

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ТИРИСТОРНОГО
РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

Виконав:

здобувач вищої освіти групи ЕЕМ-21-1 Владислав КОЧУБЕЙ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2025 р.

ЗАЯВА

щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи

Я, КОЧУБЕЙ Владислав Євгенович, здобувач вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка заявляю, що моя кваліфікаційна робота, яка подана до екзаменаційної комісії для публічного захисту, виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше кваліфікаційних робіт, кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим Положенням про академічну доброчесність у Криворізькому національному університеті. Згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску письмової роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

13 червня 2025 р.

(підпис)

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

КОЧУБЕЙ Владислав Свєнович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Покращення енергоефективності насосного електропривода шляхом впровадження тиристорного регулятора напруги
2. Строк подання студентом роботи 13 червня 2025 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи є дослідити вплив тиристорного регулятора напруги на енергоефективність асинхронного електропривода насосної установки та обґрунтувати доцільність його застосування в умовах ЖКГ і промисловості України. Для досягнення мети поставлено завдання: провести аналіз літератури з теми, розробити еквівалентну модель двигуна з ТРН, змодельювати робочі характеристики і розрахувати потенційну енергетичну економію, а також оцінити техніко-економічну доцільність впровадження цієї системи керування.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
1. Аналіз стану та перспектив підвищення енергоефективності насосних електроприводів в умовах сучасного енергогосподарства. 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом насосного агрегату
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал кваліфікаційної роботи буде представлено у вигляді презентації PowerPoint, що складатиметься з 10 слайдів, на яких наочно відображено структурну модернізацій насосного агрегату з розробкою системи керування тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Застосування насосних агрегатів в Українській промисловості та житлово-комунальному господарстві</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
2	<i>Огляд сучасних досліджень щодо підвищення енергоефективності насосних електроприводів за допомогою тиристорних регуляторів напруги</i>	<i>15 травня 2025 р.</i>
3	<i>Важливість застосування нових систем керування насосами з тиристорним регулятором напруги та основні аспекти підвищення енергоефективності</i>	<i>19 травня 2025 р.</i>
4	<i>Основні аспекти підвищення енергоефективності за допомогою ТРН</i>	<i>22 травня 2025 р.</i>
5	<i>Розрахунок параметрів насосного агрегату і вибір електродвигуна.</i>	<i>25 травня 2025 р.</i>
6	<i>Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини, та елементів захисту</i>	<i>29 травня 2025 р.</i>
7	<i>Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок механічних і енергетичних характеристик.</i>	<i>1 червня 2025 р.</i>
8	<i>Розробка і опис електричної принципової схеми системи керування та її елементної баз.</i>	<i>5 червня 2025 р.</i>
9	<i>Висновки кваліфікаційної роботи</i>	<i>13 червня 2025 р.</i>

Дата видачі завдання 12 травня 2025 р.

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Владислав КОЧУБЕЙ

(Ім'я Прізвище)

Керівник роботи _____

(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Покращення енергоефективності насосного електропривода шляхом впровадження тиристорного регулятора напруги»: 43 с., 15 рис., 20 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5

Досліджуваний об'єкт - є асинхронний електропривод насосної установки з тиристорним регулятором напруги в умовах змінного навантаження.

У першому розділі проведено аналіз застосування насосних установок в українській промисловості та ЖКГ, виокремлено їх енергетичні особливості й обґрунтовано актуальність теми. Здійснено детальний огляд міжнародних і вітчизняних досліджень щодо тиристорного регулювання напруги, виокремлено ключові підходи і напрями подальшої роботи. Також описано принципи роботи ТРН, розглянуто їхні переваги для підвищення енергоефективності та розраховано потенційну економію, обґрунтувавши доцільність впровадження цих методів.

У другому розділі розроблено еквівалентну математичну модель асинхронного двигуна з тиристорним регулятором напруги, побудовано механічні, електромеханічні характеристики при різних рівнях напруги. Здійснено розрахунок спожитої електричної енергії та ККД у режимах зниження напруги, а також оцінено потенційну річну економію електроенергії для типової насосної установки. Крім того, проведено попередній техніко-економічний аналіз доцільності впровадження ТРН, враховуючи тепловий запас двигуна та вартість модернізації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, НАСОСНА УСТАНОВКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Кочубей В.			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересуňко І.				5	1
Н. Контр.		Пересуňко І.			КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
Затвердж.		Пересуňко І.					

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В УМОВАХ СУЧАСНОГО ЕНЕРГОГОСПОДАРСТВА.....	9
1.1. Застосування насосних агрегатів в Українській промисловості та житлово-комунальному господарстві	9
1.2. Огляд сучасних досліджень щодо підвищення енергоефективності насосних електроприводів за допомогою тиристорних регуляторів напруги	13
1.3. Важливість застосування нових систем керування насосами з тиристорним регулятором напруги та основні аспекти підвищення енергоефективності.....	15
1.4. Основні аспекти підвищення енергоефективності за допомогою ТРН	18
1.5. Обґрунтування ефективності запропонованого методу керування	20
Висновок до розділу 1	22
РОЗДІЛ 2. ОБґРУНТУВАННЯ І РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ.....	23
2.1. Розрахунок параметрів насосного агрегату і вибір електродвигуна.	23
2.2. Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини, та елементів захисту.	25
2.3. Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок механічних і енергетичних характеристик.	27
2.4. Розробка і опис електричної принципової схеми системи керування та її елементної баз.	37
ВИСНОВКИ.....	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	41

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробив	Кочубей В.									6	1
Перевірів	Пересунько І.										
Н. Контр.	Пересунько І.										
Затвердж.	Пересунько І.										
					КНУ гр. ЕЕМ-21-1						

ВСТУП

У сучасних умовах енергетичної нестабільності, зростання тарифів на електроенергію та необхідності скорочення викидів парникових газів, питання підвищення енергоефективності технологічного обладнання набуває особливої актуальності. Значну частину електроенергії в Україні споживають електромеханічні системи, серед яких одне з провідних місць займають насосні агрегати. Вони використовуються в широкому спектрі галузей — від житлово-комунального господарства (ЖКГ) до металургії, гірничодобувної, хімічної, харчової та енергетичної промисловості.

Насосні станції забезпечують життєво важливі функції: водопостачання міст, промислове охолодження, відведення шахтних та дренажних вод, циркуляцію теплоносіїв тощо. У більшості випадків насосні агрегати приводяться в дію асинхронними електродвигунами, робота яких характеризується високою надійністю, проте значним рівнем споживання електроенергії. Особливо гостро це питання стоїть у тих випадках, коли двигун працює в режимах часткового навантаження або за змінних гідравлічних умов — що є типовою ситуацією для систем водопостачання та каналізації у містах, зокрема таких індустріальних центрів як Кривий Ріг, Запоріжжя, Дніпро.

На фоні обмежених бюджетів та потреби в підвищенні ефективності функціонування міської інфраструктури, виникає потреба у впровадженні технічно обґрунтованих, але економічно доцільних рішень для зниження споживання енергії насосними системами. Одним із таких напрямків є застосування тиристорних регуляторів напруги (ТРН) — пристроїв, які дозволяють керувати напругою, що подається на двигун, шляхом фазового керування. На відміну від перетворювачів частоти, ТРН є простішими в

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Косубей В.</i>			Вступ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Пересунько І.</i>					7	1
<i>Н. Контр.</i>		<i>Пересунько І.</i>				КНУ		
<i>Затвердж.</i>		<i>Пересунько І.</i>				гр. ЕЕМ-21-1		

реалізації, дешевшими у виробництві та не потребують повної перебудови електромережі.

У ряді експериментальних і прикладних досліджень, проведених в Україні, показано, що застосування ТРН дозволяє знизити споживану електроенергію до 30–40% при роботі насосів у неповному навантаженні. Це не лише покращує енергоефективність, але й знижує навантаження на обладнання, подовжуючи його ресурс. Зважаючи на широке використання насосного обладнання в українських містах та промисловості, дана тема має велике практичне значення для енергетичної та економічної безпеки держави.

Метою даної роботи є дослідження можливостей підвищення енергоефективності електропривода насоса шляхом впровадження тиристорного регулятора напруги, а також аналіз впливу такого керування на техніко-економічні показники роботи насосної установки.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В УМОВАХ СУЧАСНОГО ЕНЕРГОГОСПОДАРСТВА

1.1. Застосування насосних агрегатів в Українській промисловості та житлово-комунальному господарстві

Насосні агрегати відіграють ключову роль у промисловості та житлово-комунальному господарстві України, забезпечуючи надійність і стабільність технологічних процесів та життєзабезпечення населення. Насоси використовуються в різних сферах, таких як водопостачання, водовідведення, тепlopостачання, енергетика, металургійна, гірничодобувна та хімічна промисловості. Кожна з цих галузей характеризується специфічними вимогами до параметрів насосного обладнання та режимів його роботи.

У житлово-комунальному господарстві основним завданням насосних агрегатів є забезпечення стабільного та якісного водопостачання і тепlopостачання житлових будівель та комунальних об'єктів. Найбільш поширеними є відцентрові насоси, які використовуються у водопровідних і каналізаційних системах для перекачування питної, технічної або стічної води, а також циркуляційні насоси для систем центрального опалення. Характерним для таких систем є значні коливання навантаження залежно від пори року та часу доби, що вимагає гнучкості у керуванні насосними агрегатами [1].

У промисловості України насосне обладнання виконує різноманітні функції, залежно від особливостей технологічних процесів:

- У гірничодобувній промисловості насосні агрегати застосовують для відкачування шахтних вод, транспортування пульпи та шламів. Особливо актуальними є високонапірні насоси великої

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Кочубей В.			Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.						
Н. Контр.		Пересунько І.				КНУ		
Затвердж.		Пересунько І.				гр. ЕЕМ-21-1		

потужності, здатні працювати в умовах високого абразивного зносу [2].

- В металургійній промисловості насоси забезпечують циркуляцію води для охолодження обладнання, що працює при високих температурах. Тут потрібні насоси, що витримують тривалі навантаження і мають високу продуктивність [3].

- У хімічній промисловості важливу роль відіграють спеціалізовані насоси, які перекачують агресивні, вибухонебезпечні або токсичні речовини. Вимоги до надійності та безпеки таких насосів є надзвичайно високими [4].



