрували зниження активної та реактивної споживаних потужностей на 44% і 49% відповідно, що значно впливає на вартість спожитої за рік електроенергії, навіть для досліджуваного малопотужного асинхронного двигуна.

Аналізуючи розрахунки і графіки приведені в джерелі, при зниженні напруги живлення асинхронного двигуна до 60%, для різних рівнів навантаження, досягається значна економія коштів за рахунок зменшення витрат електроенергії на етапі транспортування та перетворення. Так, річна вартість спожитої електроенергії двигуном з потужністю 5.5кВт може бути меншою майже в два рази, а саме 18635,52 грн. і 9702,4 грн. для звичайного та енергоефективного способів управління відповідно, за умови мінімального навантаження.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		45

Загальні висновки

Сучасне питання ефективності АД привода – актуальна і важлива сфера для дослідницької діяльності. Один з її напрямів – контроль подачі енергії, і підтримка її на енергоефективному рівні, що не перевищує необхідної для подолання поточного навантаження. В комплексі з використанням енергоефективних двигунів, компенсацією реактивної потужності фільтро-компенсуючими пристроями та застосування перетворювачів із високим коефіцієнтом потужності це може призвести до значної економії енергії.

В той самий час ступенева система керування перетворювача забезпечує простоту системи перетворення напруги мережі та невисокі капітальні витрати, а достатній коефіцієнт потужності забезпечується системою з широтно-імпульсною модуляцією мережної напруги.

Наріжний принцип розробки - низькі капітальні вкладення, які здійсненні за умови простоти схемного рішення систем перетворення мережної напруги. Реалізація цього можлива у випадку ступеневої системи керування перетворювача.

За сучасного розвитку перетворювальної техніки достатній коефіцієнт потужності забезпечує саме система з широтно-імпульсною модуляцією мережної напруги.

Номінальним інтервалом варіювання навантаження слід вважати від 1...0,6 номінального, що відповідає Європейському досвіду. А межа менше за 60 % номінального навантаження є прийнятною для перемикання перетворювача у режим енергозбереження. При цьому найкраща енергоефективність двигуна досягається за вихідної напруги перетворювача в 72 % номінального.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		46

Визначення параметрів ланцюга компенсації слід здійснювати у послідовності:

- згортання опору схеми заміщення двигуна;

визначення ємності конденсатора із реактивної складової згорнутого опору схеми заміщення, а активну складову при цьому залишають незмінною;

будують залежність коефіцієнта потужності системи від ємності конденсатора за даними експерименту, де варіювання останньої здійснюється у межах від розрахункової до мінімально прийнятої за $\cos(\varphi) = 0,88$;

з графіку залежності встановлюють раціональну ємність RC ланцюга, яка відповідає обраному $\cos(\varphi)$.

Експериментальним чином доведено стійкість обох систем керування за кращих умов комутації силових ключів та отримання коефіцієнта потужності рівня не гірше за 0,987.

						ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			47

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Барский, В.А. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины [Текст] / В.А. Барский, А.С. Бешта, Н.В. Горбачов и др. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков: Наук. 2013. – №9 (115). – С. 2-11
- [2] Клепиков В.Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине / В.Б. Клепиков, В.Ю. Розов // Вестник НТУ «ХПИ»: Тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 18–21.
- [3] Бешта О.С., Півняк Г.Г. та ін. Економічні й екологічні аспекти комплексної генерації та утилізації енергії в умовах урбанізованих територій. Монографія. / О.С.Бешта, Г.Г. Півняк та ін. – Дніпропетровськ, НГУ, 2013. – 220 с.
- [4] Мугалимов Р.Г. Моделирование показателей энергоэффективности вариантов электроприводов промышленных установок на основе применения традиционных и компенсированных асинхронных двигателей / Р.Г. Мугалимов, А.Р. Мугалимова – Магнитогорск: Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – № 2 (34). – 2011. – С. 59-64.
- [5] Стратегия энергосбережения в Украине: аналитически-справочные материалы в 2-х томах. Общие основы энергосбережения / за ред. В.А. Жовтнянського, М.М. Куліка, Б.С. Стогнія – К.: Академперіодіка, 2006. – Т. 1. – 510 с.
- [6] Козярук А.Е. Метод и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронным электроприводом / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Вестник

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		48

ЮУРГУ. Сер. «Енергетика». – 2015. – Т.15, №1. – С. 47-53.
DOI: 10.14529 / power 150106.

