

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему «Підвищення ефективності споживання електричної енергії
обладнанням трубопрокатного виробництва»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412-1
спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(назва освітньої програми)

Антонюк І.К.

(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Єрофєєва А.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент д.т.н., проф. Артемчук В.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерний навчально-науковий інститут _____
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень _____
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка _____
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц. В.Л. Коваленко
« _____ » _____ 2023 року

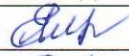



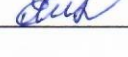

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Антонюк Іван Костянтинович
(прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи «Підвищення ефективності споживання електричної енергії обладнанням трубопрокатного виробництва»
керівник роботи Єрофєєва Аліна Анатоліївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- 2 затвержені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с
- 2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2023 р.
- 3 Вихідні дані до роботи : технічні дані електродвигунів головних електроприводів; схеми електроприводу; фактичне споживання електроенергії основними споживачами трубопрокатного цеху, номінальна потужність двигуна -1250 кВт; номінальний струм якоря-1775 А, фазна напруга двигуна - 3468,2083В, фазний струм – 259,5 А.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1)Аналіз існуючого електрообладнання прокатних станів. 2) Електропривод валків прокатного стану трубопрокатного цеху. 3) Підвищення енергоефективності електроприводів великої потужності трубопрокатного виробництва.
- 5 Перелік графічного матеріалу 1) Експлуатаційні характеристики прокатного електродвигуна. 2) Силова схема ЧП на основі АІС та форми статорного струму і напруги двигуна в електроприводі фірми Ross Hill. 3)

Силова схема та форми статорного струму і напруги двигуна при живленні від чотирирівневого АІН.4) Прес - ножиці «Ерфурт». 5) Трубопрокатний агрегат ТПА-140. 6) Робоча кліть прошивного стану. 7) Фактичне споживання електричної енергії основними споживачами трубопрокатного цеху. 8) Технічні характеристики двигуна АДО-2000-6000-12У1.

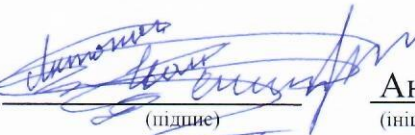
6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Єрофєєва А.А., к.т.н., доцент		
Розділ 2	Єрофєєва А.А., к.т.н., доцент		
Розділ 3	Єрофєєва А.А., к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 11.09.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого електрообладнання прокатних станів	09.10.2023	
2	Електропривод валків прокатного стану трубопрокатного цеху.	13.11.2023	
3	Підвищення енергоефективності електроприводів великої потужності трубопрокатного виробництва.	27.11.2023	

Студент  Антонюк І.К.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи  Єрофєєва А.А.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

І.К.Антонюк. Підвищення ефективності споживання електричної енергії обладнанням трубопрокатного виробництва.

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник А.А.Єрофєєва. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена підвищенню енергоефективності електроприводів великої потужності прокатного стану трубопрокатного цеху.

Запропоновано спосіб модернізації потужних електроприводів прокатних станів трубопрокатного виробництва, що ґрунтується на використанні в них високовольтних частотно - регульованих асинхронних двигунів великої потужності.

Розроблено метод розрахунку втрат потужності для частотно-регульованого асинхронного двигуна великої потужності, що враховує втрати потужності в двигуні, частотному перетворювачі з АІН-ШІМ та в мережі.

Визначено техніко – економічні показники впровадження фільтрокомпенсуючого приладу та системи з частотним регулюванням асинхронного електродвигуна для прокатного стану, які характеризуються річною економією енергії.

Ключові слова: електропривод, електродвигун, частотний перетворювач, реверсивний стан, схема заміщення, електромеханічний процес, строк окупності.

ABSTRACT

I.K. Antoniuk. Increasing the efficiency of electric power consumption by pipe rolling equipment.

Qualifying final work for the degree of master's degree in specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, supervisor A.A. Yerofieieva. Zaporizhzhia National University. Y.M. Potebnyi Engineering Education and Research Institute. Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2023.

The master's thesis is devoted to improving the energy efficiency of high-power electric drives of the rolling mill of a pipe rolling shop.

A method of modernization of high-power electric drives of rolling mills of pipe rolling production based on the use of high-voltage frequency-controlled asynchronous motors of high power is proposed.

A method for calculating power losses for a high-power variable-frequency induction motor has been developed, taking into account power losses in the motor, frequency converter with AIN-PWM, and in the network.

The technical and economic indicators of the introduction of a filter compensating device and a frequency-controlled induction motor system for a rolling mill, characterized by annual energy savings, are determined.