Рисунок 1.1 Фото машинного залу водопровідні насосні станції у одному з районів міста.

Однак, незважаючи на різноманітність використання насосних агрегатів, спільними проблемами для всіх галузей є високе енергоспоживання та недостатньо ефективне регулювання продуктивності насосів відповідно до поточних потреб. За оцінками, до 20–40% електроенергії, споживаної

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

насосними агрегатами, можна зекономити завдяки застосуванню сучасних систем керування, зокрема за допомогою тиристорних регуляторів напруги [5].

Отже, підвищення енергоефективності насосних агрегатів є актуальною задачею для України, яка має значний потенціал для економії енергоресурсів та покращення економічних і екологічних показників роботи промислових підприємств та комунальних об'єктів.

У сферах міського господарства зосереджено найбільше насосних установок, що дозволяє оцінити масштаб потенційного енергозбереження при модернізації систем керування.

Таблиця 1.1

Сфери міського господарювання за категоріями

Категорія	Кількість насосів	Опис
Житлово-комунальне господарство (ЖКГ)	500	Насоси, що працюють у підвалах будинків, котельнях, підкачувальних станціях. Включають системи опалення, гарячого водопостачання, внутрішнього водовідведення.
Централізоване водопостачання	120	Міські насосні станції 1-го та 2-го підйому, водозабори, насосні вузли в магістральних мережах.
Централізоване водовідведення	90	Каналізаційні насосні станції (КНС), що забезпечують перекачування стоків на очисні споруди.
Теплопостачальні підприємства	70	Насоси циркуляції теплоносія в системах централізованого опалення, ТЕЦ, котельень.
Промислові об'єкти (включно з охолодженням)	200	Насоси у виробництві, зокрема в металургії, ГЗК, хімії. Включають охолодження печей, насосні гідросистеми, пульпопроводи.
Дренажні/штормові системи	60	Насоси у зливових насосних станціях, дренаж підземних споруд, тунелів, автошляхів.
Інші (малі станції, свердловини тощо)	150	Приватні свердловини, малі підвищувальні станції, резервні та аварійні насоси.

Ключові висновки:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЖКГ є лідером за кількістю насосів — понад 500 агрегатів. Це пояснюється великою кількістю житлових будівель та автономних систем опалення/водопостачання.

Промисловість також має значну частку — близько 200 насосів, особливо в таких індустріальних містах, як Кривий Ріг чи Запоріжжя.

Сфери, що працюють циклічно (водовідведення, дренаж) мають меншу кількість, проте споживають багато енергії під час пікових навантажень.



Рисунок 1.2 Орієнтовна кількість насосних агрегатів у місті з населенням 1 000 000 осіб

Сумарно – понад 1100 насосних установок, з яких щонайменше 60% можуть бути об'єктами для впровадження тиристорного регулювання або частотного керування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Огляд сучасних досліджень щодо підвищення енергоефективності насосних електроприводів за допомогою тиристорних регуляторів напруги

Проблема енергоефективності насосних агрегатів є предметом активного наукового аналізу як в Україні, так і за кордоном. Ряд сучасних досліджень акцентує увагу на застосуванні тиристорних регуляторів напруги (ТРН) як простого та ефективного методу зниження споживання електроенергії в умовах змінного навантаження.

Міжнародні дослідження

Міжнародні праці (Udovichenko et al., Goman et al., Kazakbaev et al., Khamzaev et al.) демонструють високу зацікавленість у застосуванні ТРН у промислових електроприводах. Основні акценти зроблено на:

- покращенні енергетичних характеристик систем при змінних режимах роботи;
- дослідженні форм сигналу та впливу гармонік;
- створенні інтегрованих систем керування з адаптивними алгоритмами;
- використанні ТРН як елементів у фільтрувальних або компенсуючих схемах.

Ці праці вказують на необхідність розробки інтелектуальних стратегій керування, що враховують як енергозбереження, так і стійкість до змін зовнішніх умов.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

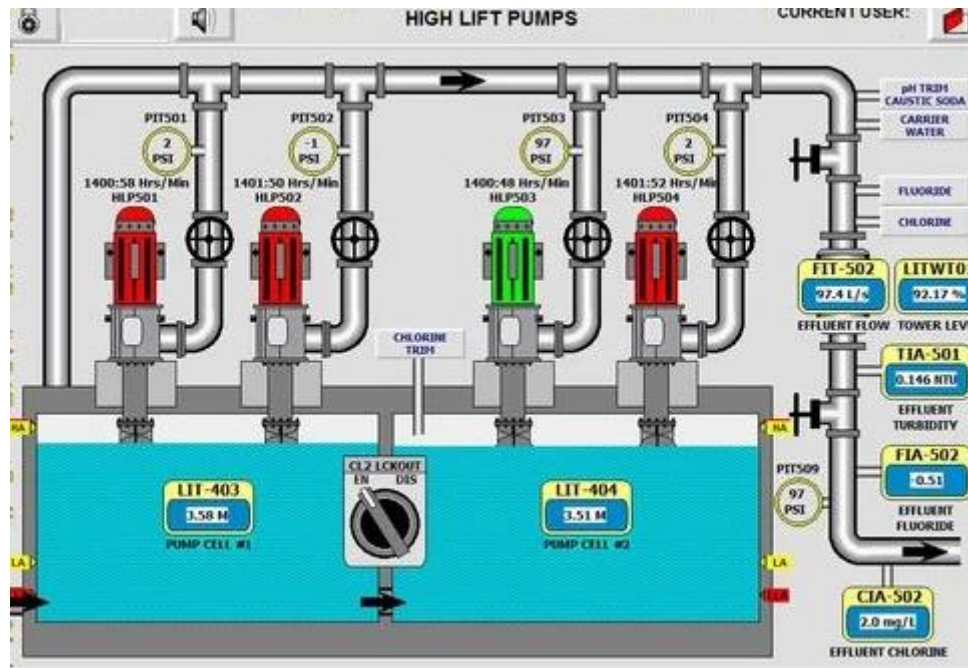


Рисунок 1.3. Візуальний вигляд SCADA моніторингу роботи міських насосів

Українські дослідження

Українські наукові праці (Цициюрський Ю.Л., Шуруб Ю.В., Горбенко В.І.) більше орієнтовані на прикладні аспекти:

- модернізація насосних станцій у ЖКГ та промисловості;
- аналіз втрат у реальних електромеханічних системах;
- впровадження ТРН у існуючі системи без кардинальної перебудови обладнання.

Український підхід більш прагматичний, орієнтований на адаптацію ТРН до специфічних умов енергогосподарства країни.

Перспективи подальших досліджень

На основі аналізу літератури можна виділити кілька перспективних напрямків для розвитку тематики:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1. **Інтелектуальне керування** – розробка алгоритмів регулювання, що враховують не тільки миттєве навантаження, але й динаміку змін, історію роботи та прогнозоване споживання.
2. **Поєднання ТРН і ВДЕ** – інтеграція тиристорних регуляторів з живленням від сонячних та вітрових електростанцій.
3. **Вплив ТРН на якість електроенергії** – поглиблене вивчення гармонічних спотворень, міжфазних перекосів та впровадження відповідних фільтрів.
4. **Моделювання та симуляція** – побудова універсальних моделей для симуляції режимів насосів з ТРН у середовищах типу MATLAB/Simulink.
5. **Оптимізація систем ЖКГ** – розробка типових рішень для модернізації міських систем водопостачання та водовідведення з урахуванням економічного ефекту.

1.3. Важливість застосування нових систем керування насосами з тиристорним регулятором напруги та основні аспекти підвищення енергоефективності

Одним із ключових напрямів підвищення ефективності роботи насосних агрегатів є впровадження сучасних систем керування на базі тиристорних регуляторів напруги (ТРН). ТРН дозволяють плавно змінювати амплітуду напруги, що подається на асинхронний двигун насоса, без різких стрибків струму при пуску та гальмуванні, а також регулювати швидкість обертання ротора в заданому діапазоні. Це створює низку переваг:

Зниження пускових струмів та механічних навантажень

При традиційному пуску без ТРН асинхронний двигун споживає струм, що може перевищувати номінальний у 5–7 разів. Використання ТРН дозволяє обмежити напругу на обмотках під час пуску, що суттєво зменшує пусковий струм і момент інерційного навантаження на механічну частину насоса.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формула обмеження струму під час пуску (спрощено):

$$I_{\text{пуск}} \approx \frac{U_{\text{ТРН}}}{R_{\text{статор}}}, \quad U_{\text{ТРН}} < U_{\text{ном}}$$

де $U_{\text{ТРН}}$ – напруга, встановлена ТРН під час пуску, $R_{\text{статор}}$ – еквівалентний опір статорової обмотки.

Регулювання швидкості та продуктивності насоса за законами гідравліки

Для відцентрових насосів характерні закони:

$$Q \propto n, \quad H \propto n^2, \quad P \propto n^3,$$

де Q – продуктивність (м³/год), H – напір (м), P – споживана потужність (кВт), n – частота обертання (об/хв).

Зменшуючи напругу U за допомогою ТРН, знижується частота обертання n , а отже трьохкратно зменшується потужність:

$$P_{\text{рег}} \approx P_{\text{ном}} \left(\frac{n_{\text{рег}}}{n_{\text{ном}}} \right)^3.$$

Наприклад, якщо зменшити швидкість ротору на 20 %, потужність знизиться приблизно на 49 %.

Покращення коефіцієнта потужності (cos φ)

При використанні ТРН, особливо якщо вбудовано корекцію кута запалювання тиристорів, можна значно знизити реактивні складові струму. Це дозволяє підвищити коефіцієнт потужності, що прямо впливає на загальні втрати у лініях живлення. Формально:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\cos \varphi_{\text{отр}} = \frac{P_{\text{актив}}}{\sqrt{P_{\text{актив}}^2 + Q_{\text{реакт}}^2}} \rightarrow \max,$$

де $P_{\text{актив}}$ – активна потужність, $Q_{\text{реакт}}$ – реактивна. Оптимізація кута запалювання тиристорів зменшує $Q_{\text{реакт}}$.

Зниження надлишкових втрат у мережі та електродвигуні

Плавний запуск і гасіння, а також регулювання напруги в робочому режимі дають змогу уникнути рвучких переходів, які супроводжуються тепловими та електромагнітними ударами. Внаслідок цього знижуються втрати у вигляді тепла в обмотках статора (I^2R) та зменшується температура електродвигуна, що подовжує термін служби ізоляції.

