

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний  
(факультет)

Кафедра Електропривода  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

дипломної роботи

магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань 14 Електрична інженерія  
(шифр і назва галузі знань)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

освітній рівень магістр

(назва освітнього рівня)

Кваліфікація 2151.2 (Int) Інженер-електромеханік  
(код і назва кваліфікації)

на тему: **Оптимізація режимів роботи частотно-регульованого електроприводу  
дротяного волочильного стану.**

Виконавець:

Студент 6 курсу, групи 141м-16-4

Євтушенко Д.Є.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	Казачковський М.М.		
розділів:			
Технологічний	Казачковський М.М.		
Автоматизований електропривод	Казачковський М.М.		
Моделювання	Казачковський М.М.		
Рецензент	Ципленков Д.В.		
Нормоконтроль	Казачковський М.М.		

Дніпропетровськ  
2018

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

---

---

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри  
Електроприводу  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Казачковський  
\_\_\_\_\_ М.М.  
(підпис) (прізвище,  
ініціали)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017  
року

**ЗАВДАННЯ**  
на виконання кваліфікаційної роботи магістра  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)  
(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та  
електропривод»)

студенту 141М-16-4 Євтушенко Д.Є.  
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи:

Оптимізація режимів роботи частотно-регульованого електроприводу  
дротяного волочильного стану

**1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ**

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

**2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ**

**Об'єкт досліджень** електропривод дротяного волочильного стану SKET 2500/5.

**Предмет досліджень** режим роботи частотно-регульованого електроприводу дротяного волочильного стану.

**Мета НДР** збільшення продуктивності стану, шляхом оптимізації режиму роботи дротяного волочильного стану SKET 2500/5/

**Вихідні дані для проведення роботи** — технічна документація Стана SKET 2500/5, виробнича та переддипломна практика, спеціалізована література.

**3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ**

**Практична цінність** — збільшення продуктивності стану, зменшення обривності дроту.

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Обґрунтування доцільності використання оптимізованого режиму роботи частотно-регульованого електроприводу дротяного волочильного стану

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Технологічний розділ	12.09.2017 – 16.10.2017
Автоматизований електропривод	18.10.2017 – 12.12.2017
Моделювання	15.12.2017 – 15.01.2018

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Відповідність оформлення ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення

Завдання видав \_\_\_\_\_

(підпис)

Казачковський М.М.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

Євтушенко Д.Є.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Термін подання дипломної роботи до ЕК \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Данная магистерская работа состоит из пояснительной записки 60 стр., 11 рисунков, 9 таблиц, 15 презентационных слайдов.

Объектом исследования является электропривод проволочно-волоочильного стана типа SKET 2500/5. Система управления которого осуществлена по системе частотный преобразователь – асинхронный двигатель (ПЧ-АД).

В процессе выполнения работы был проведен анализ существующего режима работы электроприводов и маршрута волочения проволоки.

После чего, был предложен оптимизированный режим работы и маршрут волочения проволоки. И соответственно, проведен анализ оптимизации.

Для проверки расчетов оптимизированного режима работы электроприводов и маршрута волочения была разработана математическая модель волоочильного стана типа SKET 2500/5 в пакете MatLab (Simulink). Система управления электроприводами осуществляется по системе ПЧ-АД с векторным регулированием скорости.

В результате моделирование были получены мощности приводов, линейные скорости каждого из барабанов и производительность стана за период времени.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ  
ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ПРОВОЛОЧНО ВОЛОЧИЛЬНЫЙ СТАН  
МАРШРУТ ВОЛОЧЕНИЯ

## РЕФЕРАТ

Ця магістерська робота складається з пояснювальної записки 60 стр., 11 малюнків, 9 таблиць, 15 презентаційних слайдів.

Об'єктом дослідження є електропривод дротяного волочильного стану типу SKET 2500/5. Система управління якого здійснена по системі частотний перетворювач - асинхронний двигун (ПЧ-АД).

В процесі виконання роботи був проведений аналіз існуючого режиму роботи електроприводів і маршруту волочіння дроту.

Після чого, був запропоновано оптимізований режим роботи і маршрут волочіння дроту. І відповідно, проведений аналіз оптимізації.

Для перевірки розрахунків оптимізованого режиму роботи електроприводів і маршруту волочіння була розроблена математична модель волочильного стану типу SKET 2500/5 в пакеті MatLab (Simulink). Система управління електроприводами здійснюється за системою ПЧ-АД з векторним регулюванням швидкості.

В результаті моделювання були отримані потужності приводів, лінійні швидкості кожного з барабанів і продуктивність стану за період часу.

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ АСИНХРОННИЙ ДВИГУН ВЕКТОРНЕ  
УПРАВЛІННЯ ГРУПОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ВОЛОЧІННЯ ДРОТУ  
ДРОТЯНИЙ ВОЛОЧИЛЬНИЙ СТАН МАРШРУТ ВОЛОЧІННЯ

## REPORT

This master's degree work consists of explanation message 60 of page, 11 pictures, 9 tables, 15 presentation sliding seats.

A research object is a drive of wire drawbench of type of SKET 2500/5. Control system of that is carried out on the system a frequency convertor is an asynchronous engine(FC-AM).

In the process of implementation of work, the analysis of the existent mode of operations of drive and route of dragging of wire was conducted.

Whereupon, the optimized office hours and route of dragging of wire were offered. And accordingly, the analysis of optimization is conducted.

For verification of calculations of the optimized mode of operations of drive and route of dragging the mathematical model of drawbench of type of SKET 2500/5 was worked out in the package of MatLab(Simulink). Control system by drive comes true by system of FC-AM with the vectorial control of speed.

As a result, design powers of drives, linear speeds of each of drums and productivity of figure, were got for period of time.

FREQUENCY CONVERTOR, ASYNCHRONOUS ENGINE, GROUP DRIVE, WIRE DRAWBENCH.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Технологічна частина .....	10
1.1 Технологія волочіння .....	11
1.2 Дротяно-волочильний стан типу SKET 2500/5 .....	14
1.3 Вимога до електроприводу дротяно-волочильних станів.....	17
1.4 Постановка задачі дослідження.....	19
2. Автоматизований електропривод.....	20
2.1 Розрахунок потужності протягання дроту вихідного маршруту волочіння.....	21
2.2 Розрахунок потужності протягання оптимізованого маршруту волочіння.....	30
2.3 Висновок розрахунків.....	39
3. Моделювання.....	42
3.1 Опис математичної моделі електроприводу волочильного стану та механічної частини.....	43
3.2 Результати моделювання математичної моделі стану .....	52
ВИСНОВОК.....	55
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	56

## Вступ

Сучасні вимоги розвитку техніки, будівництва і розширення попиту металообробних галузей економіки зумовили прискорене зростання і розвиток прогресивних напрямів у виробництві дроту і виробів з нього. Особлива роль у виконанні цього важливого завдання належить волочильному виробництву. Процес волочіння є одним з найбільш економічних видів механічної обробки металів. Збільшення випуску дроту здійснюється як за рахунок розширення парку машин волочильних станів, так і шляхом підвищення продуктивності.

Якщо простежити еволюцію станів багатократного волочіння, то вона зводиться до виявлення досконалішого способу синхронізації швидкостей дроту в усіх проходах стану і боротьбі з істотними недоліками попередніх конструкцій і технологій. Основний принцип безперервного багатократного волочіння дроту полягає в постійності секундних об'ємів металу в усіх переходах волочильного стану, де через кожну його волоку повинен проходити однаковий об'єм металу в одиницю часу. Здійснення цього принципу на практиці із самого початку зажадало забезпечення в тому або іншому ступені синхронізації швидкостей барабанів, що тягнуть. Пошук найкращого вирішення цього питання триває і нині. Найпростіші багатократні стани безперервної дії працюють за неповним способом узгодження швидкостей - з ковзанням дроту на барабанах, що тягнуть, при якому окружна швидкість на кожному проміжному барабані має бути завжди дещо більше швидкості руху дроту на цьому барабані. Проте ковзання дроту по барабану особливе небажано при багатократному волочінні жорстких або дуже в'язких металів або сплавів. Спостерігається швидкий знос барабанів. Стани з ковзання мають підвищену витрату енергії на тертя, у них немає можливості варіювати обтисканнями в переходах зважаючи на постійність кінематичних витягів. Оскільки з моменту появи способу волочіння з ковзанням не було знайдено найбільш оптимального методу повної синхронізації швидкостей руху дроту і барабанів, що тягнуть, були створені стани магазинного типу з

					ЕП.МР.18.05.В	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



накопиченням дроту на проміжних барабанах і верхнім зніманням дроту з барабана. Проте і в станах такого типу потрібна синхронізація за швидкістю усіх барабанів. У цьому дипломному проекті розглядається конкретний стан за принципом накопичення дроту на проміжних барабанах. Продуктивність цього стану низька із-за досить частих обривів дроту і перевантаження двигунів, що спричиняє за собою псування елементів управління і самих двигунів. Тому метою цього проекту є оптимізація режимів роботи частотно-регульованого електроприводу волочильного стану, що будуть забезпечувати підвищення продуктивності за рахунок збільшення швидкості волочіння дроту і зниження обривів в технологічних режимах, та зниження енергоспоживання.

					<i>ЕП.МР.18.05.В</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

# 1. Технологічна частина

					<i>ЕП.МР.18.05.1</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Технологічна частина</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>							<i>10</i>	<i>57</i>
<i>Перевір.</i>								
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>						<i>141м-16-4 НГУ</i>		

## 1.1 Технологія волочіння

Процес волочіння дроту належить до основних технологічних операцій дротяного виробництва і полягає в простяганні підготовленого металу – заготівлі 1 через отвір волочильного інструменту, що звужується, – волюки 2 (рис. 1).

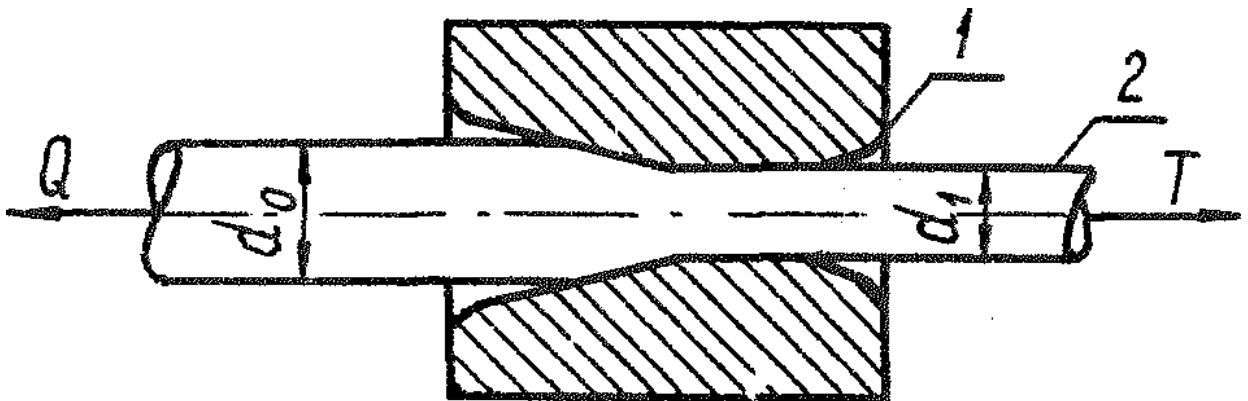


Рисунок 1 — Схема сил при волочінні дроту.

З приведеної на рисунку 1 схеми видно, що в результаті простягання під впливом сили  $T$ , що називається силою волочіння, дріт подовжується. При цьому поперечний переріз зменшується, а об'єм металу до і після волочіння залишається постійним.

Позначивши через  $d_0$ ,  $l_0$ ,  $s_0$  відповідно діаметр, довжину і площу поперечного перерізу, а через,  $d_1$ ,  $l_1$ ,  $s_1$  - діаметр, довжину і площу поперечного перерізу після волочіння визначимо основні параметри даного процесу. До параметрів відносяться: обтискання і подовження. Під обтисканням розуміється різниця перерізів до волочіння і після волочіння. Розрізняють абсолютне обтискання:

$$\delta_{абс} = s_0 - s_1'$$

і відносне обтискання:

					ЕП.МР.18.05.1	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta = \frac{s_0 - s_1}{s_0} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2}.$$

Відносно обтискання може бути виражене у відсотках. Під подовженням розуміється різниця довжин після волочіння і до волочіння.