Keywords: electric drive, electric motor, frequency converter, reversing state, substitution scheme, electromechanical process, payback period.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ПРОКАТНИХ СТАНІВ	9
1.1 Загальні відомості	9
1.2 Електродвигуни прокатних станів	13
1.3 Електропривод реверсивних станів	18
1.4 Схеми електроприводу реверсивного стану гарячої прокатки	22
1.5 Високовольтні перетворювачі для частотно-регульованого електроприводу прокатних станів	28
2 ЕЛЕКТРОПРИВОД ВАЛКІВ ПРОКАТНОГО СТАНУ ТРУБОПРОКАТНОГО ЦЕХУ	46
2.1 Технологія і устаткування трубопрокатного цеху	46
2.2 Аналіз споживання електроенергії споживачами трубопрокатного цеху	56
2.3 Розрахунок електромеханічних процесів в базовому варіанті електроприводу	58
3 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРУБОПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА	67
3.1 Розрахунок втрат та параметрів „Т” – подібної схеми заміщення асинхронного двигуна типу АДО-2000-6000-12У1	67
3.2 Економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів в трубопрокатному цеху	
Висновки	105
Перелік посилань.....	106

ВСТУП

Актуальність. В умовах ринкових відносин питання енергозбереження і підвищення енергоефективності є важливим елементом в структурі собівартості продукції промислових підприємств. Перш за все, це стосується підприємств з вагомою часткою енерговитрат в структурі собівартості продукції, таких як металургійні підприємства.

Аналіз електроспоживання в промисловості показує, що у всіх її галузях є значні резерви економії електроенергії.

Мета роботи - підвищення енергоефективності електроприводів великої потужності прокатного стану трубопрокатного цеху.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі вирішуються такі задачі:

- аналіз існуючого електрообладнання прокатних станів;
- аналіз споживання електроенергії споживачами трубопрокатного цеху;
- розрахунок електромеханічних процесів в базовому варіанті електроприводу:
 - розрахунок втрат та параметрів „Т” – подібної схеми заміщення асинхронного двигуна типу АДО-2000-6000-12У1;
 - економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів в трубопрокатному цеху.

Електропривод - це енергосилова основа сучасного виробництва, що споживає близько 70 % усієї електроенергії, отже, основний ефект енергозбереження може бути отриманий у цій сфері. Велика частина електроенергії споживається електроприводами постійного струму, тому основний напрямок - це перехід від нерегульованого та регульованого електропривода постійного струму до регульованого електроприводу змінного струму. Цей напрямок прийнято у світовій практиці і інтенсивно розвивається,

тому що прогнозується гострий дефіцит невідновлюваних енергоресурсів, відчутне зростання їхньої вартості. Одне з найбільш ефективних і швидкоокупних методів підвищення енергоефективності, що вимагають відносно невеликих капіталовкладень є впровадження частотно-регульованих асинхронних приводів, що дозволяють оптимізувати режими роботи механізмів в широкому діапазоні зміни навантажень. За допомогою регулювання частоти обертання досягається значний потенціал збереження енергії. У світовій практиці починає широко використовуватися частотно-регульований асинхронний електропривод зі стандартними короткозамкненими асинхронними електродвигунами загального застосування. Це обумовлено появою великої кількості створених і відносно недорогих перетворювачів частоти, побудованих на сучасній елементній базі.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

1.1 Загальні відомості

Під прокатним станом розуміють комплекс обладнання для виробництва прокатного профілю з усім основним і допоміжним обладнанням, що належить до нього. До основного належить обладнання, що служить безпосередньо для деформації металу (кліті з прокатними валками, приводний двигун валків, редуктори, шестеренні кліті). Все інше обладнання, що необхідне для здійснення технологічного процесу прокатки, називається допоміжним (натискні гвинти, рольганги, шлепери, ножиці, пилки, моталки, насосні станції та ін.)

Прокатні стани класифікують за характером продукції, що випускається (призначенням), температурі металу, що прокатується кількістю і розташуванням валків, кількістю і розташуванням клітей, режиму роботи стану і т. п.

За характером продукції, що випускається розрізняють такі види станів:

1) обтискні (блюмінги, слябінги), що випускають заготовки квадратного (блюми) або прямокутного, плоского перерізу (сляби), які в подальшому використовуються для виробництва відповідно сортового металу (рейок, балок, прутків і т. п.) або листа. В даний час ці функції виконують також машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), обладнані обтискними прокатними агрегатами;

2) заготівельні для додаткового обтиснення блюмів;

3) рейкобалкові для прокатки рейок і великих балок;

4) сортові для виробництва сортового металу різного профілю (куточків, балок, прутків, смуг і т. п.).

По температурі прокатуваного металу розрізняють стани гарячої і холодної прокатки. За гарячої прокатки метал попередньо нагрівають до температури порядку (1000...1250) °С. За кількістю робочих валків кліті прокатні стани поділяють на двовалкові, тривалкові, чотиривалкові. За розташуванням валків розрізняють кліті з горизонтальними, вертикальними і косими валками. За кількістю робочих клітей стани діляться на одноклітьові і багатоклітьові.