Гнучка інтеграція у системи автоматизації

Сучасні ТРН часто обладнані вбудованими мікропроцесорними контролерами чи інтерфейсами (Modbus, Profibus, Ethernet), що дозволяє інтегрувати їх у загальну архітектуру SCADA/PLC. Це дає змогу не лише задавати довільну характеристику регулювання, а й здійснювати моніторинг електричних параметрів (струм, напруга, $\cos \varphi$) у реальному часі та коригувати роботу насоса залежно від зовнішніх умов (температура, тиск, рівень рідини).

Таблиця 1.2

Порівняння традиційного керування та керування з ТРН

Показник	Без ТРН	З ТРН
Пускові струми	5–7 Іном	~1,2–1,5 Іном (за рахунок обмеження напруги)
Механічний знос на пуску	Високий	Знижений (плавний пуск)
Споживання енергії при частковому навантаженні	Постійне номінальне (надлишок)	Залежить від n^3 (економія енергії до 50 %)
Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$)	Зазвичай 0,7–0,8	0,85–0,95 (при оптимальному налаштуванні кута запалювання)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Показник	Без ТРН	З ТРН
Гармонічні спотворення	Низькі (при прямому пуску)	Середні (ТРН вносять гармоніки) – потребує фільтрів
Інтеграція в АСУ ТП	Обмежена	Широка (цифрові інтерфейси, SCADA)
Вартість впровадження	Мінімальна	Додаткова (вартість ТРН)

1.4. Основні аспекти підвищення енергоефективності за допомогою ТРН

Оптимізація режимів частотного регулювання

Хоча ТРН безпосередньо не змінюють частоту живлення, зменшена амплітуда напруги справляє аналогічний ефект, наближаючи режим роботи насоса до бажаної точки на характеристиці $Q-H$. Разом із частотним перетворювачем (ПЧ) або вбудованим ПЧ+ТРН можна досягти ще більш точного регулювання:

$$n = \frac{f_{\text{привід}}}{p}, \quad U \propto f_{\text{привід}}$$

У випадку роботи тільки з ТРН без корекції частоти слід враховувати, що частота залишається 50 Гц, але ефективне значення напруги знижується:

$$U_{\text{еф}} = U_{\text{ном}} \cdot \sin(\alpha),$$

де α – середній кут відкриття тиристорів.

Плавний пуск і зупинка з економією енергії

Плавні переходи з режиму “стояння” до робочого мінімізують пускові піки, що не тільки економить електроенергію (зниження втрат при реактивному споживанні), а й дозволяє відмовитися від додаткових апаратних засобів (м’які пускачі чи трансформатори з регулюванням мідної обмотки).

Зниження втрат тепла в двигуні та кабельній мережі

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При неповному навантаженні двигуна його струм зменшується відповідно до зниження напруги, отже втрати I^2R у статорі й кабельній мережі скорочуються. Формула втрат у статорі:

$$P_{\text{Втати}} = 3I^2R_{\text{статор}}$$

Якщо U знижується на 20 %, то й I приблизно зменшується на 20 % (за умови, що опір в основному індуктивний), а втрати скорочуються на ≈ 36 %.

Підтримка оптимального робочого режиму насоса

Використовуючи ТРН, можливо регулювати вироблення тиску у відповідності до потреб системи (наприклад, залежно від витрати води в мережі). Це особливо актуально в ситуаціях, коли доходить до пікових навантажень (ранкові/вечірні години у ЖКГ) або падіння припливу в шахтах/камерних системах. Замість постійної роботи насоса на максимальній напрузі достатньо знизити її до необхідного рівня, забезпечивши потрібні $Q-H$.

Аналіз та корекція показників у реальному часі

Сучасні ТРН оснащені вбудованими датчиками струму, напруги, температури, що дозволяє аналізувати стан насоса (перевантаження, перегрів) та автоматично коригувати кут запалювання тиристорів. Це не тільки знижує ймовірність аварій, а й підтримує енергоефективні режими.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

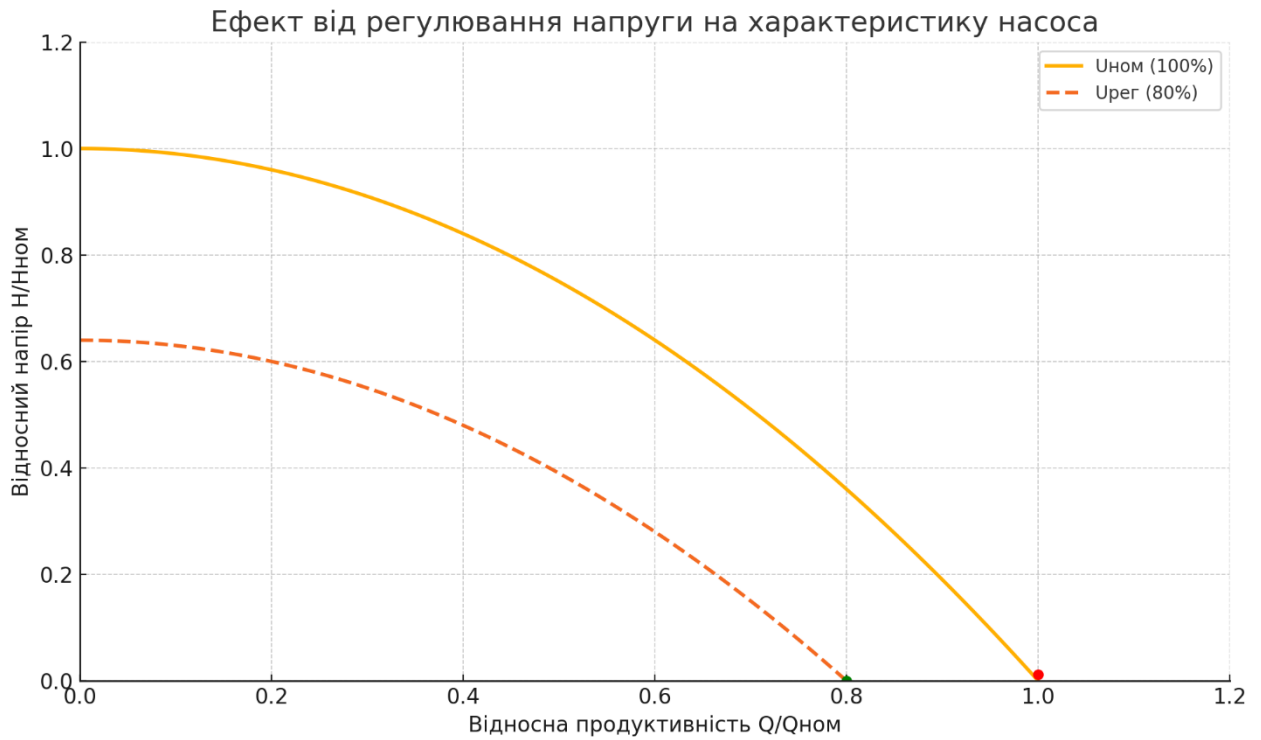


Рисунок 1.4 Можливий ефект від регулювання напруги на характеристику насоса

1.5. Обґрунтування ефективності запропонованого методу керування

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що впровадження тиристорних регуляторів напруги (ТРН) у системи керування насосними агрегатами є ефективним заходом з точки зору енергозбереження, економіки та надійності. Основним фізичним принципом, що забезпечує енергоефективність, є квадратична залежність споживаної потужності від прикладеної напруги.

Ключове фізичне співвідношення:

$$P \propto U^2$$

Це означає, що навіть незначне зменшення напруги дає суттєве зниження потужності та, відповідно, витрат енергії. Наприклад:

Напруга, %	Потужність, %
------------	---------------

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Напруга, %	Потужність, %
100	100
80	64
60	36

Зменшення напруги на 20% веде до зниження потужності на 36%

Формула оцінки економії енергії:

$$\Delta E = E_{nom} - E_{reg} = E_{nom} \cdot \left(1 - \left(\frac{U_{reg}}{U_{nom}} \right)^2 \right)$$

де: ΔE — зекономлена енергія; E_{nom} — річне споживання без регулювання;
 U_{reg} — відповідно регульована та номінальна напруги.

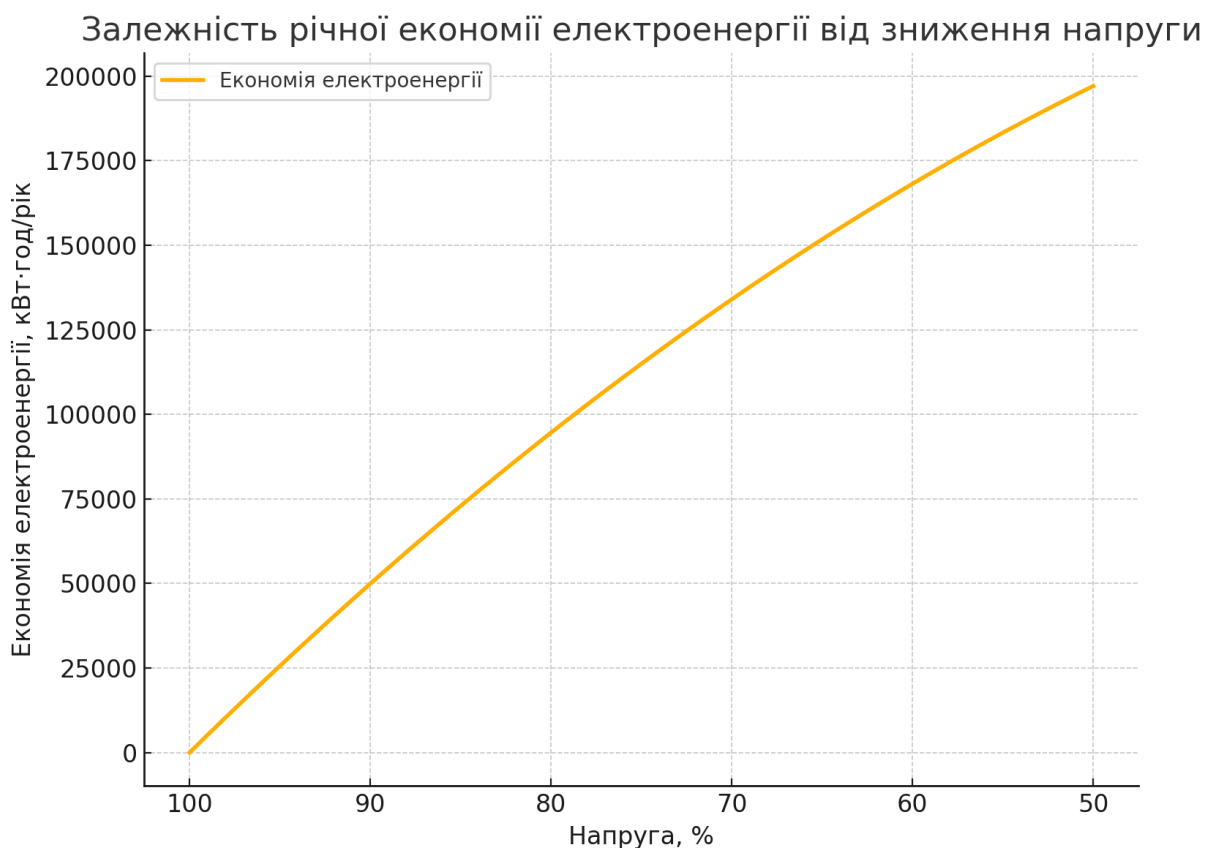


Рисунок 1.5 Залежність річної економії електроенергії від зниження напруги

Цей графік показує залежність річної економії електроенергії від зниження напруги. Як видно, зменшення напруги з 100% до 70–60% дає суттєвий приріст економії — до 50–60% від номінального споживання.