- [7] Vasilev B. Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons / B. Vasilev // Electrotechnic and computer systems. – 2014. – № 15(91). – P. 220-223..
- [8] Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 256 с
- [9] Горбунов Р.Л. Исследование трехфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей / Р.Л. Горбунов, Посконный Г.И. // Известия Томского политехнического университета Т. 324. № 4. – 2014. – С. 76-86.
- [10] Іпполітова І.Я. Теоретичні основи управління ресурсозбереженням на підприємстві // Економіка промисловості: Зб. наук.пр./ Lviv Polytechnic National University Institutional Repository <http://ena.lp.edu.ua> 678 НАН України ІЕП. – Донецьк.– 2004. – С.303–314
- [11] Дероган Д.В., Щокін А.Р. Перспективи використання енергії та палива в Україні з нетрадиційних та відновлюваних джерел.//Бюл. "Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії", Київ: АТ "Укренергозбереження", 2009.- №2. – С.30-38. 3. Руденко В.П. Природно-ресурсний потенціал України // Економіка України. – Київ: Либідь, 2004. – №1. – С.63-64.

						ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			49

- [12] Бородай В.А., Ковальов О.Р., Нестерова О.Ю. Система комбінованого регулювання енергоефективності асинхронного приводу //ISSN 2521-6244
- [13] Бородай В.А. Спосіб синтезу регулятора енергоефективного управління асинхронним приводом механізмів без прямої стабілізації швидкості / В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова // Електротехніка та електроенергетика – Запоріжжя: – № 3. – 2019. – С. 16-23. DOI 10.15588/1607-6761-2019-3-2
- [14] Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст] / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург : КОРОНА принт, 2007. – 320 с.
- [15] Бородай В.А. Широтно-импульсный регулятор с координатно-фазовым управлением скважности /В.А. Бородай, А.Р. Ковалев // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 95. – С 54 – 58.
- [16] Бородай В.А. Energy efficient control regulator development for the asynchronous motor with long-term operating modes using the microcontroller //Бородай В.А., Рубан Д.С// Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources - petroșani - romania – 26.10.2020 – С. 44-45.

					ЕП.ПД. 18.14.Р.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		50

Розрахунок параметрів моделі системи ПЧ-АД

Вихідні дані

Тип двигуна 4A132M8УЗ

$P_H \equiv 5500$	Активна потужність, Вт
$U_H \equiv 220$	Номинальна напруга живлення, В
$n \equiv 750$	Частота обертання валу двигуна, об/хвил
$J \equiv 0.057$	Момент інерції, Нм ²
$\eta \equiv 0.83$	Коефіцієнт корисної дії вигуна
$\cos\phi_H \equiv 0.74$	Коефіцієнт потужності
$s_H \equiv 0.041$	Номинальне ковзання
$f_1 \equiv 50$	Частота мережі живлення, Гц
$\lambda \equiv 2.2$	Перегрузочная способность
$i \equiv 144$	Передатне число редуктора
$n_{\text{мех}} \equiv 5$	Частота обертання валу механізму, об/хвил
$P_0 \equiv 3450$	Активна потужність на валу механізму, Вт
$\eta_p \equiv 0.97$	Коефіцієнт корисної дії редуктора

Параметри схеми заміщення двигуна

$r_1 \equiv 0.07$	Активний та реактивний опір фази статора, в.о.
$x_1 \equiv 0.11$	
$r_2 \equiv 0.061$	Активний та реактивний опір фази ротора, в.о.
$x_2 \equiv 0.19$	
$X_\mu \equiv 1.8$	Реактивний опір ланцюга намагнічування, в.о.

Визначення базових величин

$$I_H \equiv \frac{P_H}{3 \cdot U_H \cdot \eta \cdot \cos \phi_H} \quad I_H = 13.568 \quad \text{Базовий струм, А}$$

$$Z \equiv \frac{U_H}{I_H} \quad Z = 16.215 \quad \text{Базовий опір, Ом}$$

$$M_H \equiv \frac{9.55 \cdot P_H}{n \cdot (1 - s_H)} \quad M_H = 73.027 \quad \text{Базовий момент, Нм}$$

$$p_H \equiv \frac{60 \cdot f_1}{n} \quad p_H = 4 \quad \text{Кількість пар полюсів}$$

$$\omega_H \equiv \frac{\pi \cdot n}{30} \quad \omega_H = 78.54 \quad \text{номінальна кутова швидкість, с-1}$$