Абсолютне подовження

$$\lambda_{абс} = l_0 - l_1.$$

Відносне подовження

$$\lambda = \frac{l_0 - l_1}{l_0}.$$

Відносно подовження може бути виражене у відсотках.

Виходячи з умов постійності об'єму що піддається волочінню дроту визначається зв'язок між виразами, приведеними раніше:

$$\delta = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} = \frac{\lambda}{1 + \lambda};$$

$$\lambda = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} = \frac{\delta}{1 - \delta}.$$

У сучасному дротяному виробництві дріт виготовляють із сталі різноманітних марок від технічно чистого заліза до високо вуглецевих, високолегованих прецизійних сплавів; волочінням отримують дроти різні за формою і розмірам поперечного перерізу; круглий сталевий дріт виготовляється діаметрів от 0,005 до 25 мм.

Для виконання процесу волочіння дроту, такої різноманітної номенклатури по марках сталі і великому діапазону по розмірах,

					<i>ЕП.МР.18.05.1</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовуються барабанні волочильні стани різних типів. Усі вони незалежно від їх ділення на різні групи за способом волочіння, розмірами дроту, що простягається, і іншими конструктивними особливостями складаються з наступних основних вузлів: барабану, який протягує дріт, що складається з редуктора, через який передається обертання від електродвигуна до барабана, приводного електродвигуна постійного або змінного струму, зчленованого з редуктор за допомогою еластичної муфти або клиноремінної передачі; щита станцій управління і пульта управління.

					<i>ЕП.МР.18.05.1</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		13

## 1.2 Дротяно-волоочильний стан типу SKET 2500/5

Дротяно-волоочильний стан типу UDZSA SKET 2500/5 є звичайним станом для волочіння дроту блокового виконання, що складається з п'яти блоків. Волоочильний барабан розташований вертикально і працює за принципом накопичення дроту, і без ковзання. Стани такого типу призначені переважно для волочіння сталевого дроту, але вони також можуть бути використані для волочіння дроту з міді, алюмінію.

Кожен блок складається з нижче приведених основних вузлів:

- приводний електродвигун;
- коробка швидкостей/передач;
- станина верстата;
- утримувач волоочильного інструменту;
- барабан для волочіння дроту;
- захисні ґрати обгороджування.

Привід кожного поодинокого блоку здійснюється за допомогою закріпленого анкерними болтами на фундаменті 3-х фазного електродвигуна з контактними кільцями через клиновидні ремені на 4-х ступінчасту коробку передач. Від цієї коробки момент, що крутить, передається на волоочильний вал через змінні циліндричні шестерні і одну пару конічний шестерень. Дріт проходить у верстат з лівого боку; перед верстатом встановлюється пристрій для розмотування дроту. Регульовані в 2-х площях утримувачі волоочильного інструменту розділені у баку для мастильного засобу і у водяному баку. Волоочильний барабан і волоочильний інструмент охолоджуються водою, кількість охолоджувальної води, що проходить, можна окремо регулювати/настроювати.

					ЕП.МР.18.05.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

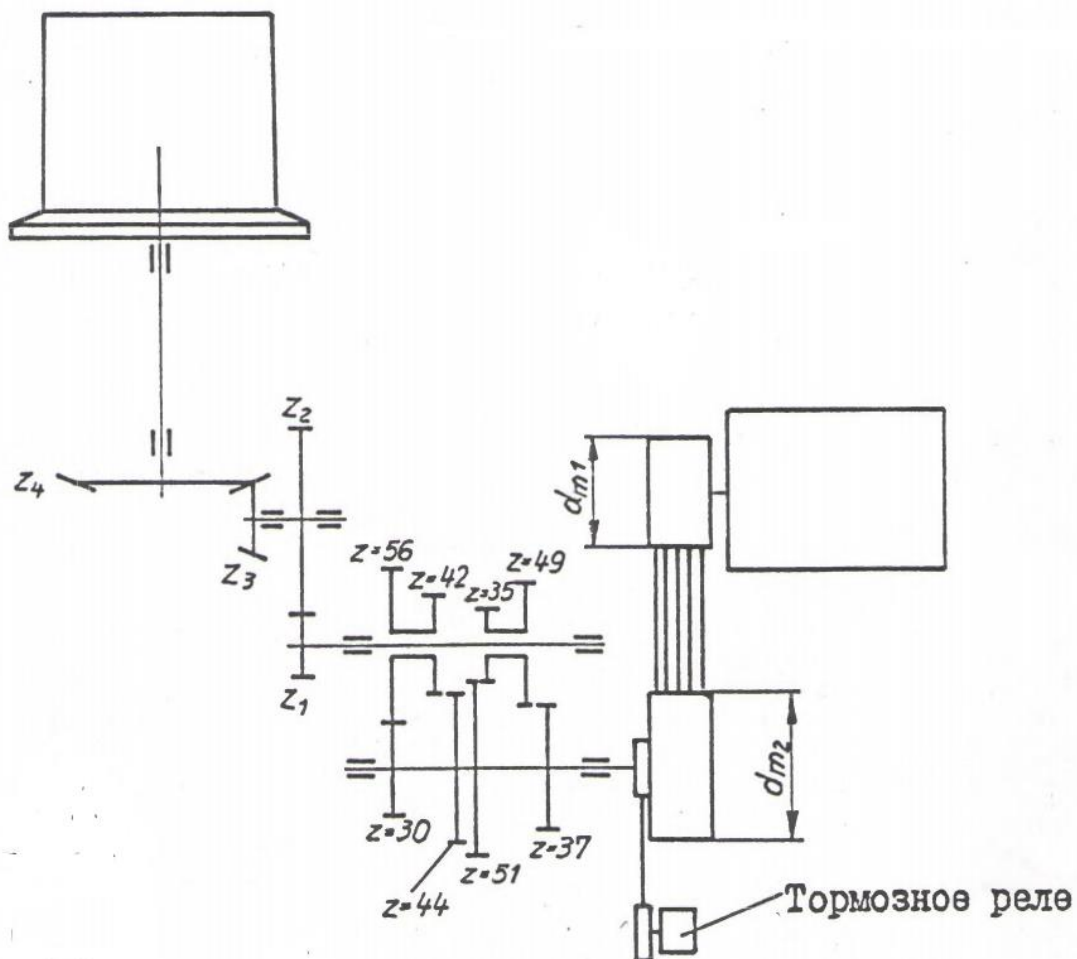


Рисунок 2 — Кінематична схема приводу одного блоку волочильного стану SKET2500/5.

В табл. 1 приведені параметри кінематичної схеми приводу.

Таблица 1. Параметры кінематичної схеми.

Блоки	1	2	3	4	5
$d_{m1}/d_{m2}$	320/320	320/320	320/320	320/320	320/320
$z_1/z_2$	24/69	27/66	30/63	33/60	36/57
$z_3/z_4$	14/47	14/47	14/47	14/47	14/47
$n_4$	223.1	262.6	305.9	353	528.9

У стані використовувалися 3-х фазні асинхронні двигуни типу SPR 250 M4, потужність якого дорівнює 55 кВт. Такий двигун був встановлений в кожному блоці стану. У цьому стані отримання заправної швидкості і перехід від неї до робочої швидкості здійснюється за рахунок пониження моменту двигуна, що обертає, шляхом послідовного включення в ланцюг статора пускового опору відповідної величини. При цьому напруга, що підводиться до затисків статора, знижується пропорційно величині введеного в його ланцюг опору. А оскільки момент двигуна, що обертає, пропорційний квадрату підведеної до його затисків напруги, те необхідне зниження названого моменту визначається значенням пускового опору.

Після вимушеної модернізації стану, була зроблена заміна електричної частини стану. Замість старих асинхронних двигунів були встановлені нові двигуна типу АИР, параметри яких приведені нижче, в таблицях. Управління здійснюється за допомогою індивідуальних перетворювачів частоти.

Параметри двигуна для першої кліті приведені в табл.2.

Таблиця 2. Параметри двигунів стана.

Номер кліті	Двигун	Потужність	Об/хв	Струм при 380В, А	Коеф, потужності	$I_n/I_H$	$M_n/M_H$	$M_{max}/M_H$	J
1	АИР225М4	55 кВт	1480	93	0,87	7,2	2,2	2,3	0,2
2	АИР200L4	45 кВт	1475	84.9	0,87	7,2	2,2	2,3	0,18
3	АИР200М4	37 кВт	1470	70	0,87	7,2	2,2	2,3	0,15
4	АИР200М4	37 кВт	1470	70	0,87	7,2	2,2	2,3	0,15
5	АИР200М4	37 кВт	1470	70	0,87	7,2	2,2	2,3	0,15

Як було вже сказано, стан працює за принципом накопичення дроту на проміжних барабанах. Під час такого режиму роботи, синхронізація швидкостей дроту не ідеальна, оскільки електропривод кожного барабана індивідуальний і не взаємозв'язаний між сусідніми барабанами. Накопичення

					ЕП.МР.18.05.1				Арк.
									16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



дроту на барабанах дає можливість використати невелику погрішність в підборі швидкостей. Найчастіше, волочильник на око підбирає швидкість кожного барабана вручну. Під час підбору швидкостей іноді відбувається розрив дроту. Ці заходи помітно уповільнюють процес виготовлення дроту, хоча стан забезпечений сучасним обладнанням.

					<i>ЕП.МР.18.05.1</i>	<i>Арк.</i>
						17
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

### 1.3 Вимога до електроприводу дротяно-волоочильних станів

Усі елементи, що входять до складу електроприводу, повинні задовольняти наступним основним вимогам, які витікають з технології процесу волочіння:

- В період заправки стану, пов'язаного з первинними операціями простягання дроту через отвір волоки і намотування її на барабани, швидкість має бути значно нижча робочої швидкості і не перевищувати 30-50 м/хв з тим, щоб уникнути можливих обривів дроту, відривів витяжних кліщів, нещасних випадків з обслуговуючим персоналом. Розгін двигуна із стану спокою до заправної швидкості з тих самих причин повинен здійснюватися плавно.
- Перехід на робочу швидкість волочіння повинен здійснюється плавно, щоб уникнути можливого обриву дроту і необхідний при цьому трудомісткої пере заправки стану і зниження його продуктивності.
- Система налаштування і регулювання робочої швидкості повинна дозволяти здійснювати безступінчасте регулювання в діапазоні, визначуваному сортаментом по марці стали і розмірам дроту, що підлягає волочінню на цьому стані, і розрахунковими параметрами технологічного процесу волочіння (швидкість, одиничні і сумарні обтискання).

Разом з викладеними вище вимогами необхідно враховувати наступне: в дротяних цехах, де виконується процес волочіння на волоочильних станах, виділяється велика кількість пилу, частки вапна, мильного порошку, що містить, металеві частки. Проникнення цього пилу в електродвигуни і апаратуру управління викликає передчасний вихід з ладу і обумовлений цим простий волоочильних станів. З цієї причини необхідно встановлювати електродвигуни в захищеному виконанні, що продуваються; апаратуру управління розміщувати в пилонепроникних шафах і пультах управління.

					<i>ЕП.МР.18.05.1</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

## 1.4 Постановка задачі дослідження

Після дослідження електричної частини стану і проаналізувавши проблеми, що виникають під час волочіння дроту, такі як: обрив дроту, перевантаження двигунів, поставлені наступні задачі:

- Збільшити продуктивність стану шляхом оптимізації режиму роботи волочильного стану.
- Зменшити обривність дроту.
- Зменшити енергоспоживання, збільшивши ККД електродвигунів стану.

Критерієм оцінювання буде коефіцієнт, який показує кількість електроенергії, що витрачається, на одиницю продукції.

					ЕП.МР.18.05.1	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. Автоматизований електропривод

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.МР.18.05.2			
Розроб.					Автоматизований електропривод волоочильного стану типу SKET 2500/5	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.							20	57
Реценз.						141м-16-4 НГУ		
Н. Контр.								
Затверд.								