Отже, графік підтверджує квадратичну залежність економії від напруги та доцільність застосування ТРН у змінному навантаженні.

Висновок до розділу 1

ТРН забезпечують більшу гнучкість у керуванні насосними агрегатами, дозволяючи вибирати оптимальні режими роботи залежно від потреб системи та змін зовнішніх умов.

Основні аспекти енергоефективності:

- Зменшення пускових струмів
- Підтримка бажаної точки на характеристиці насоса
- Підвищення коефіцієнта потужності
- Зниження теплових та механічних втрат

Методи оцінки ефекту: розрахунок економії потужності за законами гідравліки, аудит режимів роботи та аналіз фактичного споживання електроенергії.

Поточні виклики: необхідність компенсації гармонічних спотворень, коректний підбір обладнання та належне його технічне обслуговування.

Таким чином, впровадження ТРН у системи живлення насосних агрегатів суттєво підвищує енергоефективність та надійність їх роботи. За рахунок адаптивного керування напругою можна досягнути значної економії енергоресурсів і подовжити термін служби обладнання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ І РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ

2.1. Розрахунок параметрів насосного агрегату і вибір електродвигуна.

Для вирішення нашої задачі та більш детального аналізу нам потрібно обрати насосний агрегат. Візьмімо найрозповсюджений агрегат 1Д315-71



Рисунок 2.1 Насосний агрегат 1Д315-71

1Д315-71 — це горизонтальний одноступеневий відцентровий насос з двостороннім входом, призначений для перекачування чистої або технічної води в системах водопостачання, теплопостачання та промислових процесах.

Основні технічні характеристики:

- **Продуктивність (Q):** 315 м³/год
- **Напір (H):** 71 м
- **Потужність електродвигуна (P):** 110 кВт
- **Частота обертання (n):** 3000 об/хв
- **ККД:** 82%

<ul style="list-style-type: none"> • Кавітаційний запас: до 6,5 м 					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
		Розробив	Кочубей В.		Розділ		
		Перевірів	Пересунько І.				
		Н. Контр.	Пересунько І.		КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
		Затвердж.	Пересунько І.				

- **Маса насоса:** 190 кг
- **Маса агрегату:** 1045 кг
- **Габарити насоса (Д×Ш×В):** 766×600×520 мм
- **Габарити агрегату:** 1855×620×890 мм

Особливості конструкції:

- **Двосторонній вхід:** забезпечує рівномірний розподіл навантаження на робоче колесо, зменшуючи осьову силу та підвищуючи надійність.
- **Горизонтальне виконання:** спрощує монтаж та обслуговування.
- **Одноступеневий дизайн:** забезпечує простоту конструкції та надійність в експлуатації.
- **Сальникове ущільнення вала:** дозволяє ефективно запобігати витокам робочої рідини.

Застосування:

Насос 1Д315-71 широко використовується в таких сферах:

- **Житлово-комунальне господарство (ЖКГ):** системи водопостачання та тепlopостачання.
- **Промисловість:** охолодження технологічного обладнання, циркуляція води в замкнутих системах.
- **Енергетика:** подача води в системах теплоелектроцентралей та котелень.

Вибираємо асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором моделі 4А31586У3 з параметрами:

$$P_H = 110 \text{ кВт}; S_H = 2\%; U_H = 380 \text{ В}; \eta = 0.935; \cos\varphi = 0.9;$$

$$\frac{M_{max}}{M_H} = 1.9; \frac{M_{\Pi}}{M_H} = 1; \frac{M_{min}}{M_H} = 0.9; \frac{I_{\Pi}}{I_H} = 7; J = 4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Перевірка двигуна за нагрівом

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки агрегат експлуатується безперервно та під сталим навантаженням, перевірку нагріву двигуна виконують, порівнюючи крутний момент на його валу з крутним моментом на валу насоса.

Момент на валу насоса:

$$M = \frac{P_n \cdot 9.55}{\omega} = \frac{87793 \cdot 9.55}{1000} = 855.537 \text{ (Нм)} \quad (1.3)$$

Номинальний крутний момент електродвигуна повністю покриває потреби насоса, тож за умовами нагріву агрегат працює із достатнім запасом моменту.

$$\Delta = \frac{M_d - M}{M_d} = \frac{855.537 - 1072}{1072} = 0.202 \quad (1.4)$$

Тепловий запас становить 20 %. Оскільки в системі з ТРН асинхронного двигуна крутний момент змінюється пропорційно квадрату прикладеної напруги, зниження напруги призводить до відповідного зменшення моменту і має вплив на тепловий режим двигуна ($M_n \sim U_1^2$), дозволяє знизити напругу на статорі до 90 % номіналу без погіршення жорсткості механічної характеристики.

2.2. Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини, та елементів захисту.

Вибір тиристорного регулятора напруги

Номинальні значення випрямленої напруги та струму перетворювача обираємо зі стандартних серій. У якості ТРН обрано пристрій виробництва GE Power Controls (Бельгія), модель 1QDP [4].

$P_n=110\text{кВт}$; $I_n=240 \text{ А}$; $U=380\text{В}$, виконання IP20.

Вибір струмообмежуючого реактора

Вибираємо струмообмежуючий реактор [4], дані якого є в табл.2.1.

Таблиця 2.1

Тип	РТСТ-265-0,156У3
Індуктивність реактора, мГн	0,156

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Номинальний струм, А	265
----------------------	-----

Вибір елементів захисту

Запобіжники серії ПП57 застосовуються для захисту пристроїв зі силовими напівпровідниковими вентилями від внутрішніх коротких замикань у колах змінного або пульсуючого струму частотою 50/60 Гц та в колах постійного струму. Позначення запобіжників має структуру: ПП57-ABC0-EP, де

- **ПП** — плавкий запобіжник;
- **57** — умовний номер серії;
- **A** (двозначне число) — умовне позначення номінального струму запобіжника;
- **B** (цифра) — умовне позначення номінальної напруги;
- **C** (цифра) — спосіб монтажу та тип під'єднання провідників до клем:
 - 0 — без індикатора спрацьовування і без додаткового контакту в схему;
 - 1 — з індикатором спрацьовування і з контактом у схему;
 - 2 — з індикатором спрацьовування без контакту в схему;
- **E** (буква) — кліматичне виконання;
- **P** (цифра) — категорія розміщення.

Вибираємо запобіжники типу ПП57-3427

Таблиця 2.2.

Номинальні втрати потужності, Вт	Номинальні струми плавких вставок, А	Габаритні розміри, мм
30, 37	160,250	346x72x100

Вибір комутаційної апаратури

Вибираємо автомат серії А3000 типу А3721 струмообмежуючий з електромагнітними розчіплювачем триполюсний:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3.

Номинальний струм, А	Напруга, В	Число полюсів	Струм уставки розцеплювача, А	Час вимикання	Габаритні розміри
250	380	3	250-600	0.03	561x217x141

Вибираємо теплові реле серії РТ

Таблиця 2.4.

Тип реле	Межі регулювання струму неспрацьовування, А:	Номинальна напруга, В	Потужність двигуна, кВт
РТЛ 100804	240-400	380	150

2.3. Складання схеми заміщення, математичний опис і розрахунок механічних і енергетичних характеристик.

Розрахунок параметрів асинхронного двигуна по Г-образній схемі заміщення:

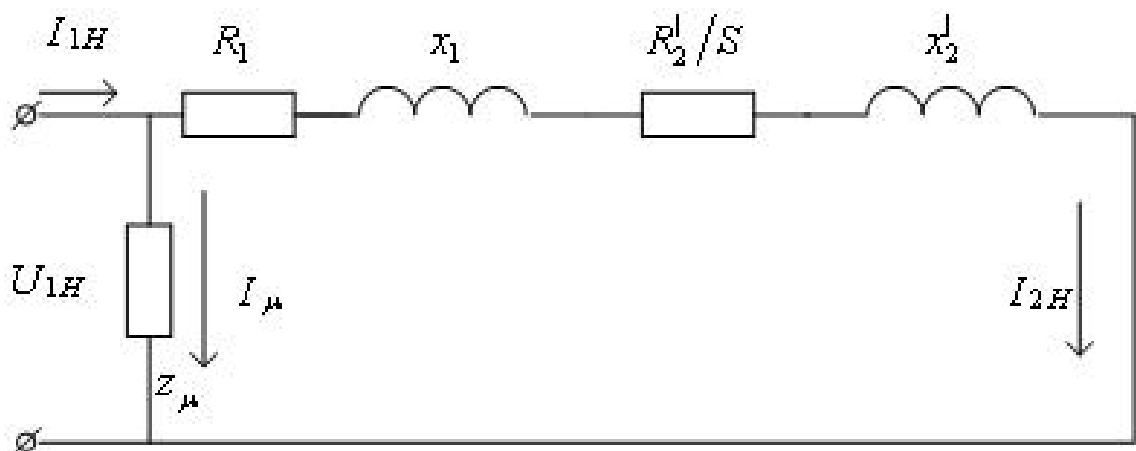


Рисунок 2.2. Г-образна схема заміщення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Номинальний момент на валу двигуна:

$$M_H = \frac{P_H * 9.55}{n * (1-s)} = \frac{110000 * 9.55}{1000 * (1-0.02)} = 1072 \text{ (Нм)} \quad (2.1)$$