Визначення реальних опорів схеми заміщення

$$R_1 \equiv r_1 \cdot Z \quad R_1 = 1.135$$

$$X_1 \equiv x_1 \cdot Z \quad X_1 = 1.784 \quad \text{Активний та реактивний опір фази статора, Ом.}$$

$$R_2 \equiv r_2 \cdot Z \quad R_2 = 0.989$$

$$\text{Активний та реактивний опір фази ротора, Ом.}$$

$$X_2 \equiv x_2 \cdot Z \quad X_2 = 3.081$$

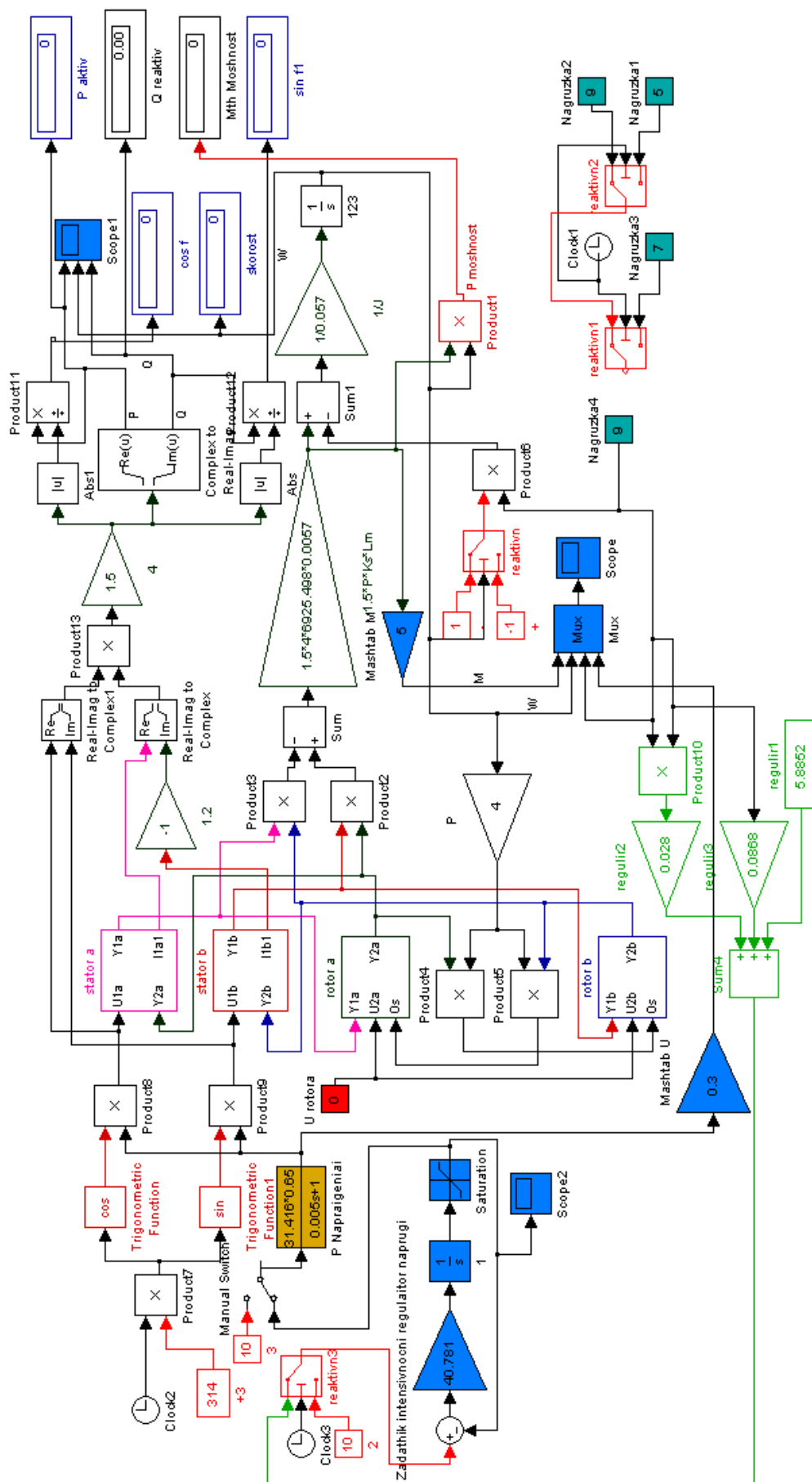
Визначення параметрів обмоток двигуна

$$L_1 \equiv \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_H \cdot p_H} \quad L_1 = 0.011 \quad \text{Індуктивність фази статора, Гн.}$$

$$L_2 \equiv \frac{X_2 + X_\mu}{\omega_H \cdot p_H} \quad L_2 = 0.016 \quad \text{Індуктивність фази ротора, Гн.}$$

$$L_m \equiv \frac{X_\mu}{\omega_H \cdot p_H} \quad L_m = \quad \text{Взаємна індуктивність фази статора і ротора, Гн.}$$

$$k_\sigma \equiv \frac{1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \quad k_\sigma = 6925.4977598 \quad \text{Допоміжний коефіцієнт, 1/Гн}^2$$