## 2.1 Розрахунок потужності протягання дроту вихідного маршруту волочиння

Для дослідження був наданий маршрут волочиння, який використовується на цьому стані. Особливість маршруту в тому, що використовуються чотири барабани з п'яти можливих. Швидкість останнього барабана дорівнює 4,7 м/с.

Маршрут волочиння:

$$6,5 - 5,7 - 5,0 - 4,5 - 4 \text{ (мм)}.$$

Межа міцності матеріалу:

$$\sigma_0 = 900 \text{ кН/мм}^2.$$

Число протягань:

$$n = 4.$$

Межа міцності після першого протягання:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср}}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум}}}, \quad (2.1)$$

де 3,16 – множник, що враховує вираження межі міцності в ньютонках;  
 $\delta_{\text{ед.ср}}$  – одиничне середнє обтискання заданого маршруту волочиння;  $\delta_{\text{сум}}$  – сумарне обтискання після усіх протягань;  $n$  – число протягань по заданому маршруту волочиння.

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta_{\text{ед.ср1}} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2}, \quad (2.2)$$

$$\delta_{\text{ед.ср1}} = \frac{6,5^2 - 5,7^2}{6,5^2} = 0,23.$$

$$\sigma_1 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{900}{1-0,23}} \cdot 1 \cdot 0,23 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,23} = 1043 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{ср1}} = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}, \quad (2.3)$$

$$\sigma_{\text{ср1}} = \frac{900 + 1043}{2} = 971 \text{ Н/мм}^2.$$

Межа міцності після другого протягання:

$$\delta_{\text{ед.ср2}} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2}, \quad (2.4)$$

$$\delta_{\text{ед.ср2}} = \frac{5,7^2 - 5,0^2}{5,7^2} = 0,23.$$

$$\delta_{\text{сум.2}} = \frac{d_0^2 - d_2^2}{d_0^2}, \quad (2.5)$$

$$\delta_{\text{сум.2}} = \frac{6,5^2 - 5,0^2}{6,5^2} = 0,41.$$

$$\sigma_2 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср2}}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср2}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.2}}}, \quad (2.6)$$

$$\sigma_2 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{900}{1 - 0,23}} \cdot 2 \cdot 0,23 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,41} = 1156, \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{ср2}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\text{ср2}} = \frac{1043 + 1156}{2} = 1099, \text{ Н/мм}^2.$$

Межа міцності після третього протягання:

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta_{\text{ед.ср3}} = \frac{d_2^2 - d_3^2}{d_2^2}, \quad (2.8)$$

$$\delta_{\text{ед.ср3}} = \frac{5,0^2 - 4,5^2}{5,0^2} = 0,19.$$

$$\delta_{\text{сум.3}} = \frac{d_0^2 - d_3^2}{d_0^2}, \quad (2.9)$$

$$\delta_{\text{сум.3}} = \frac{6,5^2 - 4,5^2}{6,5^2} = 0,52.$$

$$\sigma_3 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср3}}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср3}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.3}}}, \quad (2.10)$$

$$\sigma_3 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{900}{1 - 0,19}} \cdot 3 \cdot 0,19 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,52} = 1205, \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{ср3}} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}, \quad (2.11)$$

$$\sigma_{\text{ср3}} = \frac{1156 + 1205}{2} = 1180, \text{ Н/мм}^2.$$

Межа міцності після четвертого протягання:

$$\delta_{\text{ед.ср4}} = \frac{d_3^2 - d_4^2}{d_3^2}, \quad (2.12)$$

$$\delta_{\text{ед.ср4}} = \frac{4,5^2 - 4^2}{4,5^2} = 0,21.$$

$$\delta_{\text{сум.4}} = \frac{d_0^2 - d_4^2}{d_0^2}, \quad (2.13)$$

$$\delta_{\text{сум.4}} = \frac{6,5^2 - 4^2}{6,5^2} = 0,62.$$

$$\sigma_4 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср4}}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср4}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.4}}}, \quad (2.14)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_4 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{1000}{1 - 0,21}} \cdot 4 \cdot 0,21 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,62} = 1329, \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{ср}4} = \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{2}, \quad (2.15)$$

$$\sigma_{\text{ср}4} = \frac{1205 + 1329}{2} = 1267, \text{ Н/мм}^2.$$

Сила волочіння на кожному протяганні:

$$F_1 = 0.6 \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср}1}} \cdot \sigma_{\text{ср}1}, \quad (2.16)$$

$$F_1 = 0.6 \cdot 6,5^2 \cdot \sqrt{0,23} \cdot 971 = 11837, \text{ Н}$$

$$F_2 = 0.6 \cdot d_1^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср}2}} \cdot \sigma_{\text{ср}2}, \quad (2.17)$$

$$F_2 = 0.6 \cdot 5,7^2 \cdot \sqrt{0,23} \cdot 1254,18 = 10295, \text{ Н}$$

$$F_3 = 0.6 \cdot d_2^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср}3}} \cdot \sigma_{\text{ср}3}, \quad (2.18)$$

$$F_3 = 0.6 \cdot 5,0^2 \cdot \sqrt{0,19} \cdot 1180 = 7721, \text{ Н}$$

$$F_4 = 0.6 \cdot d_3^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср}4}} \cdot \sigma_{\text{ср}4}, \quad (2.19)$$

$$F_4 = 0.6 \cdot 4,5^2 \cdot \sqrt{0,21} \cdot 1267 = 7052, \text{ Н}$$

Для визначення необхідної потужності на кожне протягання необхідно знати лінійну швидкість дроту після кожного протягання. Задана швидкість відноситься до виходу дроту з останньої волоки на останній барабан (бабину). Для визначення швидкостей кожного з попередніх барабанів користуються формулою:

$$v_{k-1} = \frac{d_k^2 \cdot v_k}{d_{k-1}^2}, \quad (2.20)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$v_4 = 4,7, \text{ м/с}$  – скорость на последнем барабане, которой мы задались.

$$v_3 = \frac{d_4^2 \cdot v_4}{d_3^2}, \quad (2.21)$$

$$v_3 = \frac{4^2 \cdot 4,7}{4,5^2} = 3,7, \text{ м/с.}$$

$$v_2 = \frac{d_3^2 \cdot v_3}{d_2^2}, \quad (2.21)$$

$$v_2 = \frac{4,5^2 \cdot 3,7}{5,0^2} = 3, \text{ м/с.}$$

$$v_1 = \frac{d_2^2 \cdot v_2}{d_1^2}, \quad (2.23)$$

$$v_1 = \frac{5^2 \cdot 3}{5,7^2} = 2,3, \text{ м/с.}$$

Потужність кожного протягання розраховується за наступною формулою:

$$P_1 = \frac{F_1 \cdot v_1}{\eta}, \quad (2.24)$$

$$P_1 = \frac{11837 \cdot 2,3}{0,9} = 30352, \text{ Вт.}$$

$$P_2 = \frac{F_2 \cdot v_2}{\eta}, \quad (2.25)$$

$$P_2 = \frac{10295 \cdot 3}{0,9} = 34307, \text{ Вт.}$$

$$P_3 = \frac{F_3 \cdot v_3}{\eta}, \quad (2.26)$$

$$P_3 = \frac{7721 \cdot 3,7}{0,9} = 31765, \text{ Вт.}$$

$$P_4 = \frac{F_4 \cdot v_4}{\eta}, \quad (2.27)$$

$$P_4 = \frac{7052 \cdot 4,7}{0,9} = 36721, \text{ Вт.}$$

					<i>ЕП.МР.18.05.2</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Повна потужність двигунів:

$$S_1 = \frac{P_1}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.28)$$

$$S_1 = \frac{30352}{0,9 \cdot 0.83} = 39534, \text{ ВА.}$$

$$S_2 = \frac{P_2}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.29)$$

$$S_2 = \frac{34307}{0,9 \cdot 0.89} = 42594, \text{ ВА.}$$

$$S_3 = \frac{P_3}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.30)$$

$$S_3 = \frac{31765}{0,9 \cdot 0.89} = 39438, \text{ ВА.}$$

$$S_4 = \frac{P_4}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.31)$$

$$S_4 = \frac{36721}{0,9 \cdot 0.89} = 45591, \text{ ВА.}$$

Сума повних потужностей всіх двигунів за робочу зміну (для розрахунку було використано 6 годин):

$$S = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) \cdot 6 \quad (2.32)$$

$$S = (39534 + 42594 + 39438 + 45591) \cdot 6 = 1002956,82, \text{ ВА}$$

Довжина дроту, який проходить на кожному барабані за 1 секунду:

$$l_1 = 2,3, \text{ м}$$

$$l_2 = 3, \text{ м}$$

$$l_3 = 3,7, \text{ м}$$

$$l_4 = 4,7, \text{ м}$$

Розрахунок об'єму дроту який проходить на барабані за 1 секунду:

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_1, \quad (2.33)$$

$$V_1 = \frac{3,1415 \cdot 5,7^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 2,3 = 0,00005889, \text{ м}^3.$$

$$V_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_2, \quad (2.34)$$

$$V_2 = \frac{3,1415 \cdot 5,0^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 0,00005889, \text{ м}^3.$$

$$V_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_3, \quad (2.35)$$

$$V_3 = \frac{3,1415 \cdot 4,5^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 3,7 = 0,00005889, \text{ м}^3.$$

$$V_4 = \frac{\pi \cdot d_4^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_4, \quad (2.36)$$

$$V_4 = \frac{3,1415 \cdot 4^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,00005889, \text{ м}^3.$$

Розрахунок маси дроту на барабані за 1 секунду, при густині дроту рівній  $7800 \text{ кг/м}^3$ :

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = \rho \cdot V_1, \quad (2.37)$$

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 7800 \cdot 0,00005889 = 0,46, \text{ кг.}$$

Продуктивність стану за зміну:

$$\Pi = m_1 \cdot 6 \cdot 3600 \quad (2.38)$$

$$\Pi = 0,46 \cdot 6 \cdot 3600 = 9921,12, \text{ кг/зміну}$$

Коефіцієнт, що показує споживану електроенергію на одиницю виготовленої продукції:

$$K = \frac{S}{\Pi}, \quad (2.39)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K = \frac{1002956,82}{9921,12} = 101,09, \text{ ВА/кг.}$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 3.

Табл. 3. Результати розрахунків.

Маршрут волочиння: 6,5 – 5,7 – 5,0 – 4,5 – 4.					
Параметр	Одиниця вимірювання	Номер секції			
		1	3	4	5
Потужність двигуна	кВт	55	37	37	37
Одиничне обтискання		0,23	0,23	0,19	0,21
Межа міцності	Н/мм <sup>2</sup>	1043	1156	1205	1329
Сумарне обтискання		0,23	0,41	0,52	0,62
Середня межа міцності	Н/мм <sup>2</sup>	971	1099	1180	1267
Сила волочиння	Н	11837	10295	7721	7052
Швидкість волочиння	м/с	2,3	3	3,7	4,7
Потужність протягання	Вт	30352	34307	31765	36721
Повна потужність	ВА	39534	42594	39438	45591
Продуктивність за зміну	кг/зміну	9921,12			
Коефіцієнт споживаної енергії на одиницю продукції	ВА/кг	101,09			

На рисунку показано, як навантажені двигуни від їх номінальної потужності. На даній діаграмі видно, що три двигуна по 37 кВт працюють майже на номінальній потужності, а двигун на 55 кВт навантажений всього на 55% від номінальної потужності. При цьому, швидкість волочиння дуже мала для такого стану.