Струм статора:

$$I_H = \frac{P_d}{U_1 * \cos(\varphi) * n * \sqrt{3}} = \frac{110000}{380 * 0.9 * 0.94 * \sqrt{3}} = 200.754 \text{ (А)} \quad (2.2)$$

Момент критичний:

$$M_k = \frac{M_{max} * M_H}{M_H} = 1945 * 1.9 = 2037 \text{ (Нм)} \quad (2.3)$$

Момент пусковий:

$$M_{\Pi} = \frac{M_{\Pi} * M_H}{M_H} = 1945 * 0.55 = 1072 \text{ (Нм)} \quad (2.4)$$

Повний опір при загальмованому роторі:

$$Z_{kp} = \frac{U_H}{I_H * \frac{I_{\Pi}}{I_H}} = \frac{380}{359.183 * 7} = 0.27 \text{ (Ом)} \quad (2.5)$$

Кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi * \frac{n}{30} = 3.14 * \frac{1000}{30} = 104.72 \text{ (с}^{-1}\text{)} \quad (2.6)$$

Приведений активний опір ротора:

$$r_{2p} = \frac{M_{\Pi} * Z_{kp}^2 * \omega_0}{3 * U_H^2} = \frac{1072 * 0.27^2 * 104.72}{3 * 380^2} = 0.019 \text{ (Ом)} \quad (2.7)$$

Коефіцієнт потужності при загальмованому роторі: J=0.33

$$\cos(\varphi p) = \cos(\varphi n) * \left(M_{H0} * \frac{\eta_d}{(1-s) \frac{I_{\Pi}}{I_H}} + J_0 * \frac{I_{\Pi}}{I_H} * (1 - \eta_d) \right) = 0.9 * \left(1 * \frac{0.94}{(1-0.02) * 7} + 0.33 * 7 * (1 - 0.94) \right) = 0.277 \quad (2.8)$$

Активний опір фазної обмотки статора:

$$r_1 = Z_{kp} * \cos(\varphi p) - r_{2p} = 0.27 * 0.277 - 0.019 = 0.056 \text{ (Ом)} \quad (2.9)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Індуктивний опір при загальмованому роторі:

$$X_k = \sqrt{Z_{kp}^2 - (r_1 + r_{2p})^2} = \sqrt{0.27^2 - (0.056 + 0.019)^2} = 0.26 \text{ (Ом)} \quad (2.10)$$

Індуктивний опір розсіювання статорної та роторної обмотки:

$$X_{2p} = \frac{X_k}{2} = \frac{0.26}{2} = 0.13 \text{ (Ом)} \quad (2.11)$$

$$X_1 = X_{2p} \quad (2.12)$$

Критичне ковзання:

$$S_k = S * \left(\frac{M_{max}}{M_H} + \sqrt{\frac{M_{max}^2}{M_H^2} - 1} \right) = 0.02 * (1.9 + \sqrt{1.9^2 - 1}) = 0.07 \quad (2.13)$$

Струм холостого струму статора:

$$I_{xx} = I_n * ((\sin(\varphi_p) - \cos(\varphi_p)) * \frac{X_{2p}}{r_1 + s_k}) = 200.4 * ((0.968 - 0.277) * 0.0730.027 + 0.0110.063) = 15.425 \text{ (A)} \quad (2.14)$$

Індуктивність при загальмованому роторі:

$$L_k = \frac{X_k}{2 * \pi * f_c} = \frac{0.26}{2 * 3.14 * 50} = 8.27 * 10^{-4} \quad (2.15)$$

Електромагнітна стала часу:

$$T_e = \frac{L_k}{r_1 + r_{2p}} = \frac{8.27 * 10^{-4}}{0.075} = 0.011 \quad (2.16)$$

Стала часу ротора:

$$T_2 = \frac{X_{кз}}{2 * \omega_c * R_2} = \frac{0.019}{2 * 314 * 0.019} = 0.022 \quad (2.17)$$

Розрахунок швидкісних і механічних характеристик

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При подачі на статор асинхронного двигуна несинусоїдального струму момент M можна розглядати як суму складових різних гармонік. Дослідження показують, що внесок вищих гармонік у момент не перевищує приблизно 0,8–8,5% від критичного моменту $M_{кр}$ на природній характеристиці двигуна, тому ці складові настільки малі, що ними можна знехтувати порівняно з моментом від першої гармоніки. Їхній вплив може стати помітним лише при дуже низьких швидкостях та малих навантаженнях. Отже, з достатньою для практичних розрахунків точністю при визначенні регулювальних характеристик асинхронного двигуна за умов $\alpha > \varphi$; $\lambda > \pi$; $U_1 < U_\phi$ треба користуватися формулою:

$$M_p = M_e * v_1^2 \quad (2.18)$$

де: M_p - момент, як розвиває двигун при подаванні на нього зниженої напруги (при заданому ковзанні); M_e - момент двигуна на природній характеристиці (при заданому ковзанні); $v_1^2 = U_1/U_H$ - відношення першої гармоніки напруги на статорі при заданому α до номінальної напруги живлячої мережі.

Побудуємо природну механічну характеристику АД за уточненою формулою Клосса.

$$M(S) = \frac{2 * M_{кр} * (1 + \alpha * S_k)}{\frac{S_k + S}{S} + 2 * \alpha * S_k} \quad (2.19)$$

Результати розрахунку представлені на рис. 2.3.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

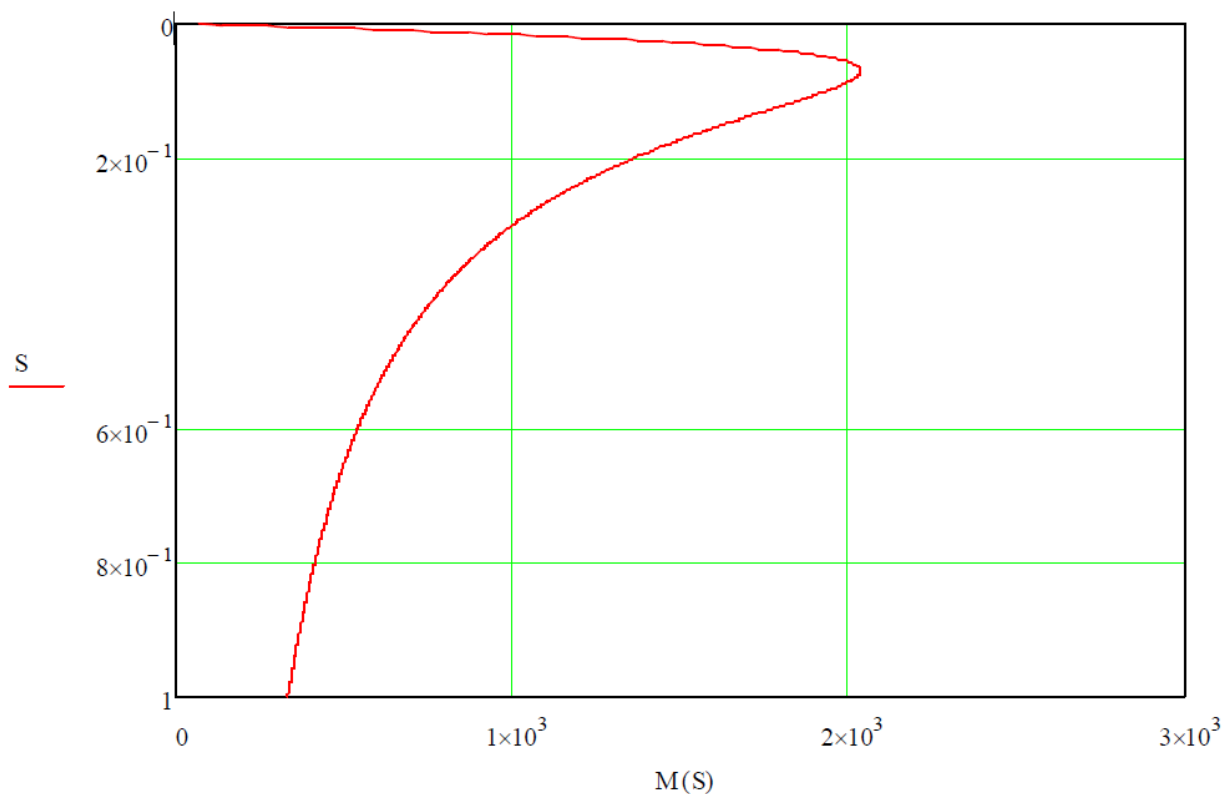


Рисунок 2.3. Природна механічна характеристика АД

Для отримання сімейства регульовальних характеристик ТРН-АД треба провести наступні дії:

-розрахунок кута навантаження у функції ковзання:

$$\varphi = f(S) = \arctg\left(\frac{X_e}{R_e}\right) \quad (2.20)$$

$$X_e = \frac{r_{2p}}{X_k} * C_1 + C_2(X_{2p} + C_2 * X_1) \quad (2.21)$$

$$R_e = \frac{r_1}{X_k^2} * \frac{r_{2p}^2}{s^2} + \frac{r_{2p}}{s} + C_2^2 * r_1 \quad (2.22)$$

$$C_1 = 1 + \frac{0.13}{0.26} = 1.5 \quad (2.23)$$

$$C_2 = 1 + \frac{0.13}{0.26} = 1.5 \quad (2.24)$$

Підставивши в формули значення параметрів схеми заміщення, а також змінюючи ковзання від 0 до 1 знайдемо залежність кута навантаження від ковзання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