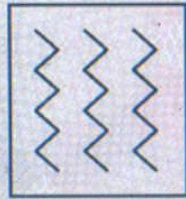


Matlab модель системи енергоефективного керування електроприводом

Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата
-----	-----	----------	--------	------

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

National University of Water and Environmental Engineering



This certificate is presented to

DENYS RUBAN

STEEL PLANT «DNIPROSTEEL», UKRAINE
for attending

the International Scientific Conference "Innovative Development of Resource-Saving Technologies and Sustainable use of Natural Resources"

Petroșani, Romania on October 26, 2020

1948



UNIVERSITATEA DIN

PETROȘANI

Rector National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine
DrSc (Agricultural), Professor

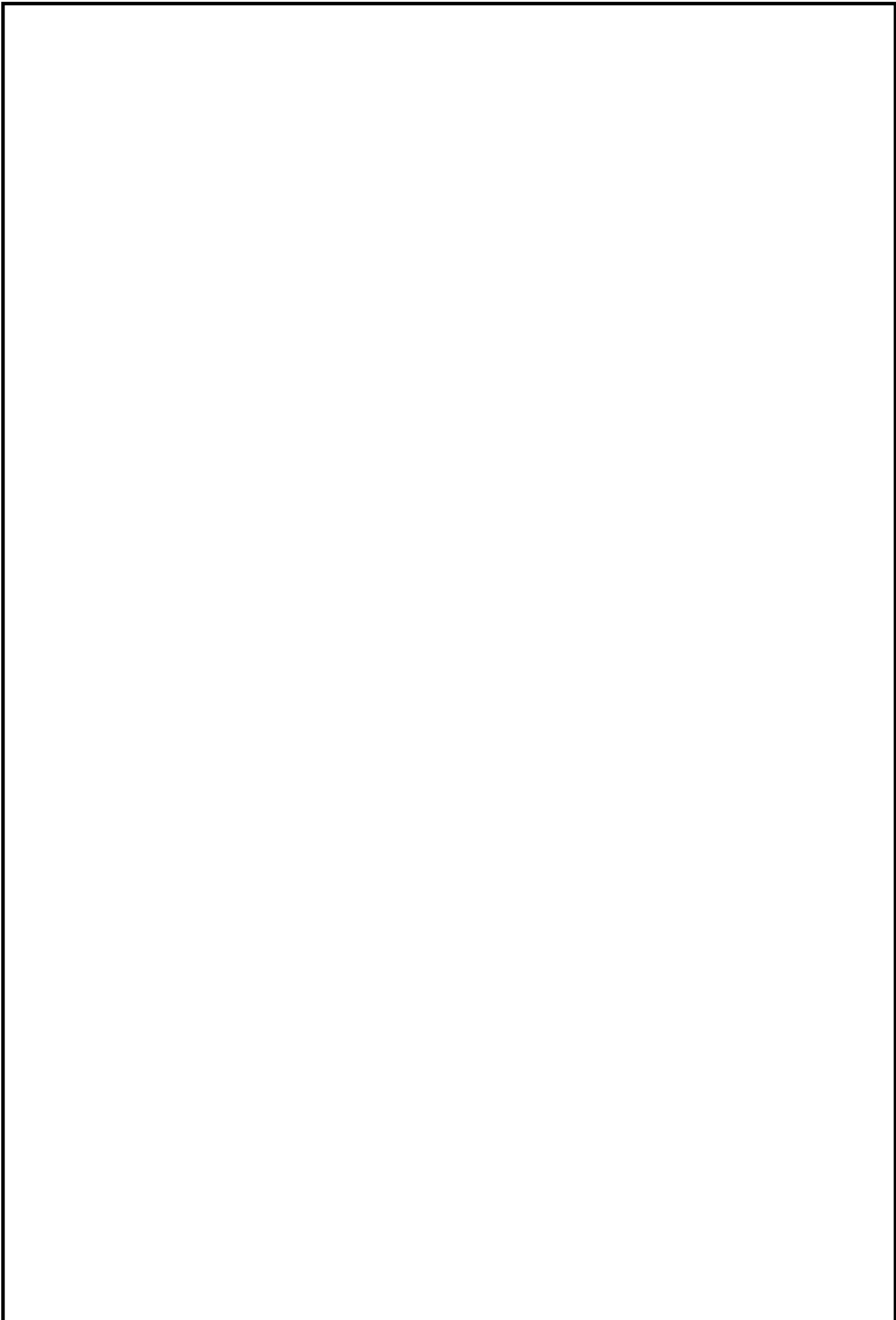
Victor MOSHYNSKYI



Rector University of Petroșani,
Romania
Ph.D., Professor

Sorin-Mihai RADU

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



					ЕП.ПД. 18.14.Д.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55



					ЕП.ПД. 18.14.Д.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56