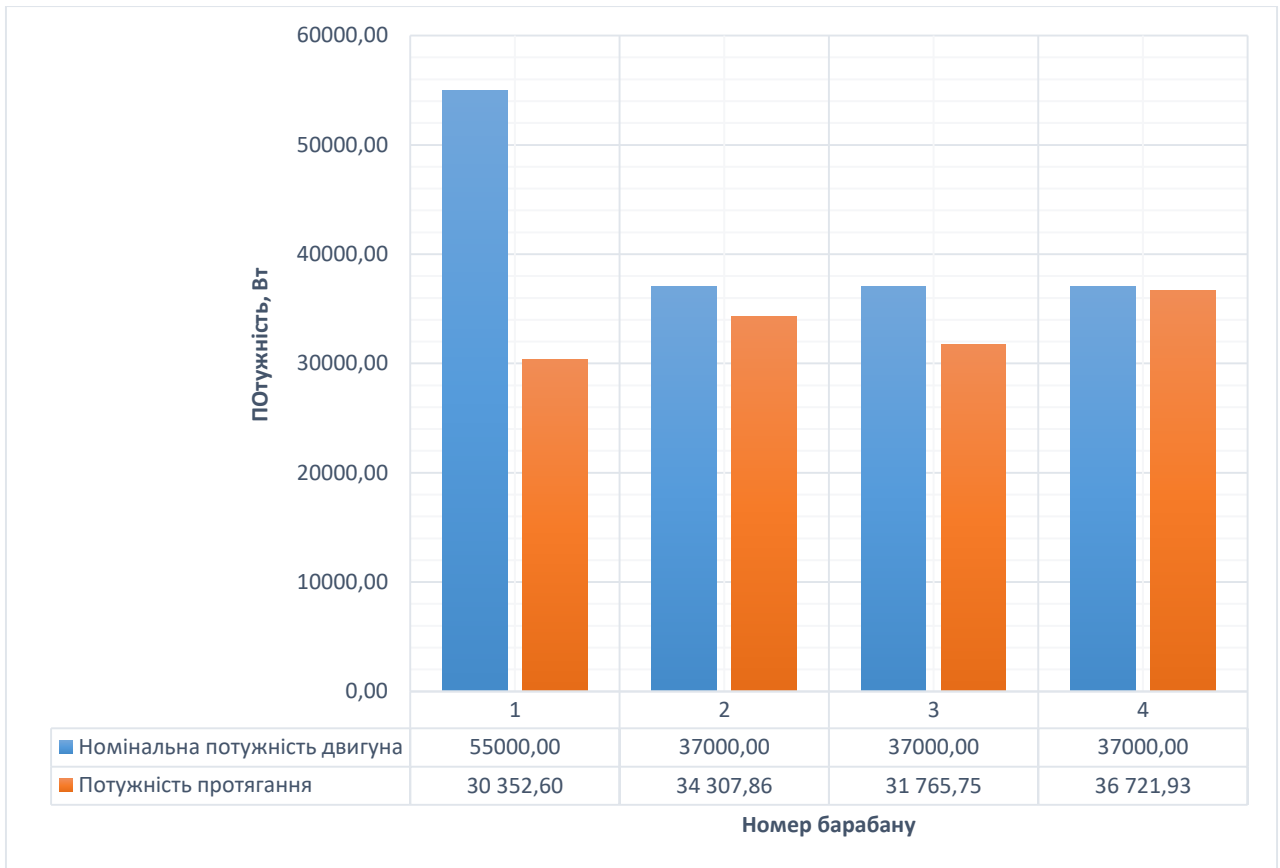


Рисунок 3 — Порівняння номінальної потужності двигунів та потужності протягання.

## 2.2 Розрахунок потужності протягання оптимізованого маршруту волочиння

Суть оптимізації полягає в створенні групового взаємозв'язаного електроприводу. При цьому, «ведучий» електропривод п'ятого барабану, а всі інші працюють у режимі «ведений». Такий режим роботи забезпечить ідеальну синхронізацію швидкостей між барабанами залежно від діаметру дроту. Для розрахунку потужності протягання був змінений маршрут волочиння, а саме 6,5 – 5,5 – 5 – 4,6 – 4,3 – 4 (мм). При такому маршруті волочиння використовуються усі п'ять барабанів.

Маршрут волочиння:

$$6,5 - 5,5 - 5 - 4,6 - 4,3 - 4 \text{ (мм)}.$$

Межа міцності матеріалу:

$$\sigma_0 = 900 \text{ кН/мм}^2.$$

Число протягань:

$$n = 5.$$

Межа міцності після першого протягання:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср}}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум}}}, \quad (2.40)$$

$$\delta_{\text{ед.ср}1} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2}, \quad (2.41)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta_{\text{ед.ср1}} = \frac{6,5^2 - 5,5^2}{6,5^2} = 0,28.$$

$$\sigma_1 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{900}{1 - 0,28}} \cdot 1 \cdot 0,28 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,28} = 1075,25 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{ср1}} = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}, \quad (2.42)$$

$$\sigma_{\text{ср1}} = \frac{900 + 1075,25}{2} = 987 \text{ Н/мм}^2.$$

Межа міцності після другого протягання:

$$\delta_{\text{ед.ср2}} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2}, \quad (2.43)$$

$$\delta_{\text{ед.ср2}} = \frac{5,5^2 - 5,0^2}{5,5^2} = 0,17.$$

$$\delta_{\text{сум.2}} = \frac{d_0^2 - d_2^2}{d_0^2}, \quad (2.44)$$

$$\delta_{\text{сум.2}} = \frac{6,5^2 - 5,0^2}{6,5^2} = 0,41.$$

$$\sigma_2 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср2}}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср2}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.2}}}, \quad (2.45)$$

$$\sigma_2 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{900}{1 - 0,17}} \cdot 2 \cdot 0,17 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,41} = 1102, \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{ср2}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad (2.46)$$

$$\sigma_{\text{ср2}} = \frac{1075,25 + 1102}{2} = 1088, \text{ Н/мм}^2.$$

Межа міцності після третього протягання:

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta_{\text{ед.ср3}} = \frac{d_2^2 - d_3^2}{d_2^2}, \quad (2.47)$$

$$\delta_{\text{ед.ср3}} = \frac{5,0^2 - 4,6^2}{5,0^2} = 0,15.$$

$$\delta_{\text{сум.3}} = \frac{d_0^2 - d_3^2}{d_0^2}, \quad (2.48)$$

$$\delta_{\text{сум.3}} = \frac{6,5^2 - 4,6^2}{6,5^2} = 0,5.$$

$$\sigma_3 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср3}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср3}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.3}}}, \quad (2.49)$$

$$\sigma_3 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{900}{1 - 0,15} \cdot 3 \cdot 0,15 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,5}} = 1153, \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{ср3}} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}, \quad (2.50)$$

$$\sigma_{\text{ср3}} = \frac{1102 + 1153}{2} = 1127,9, \text{ Н/мм}^2.$$

Межа міцності після четвертого протягання:

$$\delta_{\text{ед.ср4}} = \frac{d_3^2 - d_4^2}{d_3^2}, \quad (2.51)$$

$$\delta_{\text{ед.ср4}} = \frac{4,6^2 - 4,3^2}{4,6^2} = 0,13.$$

$$\delta_{\text{сум.4}} = \frac{d_0^2 - d_4^2}{d_0^2}, \quad (2.52)$$

$$\delta_{\text{сум.4}} = \frac{6,5^2 - 4,3^2}{6,5^2} = 0,56.$$

$$\sigma_4 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср4}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср4}} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{\text{сум.4}}}, \quad (2.53)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$\sigma_4 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{1000}{1 - 0,13}} \cdot 4 \cdot 0,13 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,56} = 1172, \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{cp4} = \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{2}, \quad (2.54)$$

$$\sigma_{cp4} = \frac{1153 + 1172}{2} = 1162,8, \text{ Н/мм}^2.$$

Межа міцності після п'ятого протягання:

$$\delta_{ед.ср5} = \frac{d_4^2 - d_5^2}{d_4^2}, \quad (2.55)$$

$$\delta_{ед.ср5} = \frac{4,3^2 - 4^2}{4,3^2} = 0,13.$$

$$\delta_{сум.5} = \frac{d_0^2 - d_4^2}{d_0^2}, \quad (2.56)$$

$$\delta_{сум.5} = \frac{6,5^2 - 4^2}{6,5^2} = 0,62.$$

$$\sigma_5 = \sigma_0 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{ед.ср5}}} \cdot n \cdot \delta_{ед.ср5} + 0,1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\delta_{сум.5}}, \quad (2.57)$$

$$\sigma_5 = 900 + 3,16 \cdot 4 \cdot \sqrt{\frac{900}{1 - 0,13}} \cdot 5 \cdot 0,13 + 0,1 \cdot 900 \cdot \sqrt{0,62} = 1245, \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{cp5} = \frac{\sigma_4 + \sigma_5}{2}, \quad (2.58)$$

$$\sigma_{cp5} = \frac{1172 + 1245}{2} = 1208,8, \text{ Н/мм}^2.$$

Сила волочіння на кожному протяганні:

$$F_1 = 0,6 \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{\delta_{ед.ср1}} \cdot \sigma_{cp1}, \quad (2.59)$$

$$F_1 = 0,6 \cdot 6,5^2 \cdot \sqrt{0,28} \cdot 987 = 13342,8, \text{ Н}$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_2 = 0.6 \cdot d_1^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср2}}} \cdot \sigma_{\text{ср2}}, \quad (2.60)$$

$$F_2 = 0.6 \cdot 5,5^2 \cdot \sqrt{0,17} \cdot 1088 = 8232,5, \text{ Н}$$

$$F_3 = 0.6 \cdot d_2^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср3}}} \cdot \sigma_{\text{ср3}}, \quad (2.61)$$

$$F_3 = 0.6 \cdot 5,0^2 \cdot \sqrt{0,15} \cdot 1127,9 = 6630,7, \text{ Н}$$

$$F_4 = 0.6 \cdot d_3^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср4}}} \cdot \sigma_{\text{ср4}}, \quad (2.62)$$

$$F_4 = 0.6 \cdot 4,6^2 \cdot \sqrt{0,13} \cdot 1162,8 = 5244, \text{ Н}$$

$$F_5 = 0.6 \cdot d_4^2 \cdot \sqrt{\delta_{\text{ед.ср5}}} \cdot \sigma_{\text{ср5}}, \quad (2.63)$$

$$F_5 = 0.6 \cdot 4,3^2 \cdot \sqrt{0,13} \cdot 1208,8 = 4921,35, \text{ Н}$$

Для визначення необхідної потужності на кожне протягання необхідно знати лінійну швидкість дроту після кожного протягання. Задана швидкість відноситься до виходу дроту з останньої волоки на останній барабан (бабину). Для визначення швидкостей кожного з попередніх барабанів користуються формулою:

$$v_{k-1} = \frac{d_k^2 \cdot v_k}{d_{k-1}^2}, \quad (2.64)$$

$v_5 = 6,6 \text{ М/с}$  – швидкість на последнем барабане, которой мы задались.

$$v_4 = \frac{d_5^2 \cdot v_5}{d_4^2}, \quad (2.65)$$

$$v_4 = \frac{4^2 \cdot 6,6}{4,3^2} = 5,7, \text{ М/с.}$$

$$v_3 = \frac{d_4^2 \cdot v_4}{d_3^2}, \quad (2.66)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_3 = \frac{4,3^2 \cdot 5,7}{4,6^2} = 5, \text{ М/с.}$$

$$v_2 = \frac{d_3^2 \cdot v_3}{d_2^2}, \quad (2.67)$$

$$v_2 = \frac{4,6^2 \cdot 5}{5,0^2} = 4,2, \text{ М/с.}$$

$$v_1 = \frac{d_2^2 \cdot v_2}{d_1^2}, \quad (2.68)$$

$$v_1 = \frac{5^2 \cdot 4,2}{5,5^2} = 3,5, \text{ М/с.}$$

Потужність кожного протягання розраховується за наступною формулою:

$$P_1 = \frac{F_1 \cdot v_1}{\eta}, \quad (2.69)$$

$$P_1 = \frac{13342,8 \cdot 3,5}{0,9} = 51793, \text{ Вт.}$$

$$P_2 = \frac{F_2 \cdot v_2}{\eta}, \quad (2.70)$$

$$P_2 = \frac{8232,5 \cdot 4,2}{0,9} = 38667, \text{ Вт.}$$

$$P_3 = \frac{F_3 \cdot v_3}{\eta}, \quad (2.71)$$

$$P_3 = \frac{6630,7 \cdot 5}{0,9} = 36795, \text{ Вт.}$$

$$P_4 = \frac{F_4 \cdot v_4}{\eta}, \quad (2.72)$$

$$P_4 = \frac{5244 \cdot 5,7}{0,9} = 33305, \text{ Вт.}$$

$$P_5 = \frac{F_5 \cdot v_5}{\eta}, \quad (2.73)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_5 = \frac{4921,35 \cdot 6,6}{0,9} = 36117, \text{Вт.}$$