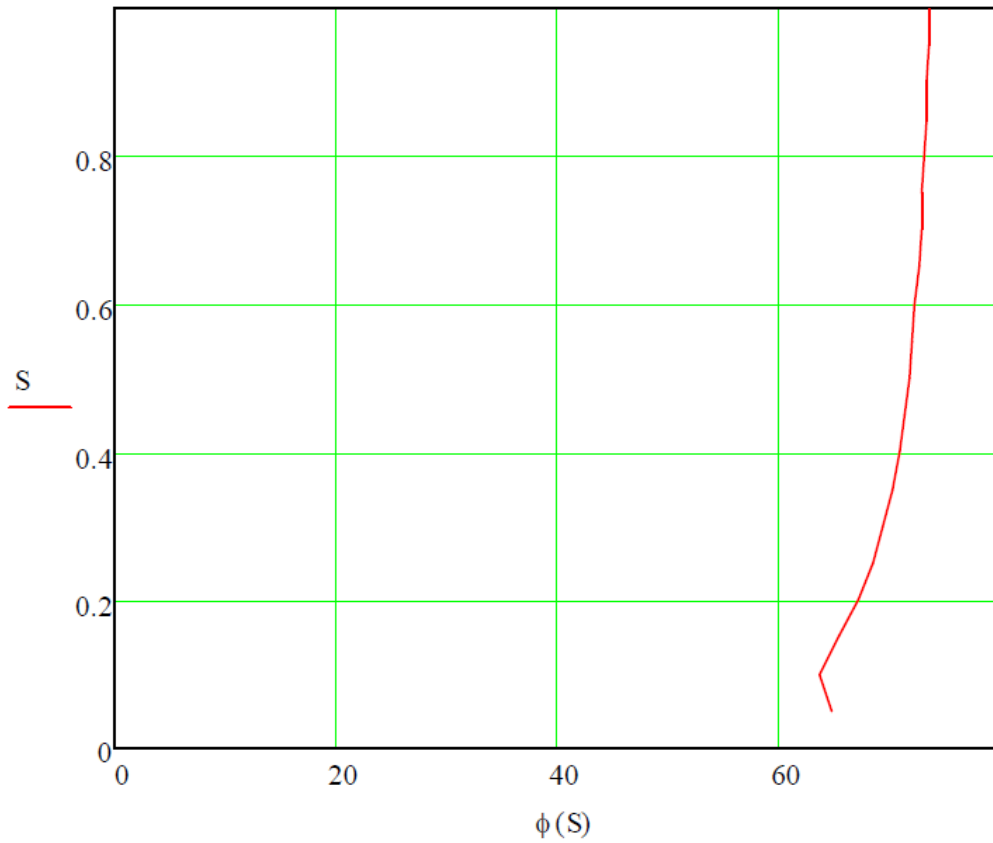


Рисунок 2.4. Функція кута навантаження від ковзання

-по отриманим номограмам, задаючись конкретним значенням кута α знаходимо залежність $v_1^2 = f(S)$.

Розраховані графіки представлені на графіку (рис.2.5.)

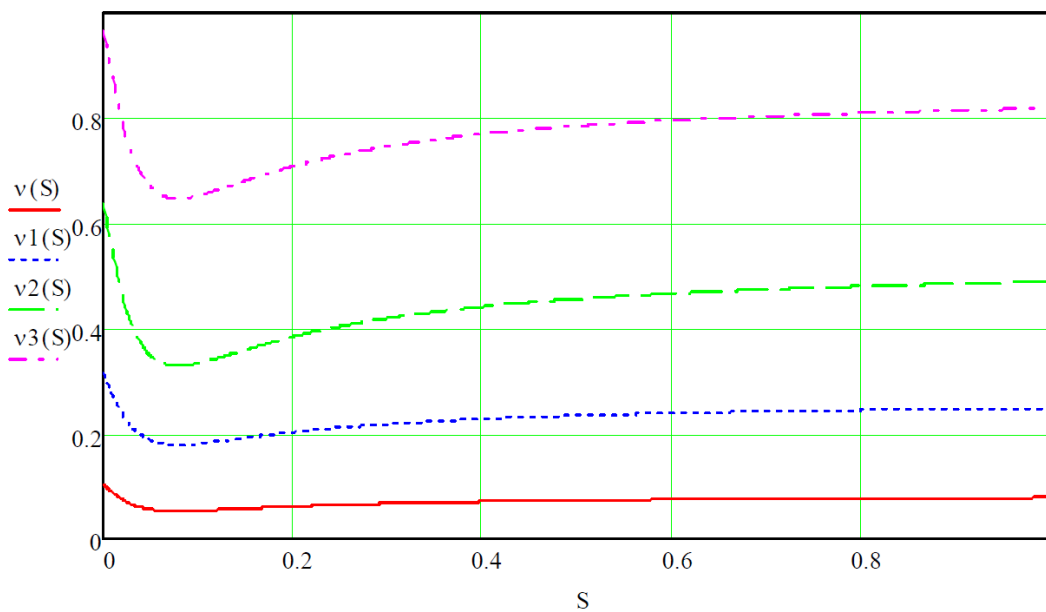


Рисунок 2.5. Графіки залежності $v_1^2 = f(S)$.

-за допомогою отриманих характеристик будуємо сімейство механічних характеристик системи ТРН-АД за формулою $M_p = M_e * v_1^2$.

Сімейство характеристик представлено на рис. 2.6.

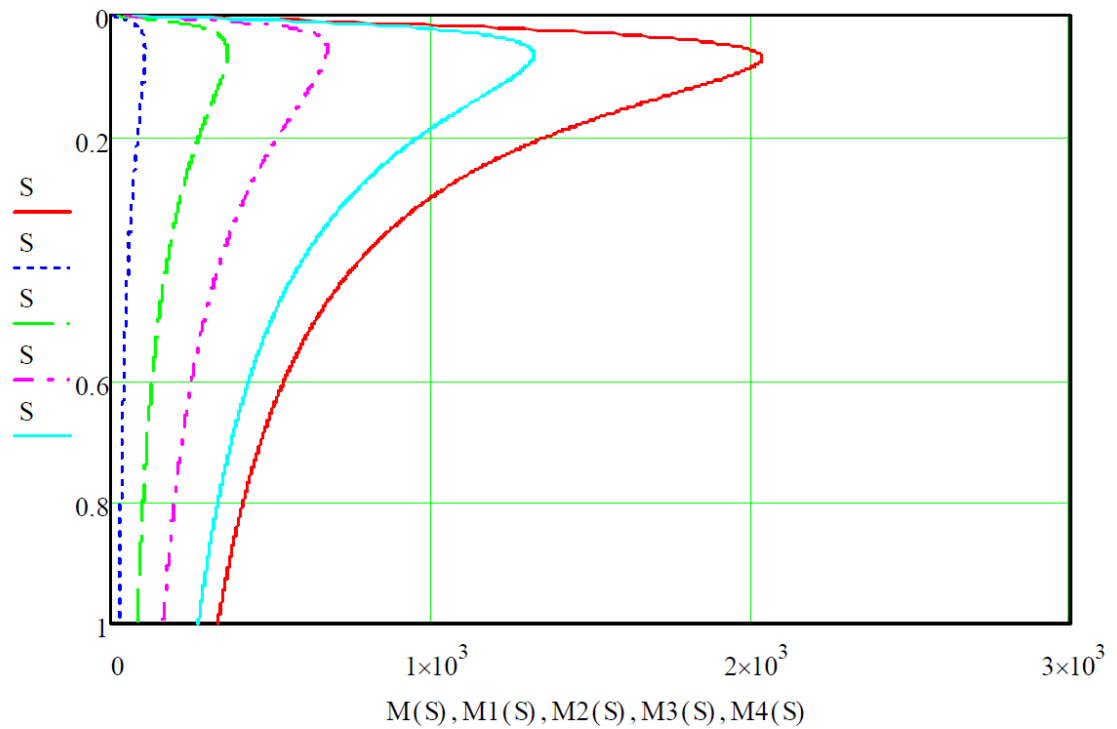


Рисунок 2.6. Сімейство механічних характеристик у системі ТРН-АД

- швидкісні характеристики системи ТРН-АД при $\alpha = const$ можуть бути побудовані за допомогою універсальних кривих $i_g = f(\alpha, \varphi)$,

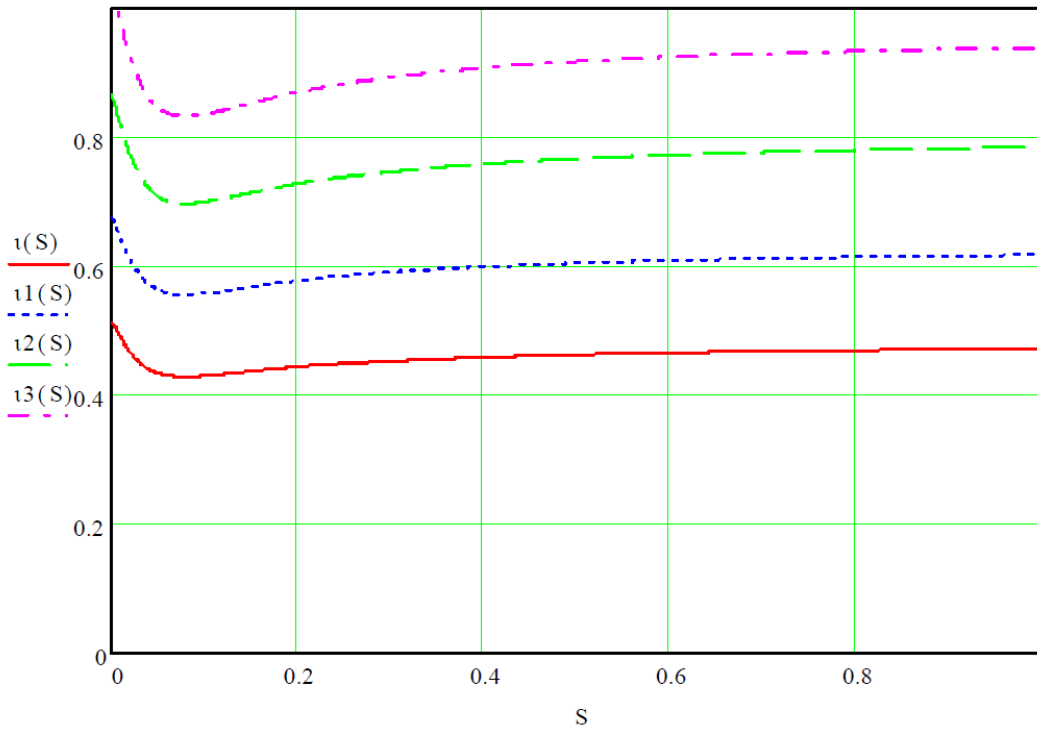


Рисунок 2.7. Універсальні криві струму у системі ТРН-АД

Методика побудови швидкісних характеристик при $\alpha = const$ аналогічна побудові механічних характеристик при відомій залежності $\varphi = f(S)$.