Повна потужність двигунів:

$$S_1 = \frac{P_1}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.74)$$

$$S_1 = \frac{51793}{0,9 \cdot 0,89} = 62913, \text{ВА.}$$

$$S_2 = \frac{P_2}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.75)$$

$$S_2 = \frac{38667}{0,9 \cdot 0,89} = 47224, \text{ВА.}$$

$$S_3 = \frac{P_3}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.76)$$

$$S_3 = \frac{36795}{0,9 \cdot 0,89} = 44938, \text{ВА.}$$

$$S_4 = \frac{P_4}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.77)$$

$$S_4 = \frac{33305}{0,9 \cdot 0,89} = 40675, \text{ВА.}$$

$$S_5 = \frac{P_5}{\eta \cdot \cos\varphi}, \quad (2.78)$$

$$S_5 = \frac{36117}{0,9 \cdot 0,89} = 44110, \text{ВА.}$$

Сума повних потужностей всіх двигунів за робочу зміну (для розрахунку було використано 6 годин):

$$S = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5) \cdot 6 \quad (2.79)$$

$$S = (62913 + 47224 + 44938 + 40675 + 44110) \cdot 6 = 1439171,65, \text{ВА}$$

Довжина дроту, який проходить на кожному барабані за 1 секунду:

$$l_1 = 3,5, \text{м}$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$l_2 = 4,2, \text{ м}$$

$$l_3 = 5, \text{ м}$$

$$l_4 = 5,7, \text{ м}$$

$$l_5 = 6,6, \text{ м}$$

Розрахунок об'єму дроту який проходить на барабані за 1 секунду:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_1, \quad (2.80)$$

$$V_1 = \frac{3,1415 \cdot 5,5^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 = 0,000083, \text{ м}^3.$$

$$V_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_2, \quad (2.81)$$

$$V_2 = \frac{3,1415 \cdot 5,0^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 4,2 = 0,000083, \text{ м}^3.$$

$$V_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_3, \quad (2.82)$$

$$V_3 = \frac{3,1415 \cdot 4,6^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,000083, \text{ м}^3.$$

$$V_4 = \frac{\pi \cdot d_4^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_4, \quad (2.83)$$

$$V_4 = \frac{3,1415 \cdot 4,3^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 5,7 = 0,000083, \text{ м}^3.$$

$$V_5 = \frac{\pi \cdot d_5^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot l_5, \quad (2.84)$$

$$V_5 = \frac{3,1415 \cdot 4^2}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 6,6 = 0,000083, \text{ м}^3.$$

Розрахунок маси дроту на барабані за 1 секунду, при густині дроту рівній  $7800 \text{ кг/м}^3$ :

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = \rho \cdot V_1, \quad (2.85)$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 7800 \cdot 0,000083 = 0.65, \text{ кг.}$$

Продуктивність стану за зміну:

$$\begin{aligned} \Pi &= m_1 \cdot 6 \cdot 3600 & (2.86) \\ \Pi &= 0.65 \cdot 6 \cdot 3600 = 13984,06, \text{ кг/зміна} \end{aligned}$$

Коефіцієнт, що показує споживану електроенергію на одиницю виготовленої продукції:

$$\begin{aligned} K &= \frac{S}{\Pi}, & (2.87) \\ K &= \frac{1439171,65}{13984,06} = 102,92, \text{ ВА/кг.} \end{aligned}$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

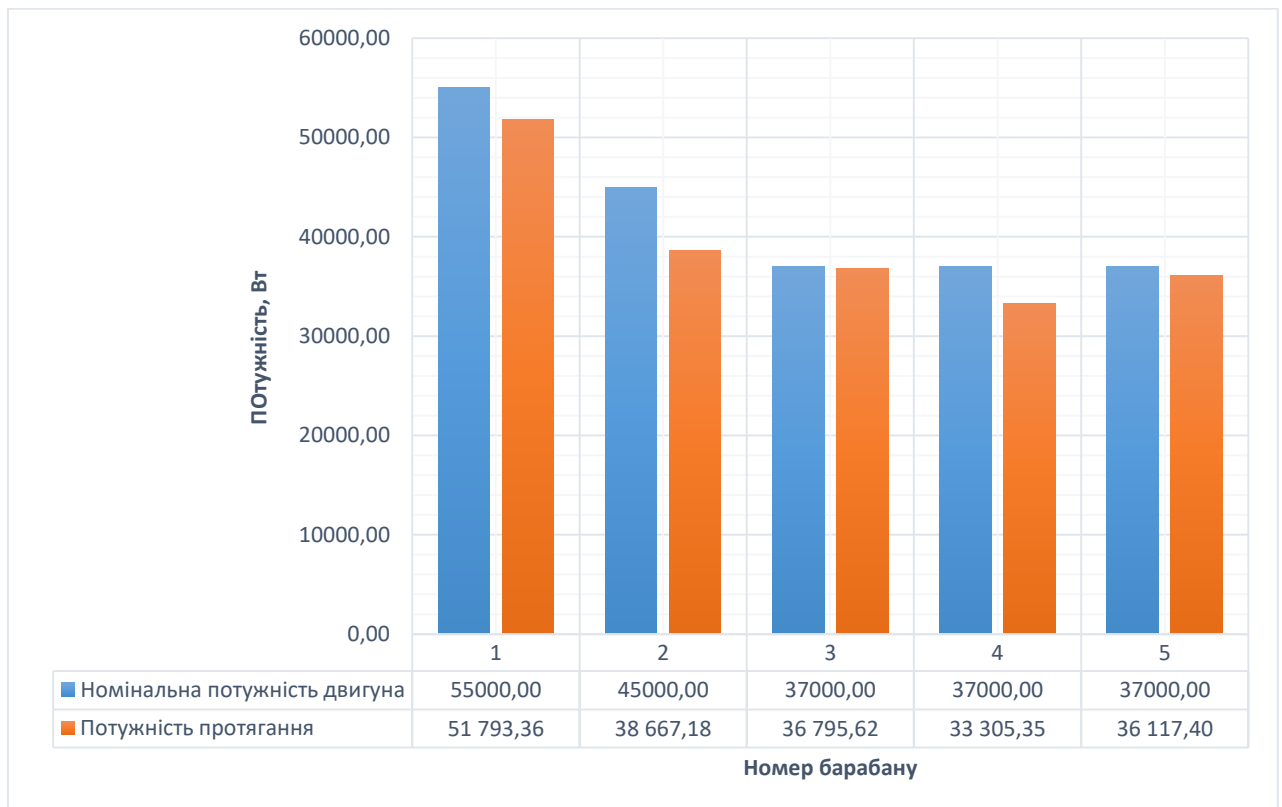


Рисунок 4 — Порівняння номінальної потужності двигунів та потужності протягання.

На рисунку 3 показано, як навантажені двигун. На даній діаграмі видно, що три двигуна по 37 кВт працюють майже на номінальній потужності, двигун на 55 кВт навантажений на 94% від номінальної потужності, а двигун на 45 кВт навантажений на 86%.

Табл. 4. Результати розрахунків.

Маршрут волочіння: 6,5 – 5,7 – 5,0 – 4,5 – 4.						
Параметр	Одиниця вимірювання	Номер секції				
		1	2	3	4	5
Потужність двигуна	кВт	55	45	37	37	37
Одиничне обтискання		0,28	0,17	0,15	0,13	0,13
Межа міцності	Н/мм <sup>2</sup>	105,25	1102	1153	1172	1245
Сумарне обтискання		0,28	0,41	0,5	0,56	0,62
Середня межа міцності	Н/мм <sup>2</sup>	987	1088	1127,9	1162,8	1208,8
Сила волочіння	Н	13342,8	8232,5	6630,7	5244	4921,35
Швидкість волочіння	м/с	3,5	4,2	5	5,7	6,6
Потужність протягання	Вт	51793	38667	36795	33305	36117
Повна потужність	ВА	62913	47224	44938	40675	44110
Продуктивність за зміну	кг/зміну	13984,06				
Коефіцієнт споживаної енергії на одиницю продукції	ВА/кг	102,92				

## 2.3 Висновок розрахунків

Критерієм, за допомогою якого оцінюються маршрути волочіння (початковий і оптимізований), є коефіцієнт, який показує кількість споживаної потужності на одиницю продукції. Після виконаних розрахунків, були отримані ці коефіцієнти. Які виявилися майже рівні між собою (101,09 ВА/кг і 102,92 ВА/кг, відповідно). Але при цьому швидкості волочіння різні. Зробимо розрахунок середньої швидкості дроту в стані при різних маршрутах волочіння.

Розрахунок середньої швидкості дроту при початковому маршруті волочіння:

$$v_{cp1} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{4}, \quad (2.88)$$
$$v_{cp1} = \frac{2,3 + 3 + 3,7 + 4,7}{4} = 3,425, \text{ м/с.}$$

Розрахунок середньої швидкості дроту при оптимізованому маршруті волочіння:

$$v_{cp2} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{5}, \quad (2.89)$$
$$v_{cp2} = \frac{3,5 + 4,2 + 5 + 5,7 + 6,6}{5} = 5, \text{ м/с.}$$

Зрівнявши отримані середні швидкості, отримаємо:

$$\frac{v_{cp1}}{v_{cp2}} = \frac{3,425}{5} = 0,685;$$
$$v_{cp2} = v_{cp1} / 0,69 = 1,449 \cdot v_{cp1}$$

					ЕП.МР.18.05.2	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Тобто, швидкість дроту оптимізованого маршруту волочіння майже в півтора рази швидша. Ілюстрація цього зрівняння зображена на рисунку 3.

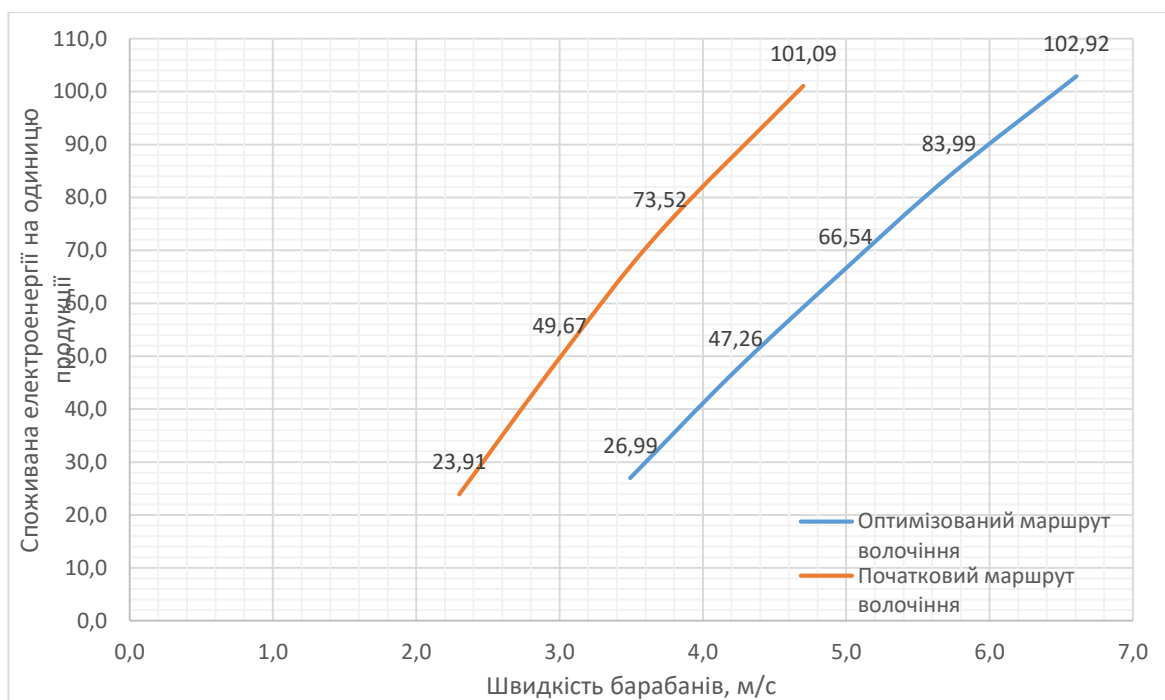


Рисунок 5 — Залежність коефіцієнта споживаної електроенергії на одиницю продукції від швидкості волочіння при однакових сумарних обтискань.