Діюче значення струму на регульовальній характеристиці дорівнює

$$I_p = I_g * i_g \quad (2.25)$$

де: I_p - Діюче значення струму статора при роботі двигуна на природній характеристиці. Із $I_p = I_g * i_g$ маємо, що при фіксованому куті α необхідно знати $i_g = f(S)$ і $I_g = f(S)$ при відповідних значеннях кута α

де :

$$I_g = \sqrt{I_{xx}^2 + \frac{S_k}{S_n} * \frac{S^2}{S^2 + S_k^2} * 2 * \lambda * (I_n^2 + I_{xx}^2)} \quad (2.26)$$

Сімейство швидкісних характеристик системи ТРН-АД на рис.2.8.

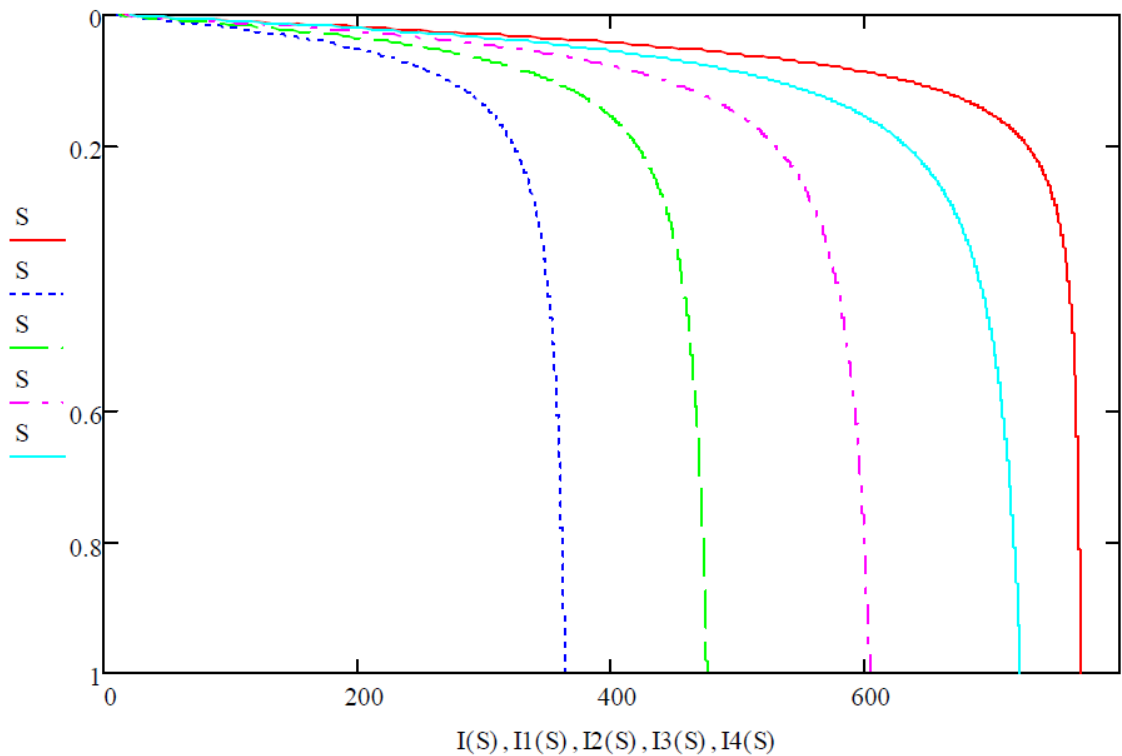


Рисунок 2.8. Сімейство швидкісних характеристик системи ТРН-АД

Розрахунок енергетичних характеристик

Ось приклад формули для розрахунку ККД електропривода з асинхронним двигуном і тиристорним регулятором напруги (ТРН), коли механічні втрати, додаткові втрати й втрати в сталі ротора можна не враховувати:

$$\eta = \frac{M_c \omega}{M_c \omega + \Delta P_{1M} + \Delta P_{2M} + \Delta P_{1c}} \quad (2.27)$$

де: ω – поточна кутова швидкість двигуна;

M_c – статичний момент двигуна.

Втрати в міді статора й ротора можуть бути визначені через діюче значення струму:

$$\Delta P_{1M} = \Delta P_{1M.H} i_{др}^{*2}(S, \alpha) \quad (2.28)$$

$$\Delta P_{2M} = \Delta P_{2M.H} i_2^{*2}(S, \alpha) \quad (2.29)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_c = \Delta P_{1c.H} M_p^*(S, \alpha) \left[B \frac{S_H}{S} + (1 - B) \frac{S}{S_H} \right] \quad (2.30)$$

де: $i_{др}^*(S, \alpha)$ - діюче значення струму статора у відносних одиницях на регульованій характеристиці.

i_2^* - приведені діючі значення струму ротора у відносних одиницях.

$M_p^*(S, \alpha)$ - момент двигуна на регульовальній характеристиці у відносних одиницях.

Значення коефіцієнта B наближається до одиниці і можна приймати рівним 0,96...0,98 для двигунів єдиної серії, 0,94...0,97 — для двигунів краново-металургійних серій.

Представимо отримані сімейства характеристик $\eta = f(S)$.

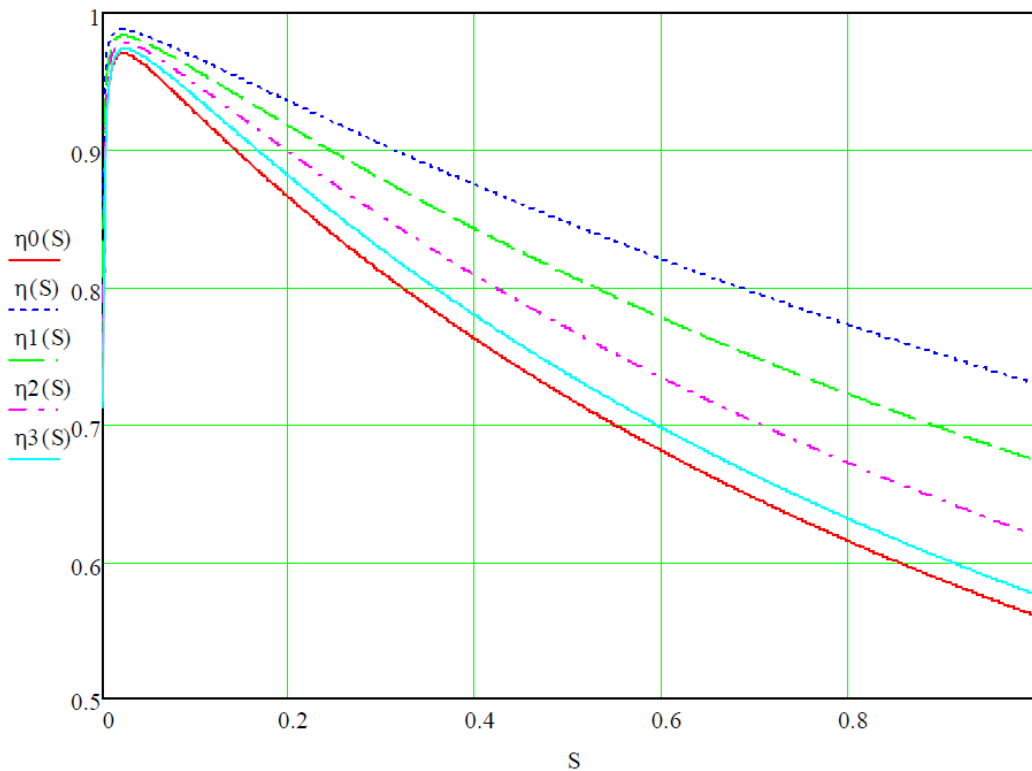


Рисунок 2.9. Сімейство характеристик $\eta = f(S)$ системи ТРН-АД

2.4. Розробка і опис електричної принципової схеми системи керування та її елементної баз.

Сьогодні електроприводні системи впевнено утримують першість серед приводних пристроїв і забезпечують безперебійну, надійну роботу механізмів у різних галузях техніки та побуту. Їх функціональні можливості та експлуатаційні показники суттєво залежать від характеристик систем керування. Провідну роль у сучасних приводах відіграють асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

Сучасний асинхронний електропривод базується на силових напівпровідникових перетворювачах і мікропроцесорному керуванні, що дає змогу регулювати вихідні параметри у широкому діапазоні з високою швидкодією та точністю. Розвиток мікропроцесорних систем керування відкриває шлях до створення нових програмних алгоритмів, які формують широкий набір експлуатаційних характеристик та задовольняють вимоги найрізноманітніших технологічних об'єктів.

Використання цифрового регулятора замість аналогового на практиці засвідчує його значно більшу гнучкість. Це дозволяє реалізувати універсальні багатофункціональні регулятори, які завдяки стандартним алгоритмам можна інтегрувати у складні схеми автоматичного керування.