Під час розрахунку потужностей протягування оптимізаційного маршруту волочіння бралось до уваги, що електропривод п'ятого барабану працює у режимі «ведучий». Швидкість дроту рахується від п'ятого барабану, тобто задається швидкість п'ятого барабану, а швидкість інших розраховується автоматично, відповідно до діаметрів дроту на різних волоках. Під час розрахунків намагався навантажити двигун п'ятого барабану до номінальної потужності.

Отже, оптимізація режиму роботи стана та створення взаємозв'язаного групового електроприводу дало можливість збільшити швидкість волочіння майже в півтора рази, при такій же самій затраченій електроенергії, що і при початковому маршруті волочіння. Рекомендується використати векторну систему управління. Така система відповідає вимогам технологічного процесу і зможе забезпечити великий діапазон регулювання швидкостей, підтримку постійності статичного моменту на валу двигуна.

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕП.МР.18.05.2				

### 3. Моделювання

					<i>ЕП.МР.18.05.3</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>					<i>Моделювання режиму роботи волоочильного стану типу SKET 2500/5</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>							42	57
<i>Реценз.</i>						<i>141м-16-4 НГУ</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								

### 3.1 Опис математичної моделі електроприводу волоочильного стану та механічної частини

Для моделювання використовувався оптимізований маршрут волочіння.

Структура векторної системи управління швидкістю асинхронного двигуна в системі відліку, пов'язаній з вектором потокозчеплення ротора  $\Psi_2$  представлена на рис. 4 і 5. З рис. 5 видно, що об'єкт управління характеризується наявністю нелінійних перехресних зв'язків між каналами управління.

Для їх компенсації в систему автоматичного регулювання вводяться нелінійні зв'язки, відтворюючі функціональні залежності, зворотні залежності об'єкту управління. Це забезпечує задані динамічні характеристики системи автоматичного регулювання, а в деяких випадках і її стійкість.

Силовий перетворювач представлений двома безперервними аперіодичними ланками в системі відліку, пов'язаній з вектором потокозчеплення ротора. Тому при моделюванні відсутня необхідність здійснювати пряме і зворотне перетворення координат, які насправді є присутніми в реальному електроприводі.

Приведені на малюнках змінні розраховуються виходячи з параметрів асинхронного двигуна, які наведені в таблиці 5.

Табл. 5 Необхідні параметри асинхронного двигуна для розрахунку

Найменування параметра	Позначення	Одиниця виміру
Номінальна потужність електродвигуна	$P_H$	Вт
Номінальна фазна напруга електродвигуна	$U_{\text{фаз}}$	В
Синхронна швидкість поля статора	$n_0$	об/мин
Номінальне ковзання електродвигуна	$s_H$	
Номінальне ККД електродвигуна	$\eta_2$	
Номінальний коефіцієнт потужності електродвигуна	$\cos\varphi_H$	
Номінальна частота живлячої мережі	$f_H$	Гц

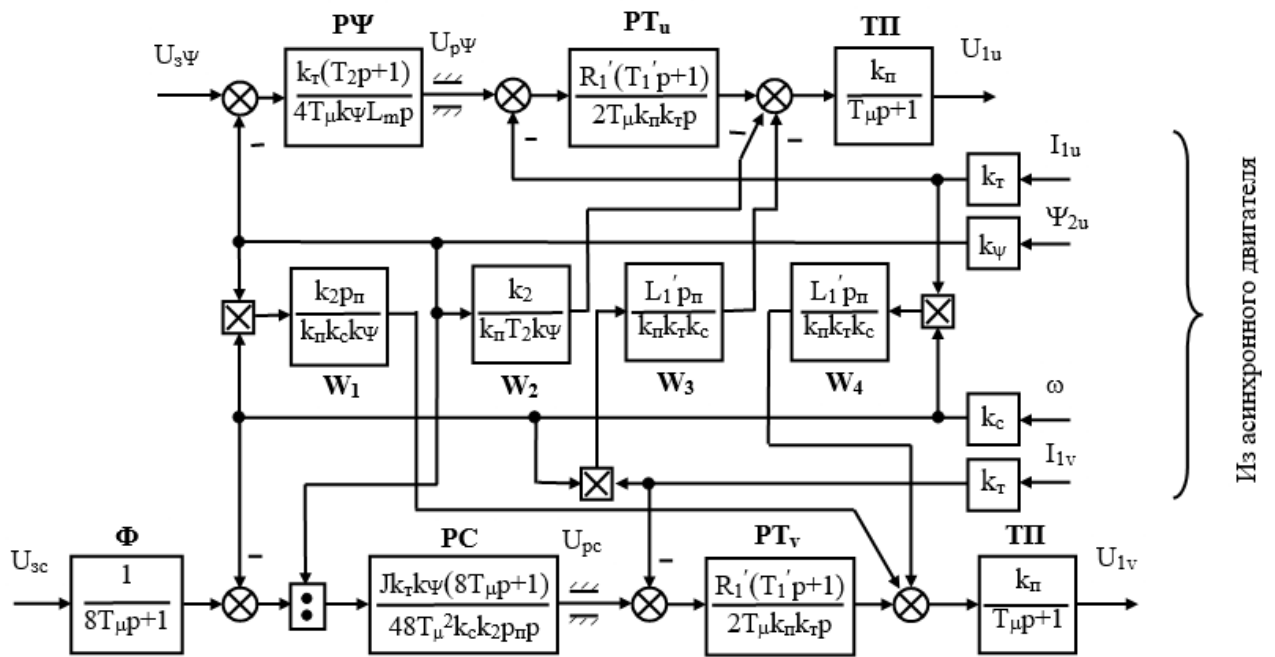


Рисунок 6 — Структурна схема векторної системи управління швидкістю асинхронного двигуна.

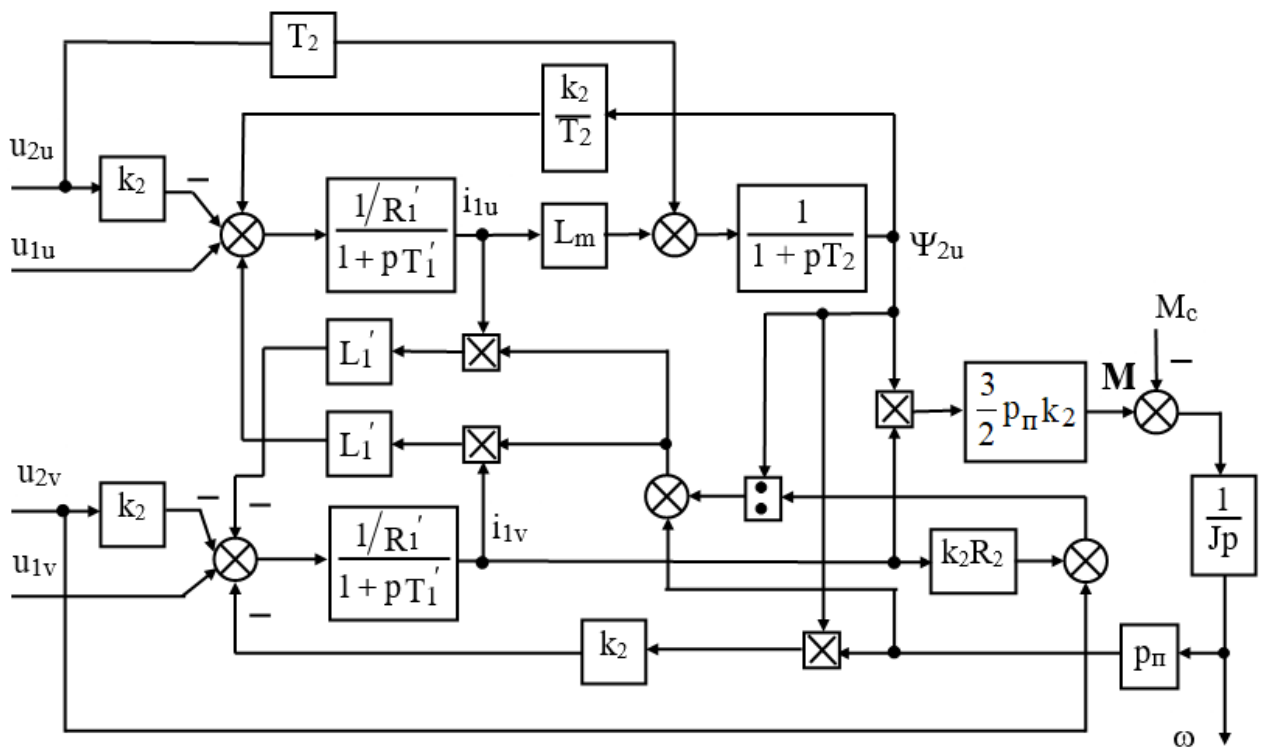


Рисунок 7 — Структурна схема АД в системі відліку пов'язаної з вектором потокозчеплення ротора  $\Psi_2$

Модель АД в системі координат  $x, y$ , що обертається з синхронною швидкістю і пов'язаною з потокозчепленням ротором.

За базовими рівняннями прийнемо рівняння:

$$\begin{cases} \bar{U}_s = \bar{I}_s \cdot R_s + \frac{d}{dt} \cdot \bar{\psi}_s + j \cdot \omega_R \cdot \bar{\psi}_s & (3.1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{U}_r = \bar{I}_r \cdot R_r + \frac{d}{dt} \cdot \bar{\psi}_r + j \cdot (\omega_k - \omega_{\text{эк}}) \cdot \bar{\psi}_r & (3.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{\psi}_s = \bar{I}_s \cdot L_s + \bar{I}_r \cdot L_m & (3.3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{\psi}_r = \bar{I}_r \cdot L_r + \bar{I}_s \cdot L_m & (3.4) \end{cases}$$

З (3) і (4) виразимо вектору потокозчеплення статора і струму ротора:

$$\bar{\psi}_s = \bar{I}_s \cdot L_m \cdot \left( \frac{L_s \cdot L_r - L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right) + \bar{\psi}_r \cdot \frac{L_m}{L_r} = \bar{I}_s \cdot L'_s + k_r \cdot \bar{\psi}_r \quad (3.5)$$

$$\bar{I}_r = k_r \cdot \left( \frac{\bar{\psi}_r}{L_m} - \bar{I}_s \right) \quad (3.6)$$

$k_r$  - коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора.

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}$$

$L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$  - перехідна індуктивна статора.

$L'_s$  представляє приведену до статора результуючу індуктивність, нерухомою машини без активних опорів і із замкнутим на коротко ротором.

Підставимо (5) в (1):

$$\frac{d}{dt} = p$$

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s \cdot [R_s + (p + j \cdot \omega_o) \cdot L'_s] + (p + j \cdot \omega_o) \cdot k_r \cdot \bar{\psi}_r \quad (3.7)$$

					ЕП.МР.18.05.3	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставимо (6) в (2):

$$\bar{U}_r = \left[ \frac{k_r \cdot R_r}{L_m} + p + j \cdot (\omega_o - \omega_{\text{элр}}) \right] \cdot \bar{\psi}_r - k_r \cdot R_r \cdot \bar{I}_s \quad (3.8)$$

Обидві частини рівняння (8) помножимо на  $k_r$  і виразим  $k_r \cdot \bar{\psi}_r \cdot (p + j \cdot \omega_o)$ :

$$k_r \cdot \bar{\psi}_r \cdot (p + j \cdot \omega_o) = \bar{U}_r \cdot k_r - \bar{\psi}_r \cdot \frac{k_r^2 \cdot R_r}{L_m} + j \cdot \omega \cdot k_r \cdot \bar{\psi}_r + k_r^2 \cdot R_r \cdot \bar{I}_s \quad (3.9)$$

Підставимо (9) в (7):

$$\bar{U}_s - \bar{U}_r \cdot k_r = \bar{I}_s \cdot [R' + (p + j \cdot \omega_o) \cdot L'_s] + \left( j \cdot \omega_{\text{элр}} \cdot k_r - \frac{k_r^2 \cdot R_r}{L_m} \right) \cdot \bar{\psi}_u \quad (3.10)$$

$R'_s = R_s + k_r^2 \cdot R_r$  - перехідний опір статора.

$$U_{rx} + j \cdot U_{ry} = \left[ \frac{k_r \cdot R_r}{L_m} + p + j \cdot (\omega_o - \omega_{\text{элр}}) \right] \cdot (\psi_{rx} + j \cdot \psi_{ry}) - k_r \cdot R_r \cdot (I_{sx} + j \cdot I_{ry}) \quad (3.11)$$

$$U_{sx} + j \cdot U_{sy} - (U_{rx} + j \cdot U_{ry}) \cdot k_r = (I_{sx} + j \cdot I_{sy}) \cdot [R' + (p + j \cdot \omega_o) \cdot L'_s] + \left( j \cdot \omega_{\text{элр}} \cdot k_r - \frac{k_r^2 \cdot R_r}{L_m} \right) \cdot (\psi_{rx} + j \cdot \psi_{ry}) \quad (3.12)$$

$$\psi_{rx} = \frac{U_{rx} \cdot T_r + I_{sx} \cdot L_m}{1 + p \cdot T_r}, \quad (3.13)$$

$$\omega_o = \omega_{\text{элр}} + \frac{U_{ry} + k_r \cdot R_r \cdot I_{sy}}{\psi_{rx}}$$

$$U_{sx} - k_r \cdot U_{rx} = I_{sx} \cdot R' \cdot (1 + p \cdot T'_s) - \omega_o \cdot L'_s \cdot I_{sy} - \frac{k_r}{T_r} \cdot \psi_{rx}, \quad (3.14)$$

$$U_{sy} - k_r \cdot U_{ry} = I_{sy} \cdot R' \cdot (1 + p \cdot T'_s) + \omega_o \cdot L'_s \cdot I_{sx} + \omega_{\text{элр}} \cdot k_r \cdot \psi_{rx}$$

					ЕП.МР.18.05.3	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad T'_s = \frac{L'_s}{R'}$$

$T_r$  - постійна часу ротора

$T'_s$  - перехідна постійна часу статора.

Момент двигуна

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_r \cdot \psi_{rx} \cdot I_{sy} \quad (3.15)$$

Змінні структурних схем розраховуються по формулах, які наведені в таблиці 6.

Таблиця 6. Розрахункові формули для параметрів структурних схем

Найменування параметра	Формула
Кутова частота живлячої мережі, рад/з	$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f$
Число пар полюсів електродвигуна	$p_{\Pi} = \frac{3000}{n_0}$
Максимальна швидкість обертання двигуна, рад/з	$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_0}{30}$
Номінальний фазний струм статора, А	$I_{\text{фаз.н}}$ $= \frac{P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{\text{фаз.н}} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}}$
Номінальний момент електродвигуна, Н·м	$M_{\text{ном}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{н}}}{n_0 \cdot (1 - s_{\text{н}})}$
Басовий опір, Ом	$Z_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{фаз.н}}}{I_{\text{фаз.н}}}$
Індуктивність розсіювання обмотки статора, Гн	$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0}$

Продовження таблиці 6.

Індуктивність розсіювання обмотки ротора, Гн	$L_{2\sigma} = \frac{X_2'}{\omega_0}$
Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора, Гн	$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0}$
Повна індуктивність обмотки статора, Гн	$L_1 = L_{1\sigma} + L_m$
Повна індуктивність обмотки ротора, Гн	$L_2 = L_{2\sigma} + L_m$
Коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора	$k_2 = \frac{L_m}{L_2}$
Еквівалентна індуктивність розсіювання двигуна, Гн	$L_1' = L_{1\sigma} + k_2 \cdot L_{2\sigma}$
Еквівалентний опір двигуна, Ом	$R_1' = R_1 + k_2^2 \cdot R_2$
Еквівалентна електромагнітна постійна часу обмотки статора, з	$T_1' = \frac{L_1'}{R_1'}$
Еквівалентний електромагнітний постійний час обмотка ротор, з	$T_2 = \frac{L_2}{R_2}$
Номінальне потокозчеплення електродвигун, Вб	$\Psi_{\text{ном}} = \frac{M_{\text{ном}}}{1,5\sqrt{2} \cdot I_{\text{фаз.н}} \cdot p_{\text{п}} \cdot k_2}$
Максимальний напруга в система управління, в	$U_{\text{зад}} = 10$
Коефіцієнт передача датчик струм	$k_{\text{дат тока}} = \frac{U_{\text{зад}}}{2\sqrt{2} \cdot I_{\text{фаз.н}}}$
Коефіцієнт передача датчик швидкість	$k_{\text{дат скорости}} = \frac{U_{\text{зад}}}{\omega_{\text{max}}}$
Коефіцієнт передача датчик потокозчеплення	$k_{\text{дат } \Psi} = \frac{U_{\text{зад}}}{\Psi_{\text{ном}}}$
Коефіцієнт передача силовий перетворювач	$k_{\text{дат ПЧ}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{фаз.н}}}{U_{\text{зад}}}$
Постійний час силовий перетворювач, с	$T_\mu = 0,0005$



На малюнку 6 зображена структурна схема стану, яка зібрана в середовищі розробки MatLab (Simulink). Вона складається з окремих блоків електроприводів і барабанів. Починаючи з п'ятого барабана кожен попередній пов'язаний з наступним барабаном лінійною швидкістю дроту. Механічна частина барабана зображена на рисунку 7. Ця модель побудована по формулах, які приведені в таблиці 7.

Таблиця 7. Формули для розрахунку моменту інерції дроту на барабані.

Найменування	Формула
Кутова швидкість n- го барабана.	$\omega_{\delta_n} = \omega_n \cdot i$
Лінійна швидкість n- го барабана	$v_{\delta_n} = \omega_{\delta_n} \cdot R_{\delta}$
Лінійна швидкість дроту до волюки n- го барабана	$v'_{n-1} = \frac{d_n^2}{d_{n-1}^2} \cdot v_{\delta_n}$
Різниця швидкостей	$\Delta v_n = v_{\delta_n} - v'_{n-1}$
Різниця кутових швидкостей	$\Delta \omega_n = \frac{\Delta v_n}{R_1}$
Кут охоплення дротом n- го барабана	$\varphi_n = \int \Delta \omega_n dt$
Кількість цілих оборотів барабана на витку n- го барабана	$N_n = \frac{\varphi_n}{2 \cdot \pi}$
Довжина дроту на n- ом барабані	$\angle_n = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot N_n$
Маса дроту на n- ом барабані	$m_n = \angle_n \cdot S_{сеч_n} \cdot \rho$
Момент інерції дроту n- го барабана	$J_{пров_n} = \frac{1}{2} \cdot m_n \cdot (r_1^2 + r_2^2)$

Розраховується лінійна швидкість n- го барабана, лінійна швидкість намотування дроту на барабан. Так само розраховується лінійна швидкість (n - 1) -го барабана, лінійна швидкість розмотування дроту з барабана. Після, розраховуємо різницю лінійних швидкостей намотування і розмотування дроту. За допомогою цієї різниці розраховуємо скільки дроту знаходиться на n- ом барабані. І відповідно розраховуємо момент інерції, який додаємо до моменту інерції електроприводу.

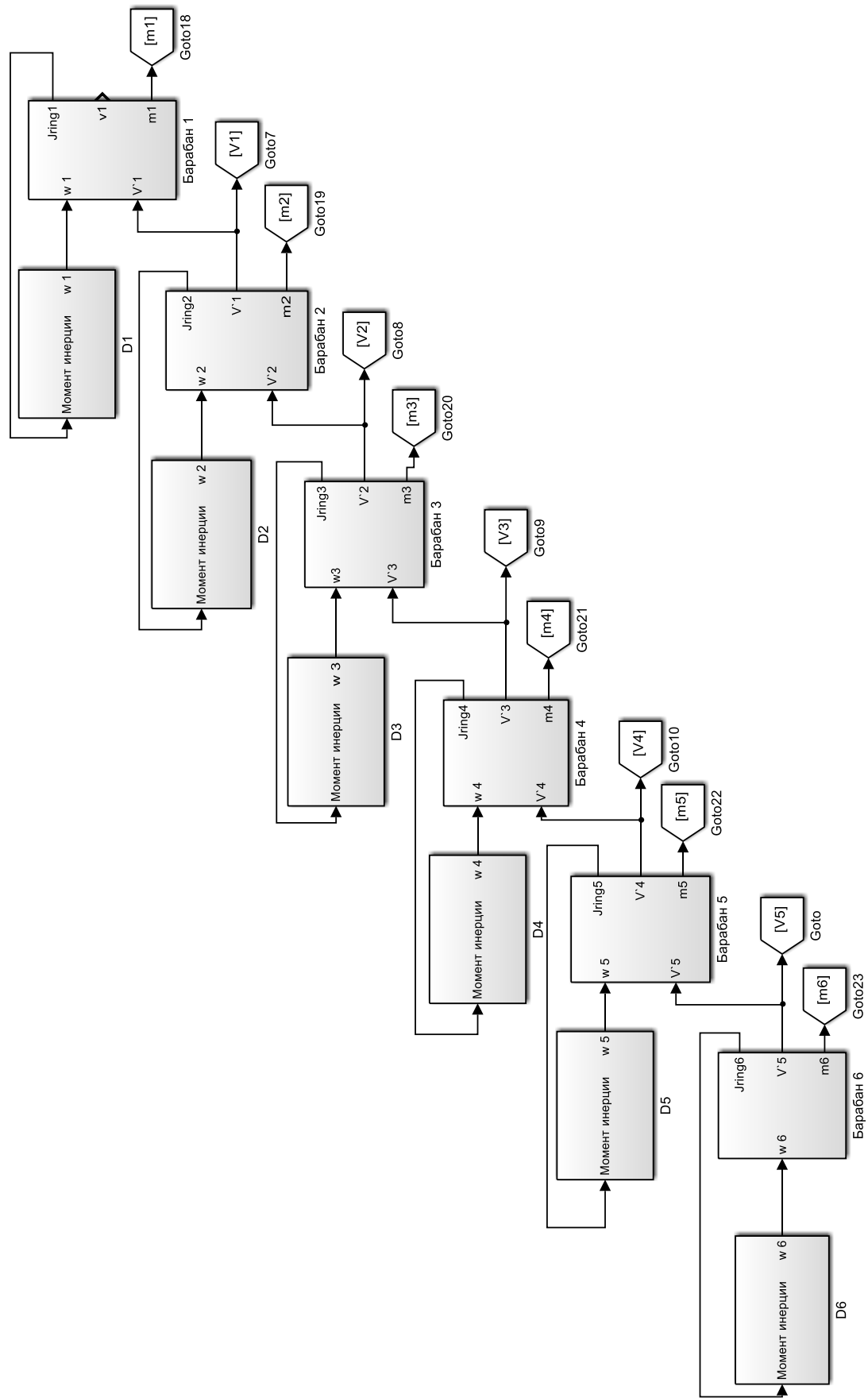


Рисунок 8 – Математична модель стана.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ЕП.МР.18.05.3

Арк.