Принципова схема системи з підлеглим регулюванням надана на рис.2.10.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

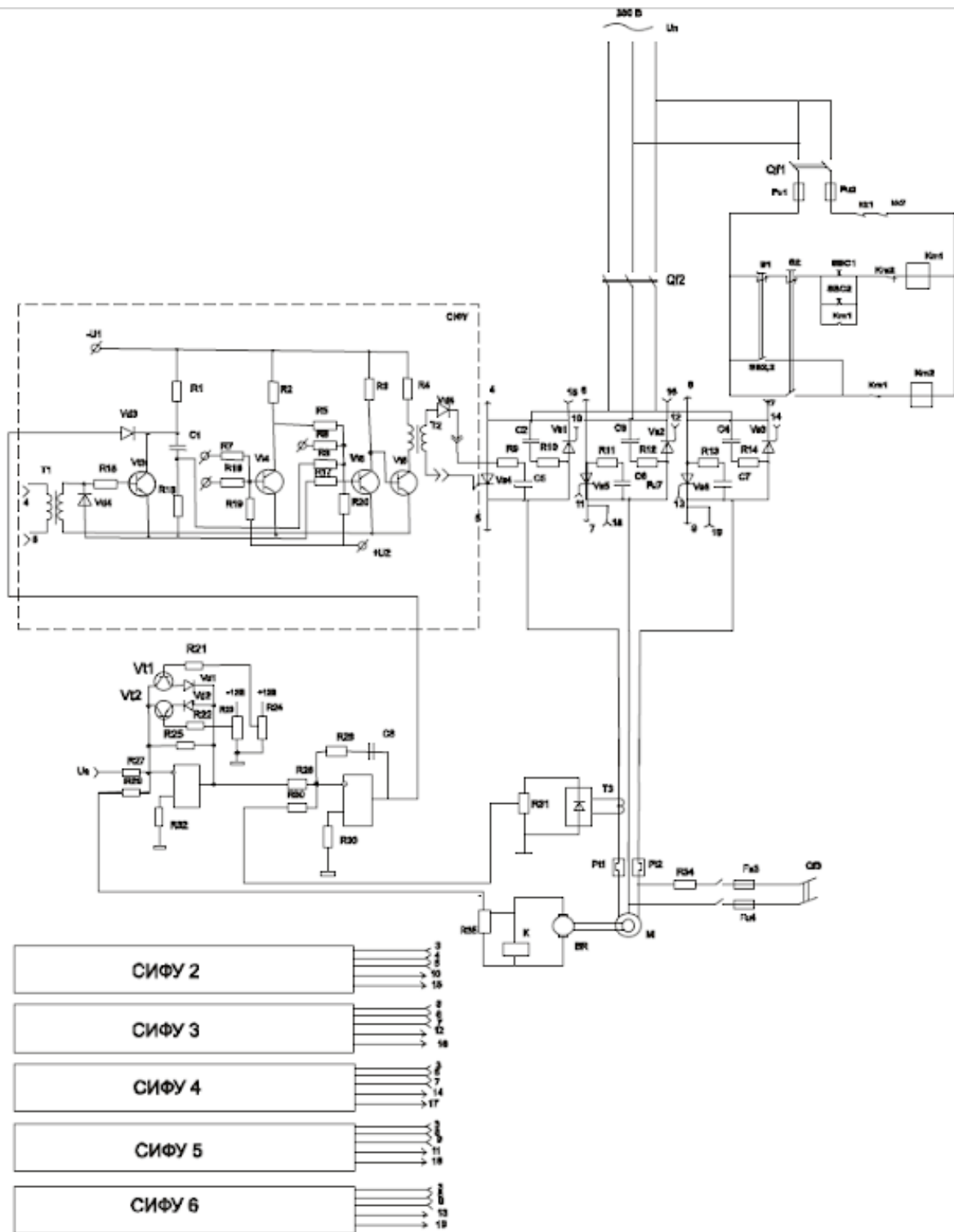


Рисунок 2.10. Електрична принципова схема ЕП за системою ТРН-АД

У схемі СИФУ робота тиристора VS4 реалізується таким чином. З вторинної обмотки фазного трансформатора Т1, підключеного до фази А, через опір R22 подається напруга на базу транзистора VT3.

- **Позитивна півхвиля напруги фази А:**

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- У цей час VT3 залишається закритим.
 - Через опір R23 починає протікати зарядний струм конденсатора C2. Інтенсивність заряду визначається величиною напруги U1 і співвідношенням опорів R23 та R21.
 - При досягненні певного рівня заряду (коли напруга на C2 зрівнюється з опорною U_y) струм заряду припиняється, і напруга на R23 стає близькою до нуля.
 - З моменту припинення заряду і до кінця позитивного напівперіоду сигнали мультівібратора, підсилювані VT5 (який виконує роль проміжного підсилювача для вхідних імпульсів), надходять на базу VT6. Далі вони через вторинну обмотку трансформатора T2 подаються як керуючі імпульси на тиристор VS4.
- **Негативна півхвиля напруги фази А:**
 - Напруга U_a змінює стан VT3: тепер VT3 відкривається і шунтує конденсатор C7, тому струм заряду через R23 не протікає.
 - Щоб запобігти надходженню керуючих імпульсів у цей час, на базу VT5 через діод VD4 та опір R26 подається негативний потенціал. Це призводить до стану, що блокує формування високочастотних імпульсів на VS4.

Транзистор VT4 виконує функцію “ключа”, який дозволяє або забороняє генерацію керуючих імпульсів загалом:

- Якщо на вхід 1 подається рівень “0”, VT4 перебуває в закритому стані, а через опір R18 діє велика негативна напруга, що остаточно забороняє формування імпульсів.
- Коли на вхід 1 подається рівень “1”, VT4 відкривається і дає можливість сигналам мультівібратора (через VT5 → VT6 → T2) надходити на керуючий електрод тиристора VS4.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській роботі проведено дослідження впливу тиристорного регулятора напруги на енергоефективність електричного приводу насосного агрегату, що широко застосовується у промисловості та житлово-комунальному господарстві України. Аналіз світових і вітчизняних досліджень показав актуальність зниження споживання електроенергії в насосних системах, які у великих містах, таких як Кривий Ріг, можуть налічувати тисячі одиниць обладнання.

Проведене моделювання з використанням еквівалентної схеми заміщення асинхронного двигуна дозволило побудувати механічні, електромеханічні характеристики, а також оцінити залежність спожитої електричної енергії від величини прикладеної напруги. Було доведено, що зниження напруги дозволяє суттєво зменшити споживану енергію у режимах часткового навантаження, що особливо ефективно в системах з квадратичним навантаженням (насоси, вентилятори).

Водночас встановлено, що застосування ТРН потребує врахування динамічних властивостей електроприводу, оскільки значне зниження напруги призводить до зменшення пускового моменту та потенційно може вплинути на стійкість процесу. Таким чином, подальші дослідження доцільно зосередити на розробці адаптивних та комбінованих систем керування, що забезпечують баланс між енергоефективністю та надійністю.

Результати роботи можуть бути використані при модернізації систем водопостачання, автоматизації насосних станцій, а також при розробці лабораторних стендів для вивчення енергоощадних режимів електроприводів у закладах вищої освіти.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Кочубей В.			Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.						
Н. Контр.		Пересунько І.			КНУ гр. ЕЕМ-21-1			
Затвердж.		Пересунько І.						

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гнатушенко В.В. Сучасні проблеми енергозбереження в житлово-комунальному господарстві України // Комунальне господарство міст. – 2021. – № 5. – С. 45–50.
2. Павленко А.М. Особливості експлуатації насосного обладнання в гірничорудній промисловості України // Гірничий журнал. – 2022. – № 3. – С. 34–40.
3. Шевченко І.М. Вибір насосного обладнання для металургійної промисловості // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2021. – № 4. – С. 112–118.
4. Білоусов О.А. Насосне обладнання для хімічної промисловості: огляд рішень і технологій // Хімічна промисловість України. – 2022. – № 2. – С. 78–85.
5. Energy Efficiency in Industrial Applications. – IEA, 2023. <https://www.iea.org/topics/energy-efficiency>
6. Udovichenko V., Kazakbaev A., Ma F. Review and analysis of energy-efficient AC voltage regulators for induction motor drives // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 20. – P. 7136–7158. – DOI: 10.3390/en16207136.
7. Goman M., Digalakis J., Koutroulis E. Energy efficiency analysis of fixed-speed pump drives with various types of motors // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – Vol. 34, № 4. – P. 1923–1932. – DOI: 10.1109/TEC.2019.2908894.
8. Khamzaev K., Aliev R., Ospanov T. Impact of thyristor regulators on distribution power flows // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 439. – Art. 01011. – DOI: 10.1051/e3sconf/202443901011.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
		Розробив <i>Кочубей В.</i>		
		Перевірів <i>Пересунько І.</i>		
		Н. Контр. <i>Пересунько І.</i>		
		Затвердж. <i>Пересунько І.</i>		
Список використаних джерел				
		Літ.	Арк.	Акрушів
		41	3	
КНУ гр. ЕЕМ-21-1				

9. Zhang Y., Li H., Wang L. Adaptive phase-angle control of triac voltage regulators for centrifugal pump efficiency // IET Electric Power Applications. – 2023. – Vol. 17, № 7. – P. 978–989. – DOI: 10.1049/elp2.12345.
10. Moreno P., García-Sanz M. Intelligent thyristor control for energy-saving industrial pumps // ISA Transactions. – 2022. – Vol. 124. – P. 540–551. – DOI: 10.1016/j.isatra.2022.03.015.
11. Silva L., Costa R. Comparative study of AC voltage regulation topologies for large-power pump motors // Journal of Power Electronics. – 2021. – Vol. 21, № 6. – P. 1679–1690. – DOI: 10.1007/s43236-021-00223-8.
12. Ehlers T., Schmidt K. Harmonic mitigation in thyristor-controlled induction-motor drives // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Vol. 56, № 5. – P. 5449–5458. – DOI: 10.1109/TIA.2020.3008122.
13. Santos-Martín D., Álvarez-González E. AC voltage controllers with capacitor dividers for pump-drive compensation // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, № 11. – Art. 2092. – DOI: 10.3390/sym15112092.
14. Okafor C., Udeh S. Energy-optimised induction motor drives for water-supply pumping stations // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8(Suppl.). – P. 288–298.
15. El-Kholy E. Soft-starter versus triac voltage controller in municipal pump applications // Electric Power Components and Systems. – 2021. – Vol. 49, № 10. – P. 937–948. – DOI: 10.1080/15325008.2021.1906286.
16. Patil S., Kulkarni A. Modeling of induction-motor pump drive under reduced-voltage operation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 121. – Art. 106049. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106049.
17. Lee J.-H., Kim S.-H. Neural-network-based efficiency optimisation of AC voltage-controlled pumps // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 1047–1064. – DOI: 10.3390/app13021047.
18. Rajić M., Milinković D. Influence of reduced supply voltage on asynchronous motors in mining pumps // Mining Engineering. – 2022. – Vol. 74, № 3. – P. 241–250.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк. 42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Boros Z., Varga L. Energy-saving control strategies for large irrigation pumps using thyristor AC regulators // *Biosystems Engineering*. – 2021. – Vol. 208. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.06.011.
20. Correa A., de Almeida A. Lifecycle energy assessment of voltage-controlled pump drives // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. – 2024. – Vol. 186. – Art. 113892. – DOI: 10.1016/j.rser.2023.113892.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-5	Арк.
						43
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		