50

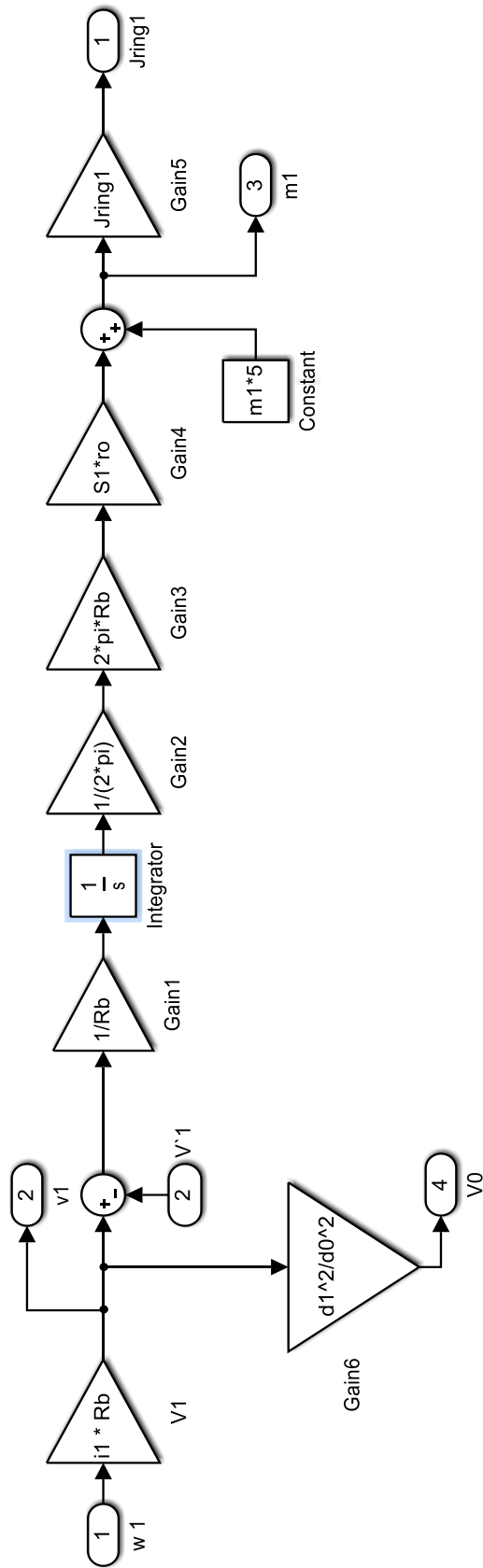


Рисунок 9 – Структурна схема механічної частини барабана.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ЕП.МР.18.05.3

Арк.

51

### 3.2 Результати моделювання математичної моделі стану

На рисунку 9 зображено розгін одного із електроприводів.

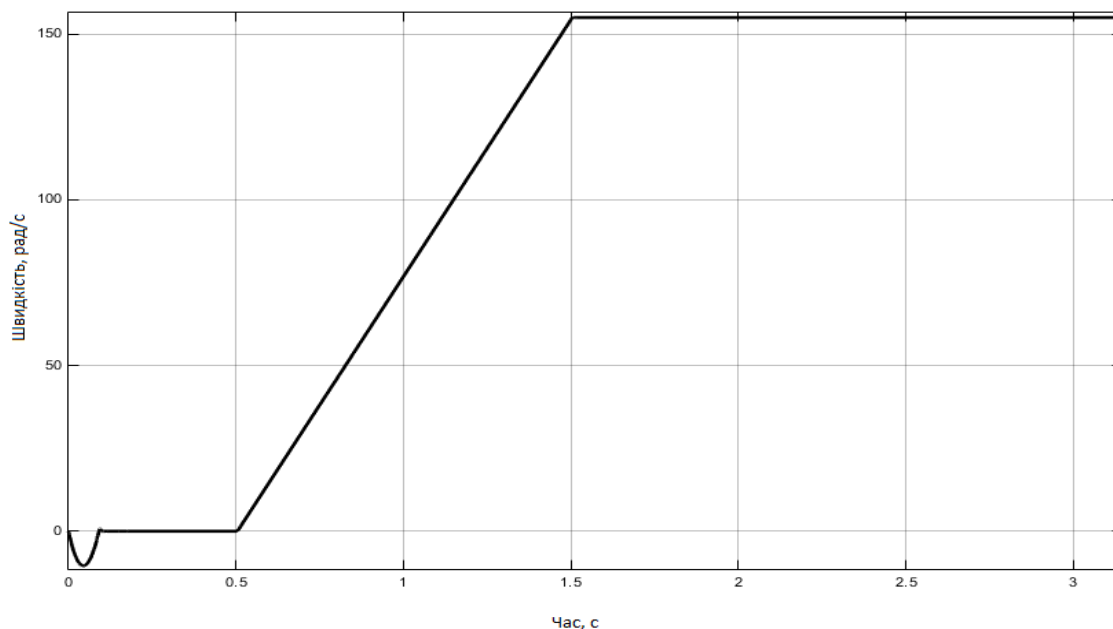


Рисунок 10 – Розгін електроприводу п'ятого барабану.

Маса проволочки на барабанах за період роботи рівному 100 с.

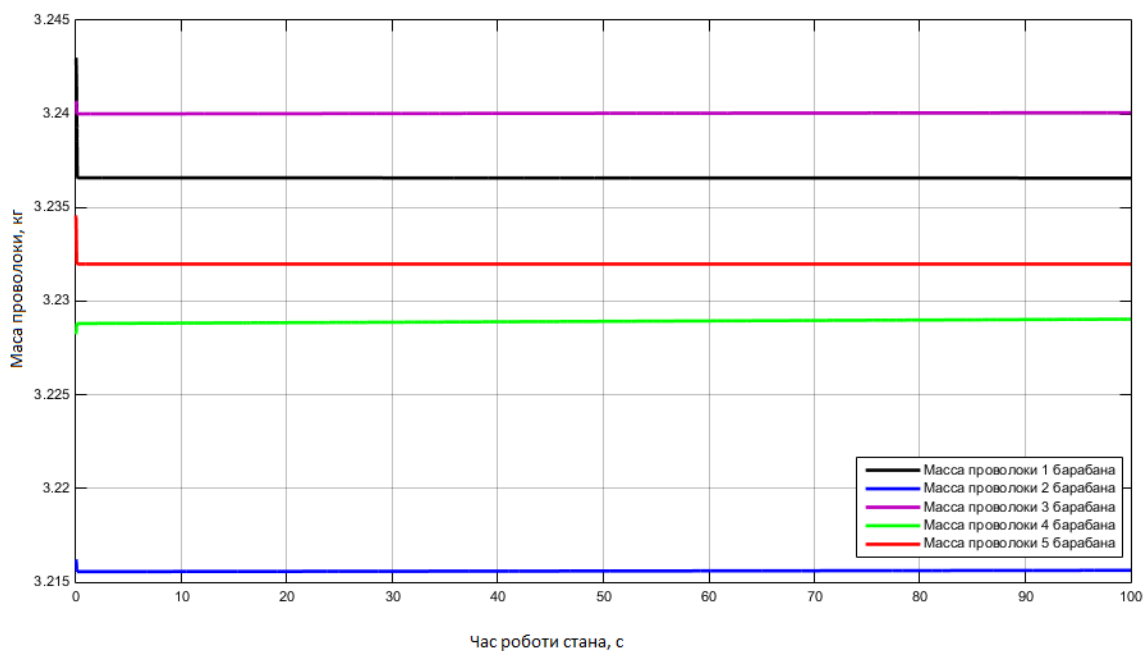


Рисунок 11 – Маса проволочки на барабанах.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Як видно на рис. 8, маса дроту на різних барабанах при тривалій роботі стану залишається постійною і рівною в середньому 3,25 кг на одному барабані, з урахуванням того, що на барабані намотані п'ять витків. За 100 секунд стан виготовляє 64,09 кг дроту. Відповідно за 1 секунду стан виготовляє 0,64 кг дроту. А при розрахунку, вийшло, що стан виготовляє 0,65 кг дроту.

Лінійні швидкості барабанів та різниці лінійних швидкостей проволочки наведені у табл.8.

Таблиця 8. Результати моделювання –лінійні швидкості барабанів та різниці лінійних швидкостей проволочки.

Позначення	Результат	Позначення	Результат
$v_1, \text{M/c}$	3,494	$\Delta v_1, \text{M/c}$	$-7 \cdot 10^{-7}$
$v_2, \text{M/c}$	4,227	$\Delta v_2, \text{M/c}$	$4,54 \cdot 10^{-6}$
$v_3, \text{M/c}$	4,994	$\Delta v_2, \text{M/c}$	$5,12 \cdot 10^{-6}$
$v_4, \text{M/c}$	5,716	$\Delta v_2, \text{M/c}$	$2,07 \cdot 10^{-5}$
$v_5, \text{M/c}$	6,605	$\Delta v_{12}, \text{M/c}$	$-1,94 \cdot 10^{-8}$

Потужність кожного електроприводу, отриманого під час моделювання, наведена у табл. 9.

Таблиця 9. – Потужність протягання при розрахунках та при моделюванні.

Позначення	Результат розрахунків	Результат моделювання
$P_1, \text{Вт}$	51 793,36	50 535,2
$P_2, \text{Вт}$	38 667,18	37 220,4
$P_3, \text{Вт}$	36 795,62	36 021,2
$P_4, \text{Вт}$	33 305,35	32 164,8
$P_5, \text{Вт}$	36 117,40	35 505,1

Отже, зрівнявши результати моделювання з результатами розрахунків, виходить, що різниця досить мала, щоб її брати до уваги.

Тобто, використання групового взаємозв'язаного електроприводу та систему векторного керування швидкості дає приріст продуктивності майже в півтора рази, при таких самих енергозатратах на одиницю готової продукції.

Під час розрахунку маршруту волочіння слід брати до уваги, що в груповому електроприводі головним електроприводом являється п'ятий барабан, потужність двигуна якого дорівнює 37 кВт. Він працює в режимі «ведучий», а всі інші працюють в режимі «ведений». Також, слід підбирати діаметри волок такі, щоб потужність п'ятого барабану була майже номінальна. Якщо потужність інших двигунів менше ніж номінальна, то можна використати енергозберігаючі частотні режими роботи електропривода. При яких можливо збільшити ККД, шляхом зниження напруги.

					<i>ЕП.МР.18.05.3</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		54

## ВИСНОВОК

У магістерській роботі розглядався існуючий режим роботи дотяно-волоочильного стану типу SKET 2500/5 з електроприводом змінного струму.

В результаті дослідження були отримані розрахунки потужностей протягань на кожному барабані.

Проаналізувавши отримані результати був запропонований оптимізований режим роботи, який полягає в створенні взаємозв'язаного групового електроприводу з векторною системою управління. В результаті розрахунку оптимізованого маршруту волочіння, отримали, що продуктивність стану виросла в півтора рази при тих же самих енерговитратах на одиницю готової продукції.

Також була розроблена математична модель електроприводу стану і механічної частини. Результати моделювання (модність двигунів, лінійна швидкість барабанів) підтвердили доцільність використання оптимізованого режиму роботи електроприводу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. С.М. Зудкін, А.Г. Пружак, Г.С. Алалікін. Електропривод та автоматика волочильних станів. – м.: Москва, 211с.
2. Технічна документація Стан для волочіння SKET 2500 – 96 с.
3. А.А. Булгаков. Частотне керування асинхронним двигуном., третє перероблене видання., – м.: Москва Енергоіздат, 1982, 216 с.
4. Під редакцію І.Я. Браславського. Енергозберігаючий асинхронний електропривод., – м.: Москва, АСАДЕМА. 2004
5. В.В Бітков. Технологія та машини для виробництва дроту. – м.: Єкатеринбург, 2004.
6. В.А. Денисов., М.Н. Третьякова. Механічні характеристики асинхронного електроприводу с частотним керуванням., 2015., №1(31), 19–24., Вектор науки ТГУ.
7. Панкратов В.В. Векторне керування асинхронними електроприводами: Навчань. посібник. - Новосибірськ: Вид-во НГТУ. 1999. - 66 с.
8. Калачев Ю.Н. Векторне регулювання (замітки практика) 2013. - 72 с.
9. Борців Ю.А. Автоматизований електропривод з пружними зв'язками / Ю.А. Борців, Г.Г. Соколовський. - СПб.: Енергоіздат, 1992. - 228 с.
10. Калачев Ю.Н. Спостерігачі стану у векторному електроприводі (записки дилетанта), 2015. - 80 с.
11. Радионов А.А. Автоматизований електропривод станів для виробництва сталевих дроту. - Магнітогорськ ГОУ ВПО " МГТУ" 2007. - 311с.
12. В. Я. Ганнель. Електропривод волочильних станів і канатних машин., Металургіздат, 1962. - 176с.
13. В.М. Цегельників., О.Г. Пташин // Математична модель розгону електромеханічної системи волочильного стану // Електромеханіка., з 640-643 (№ 6, 1978).