Для електроприводу клітей більшості прокатних станів можна виділити три види руху: реверсивний регульований, неревверсивний регульований і неревверсивний нерегульований. Реверсивний стан має одну кліть, прокатка в якій виробляється в обох напрямках. Неревверсивний (безперервний) стан має ряд робочих клітей, розташованих послідовно. Кліті встановлені таким чином, що метал, який прокочується одночасно знаходиться в декількох клітях. У безперервних станах заготівля обтискаються у кожній з клітей один раз і напрямок прокатки не змінюється. Найбільше застосування знаходять реверсивні одноклітьові стани, а також безперервні багатоклітьові.

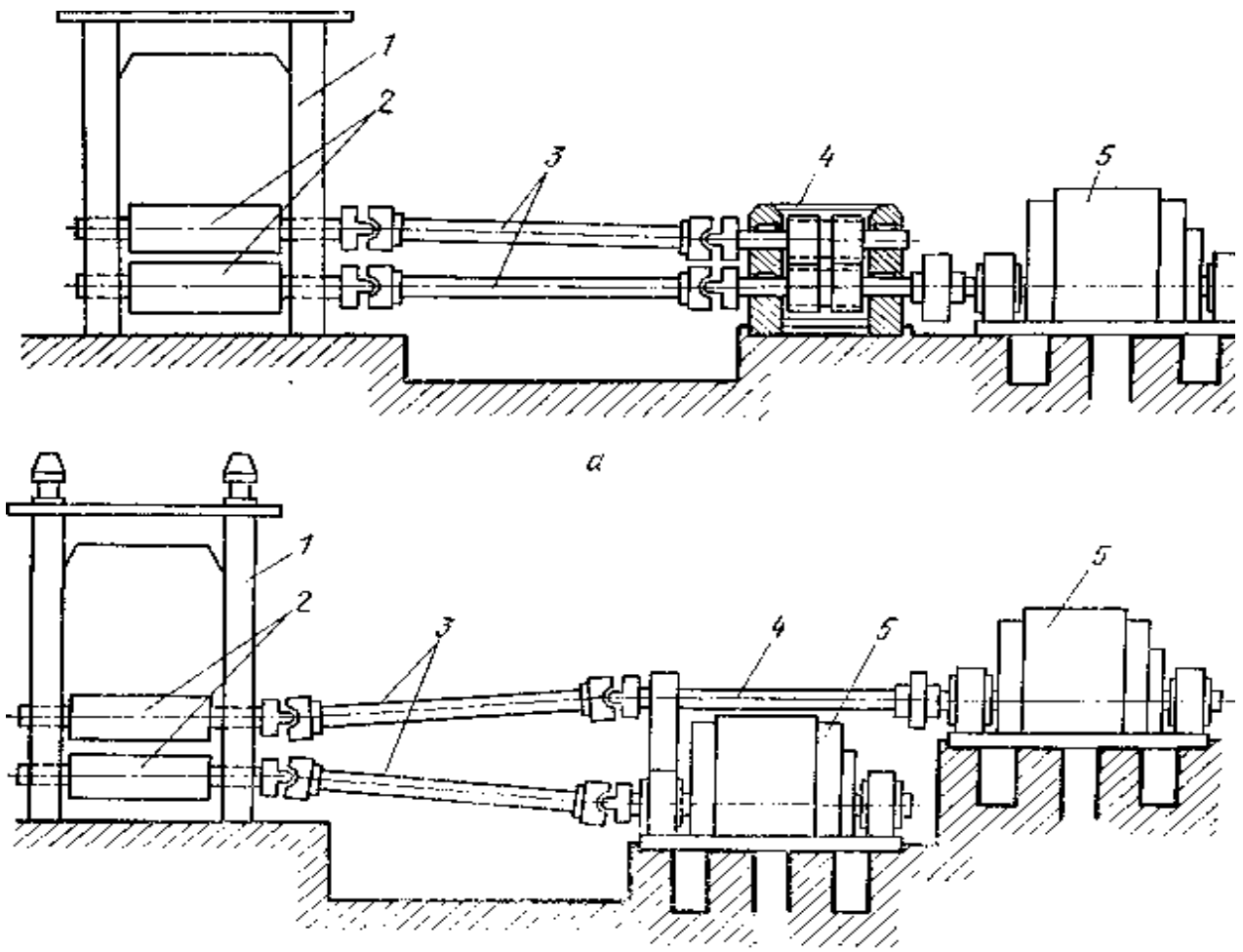
Напрямок обертання валків реверсивного стану змінюється після кожного проходу; прокатка здійснюється у двох напрямках: прямому і зворотному. Цикл роботи реверсивного привода валків стану включає розгін двигуна вхолосту до швидкості захоплення, розгін з металом у валках, прокатку на максимальній для циклу швидкості, уповільнення з металом у валках до швидкості викиду, уповільнення на холостому ході і реверс двигуна.

Привід прокатних станів може бути редукторним, але частіше виконується безредукторним. Перевагою безредукторного приводу є менша інерційність, більш проста кінематична схема, менші габарити і т. д. Використовується як груповий, так і індивідуальний привід валків.

На рисунку 1.1 представлені схеми існуючих реверсивних станів з груповим (а) і індивідуальним (б) приводами. Груповий привід містить

шестеренних кліть 4, а в ряді випадків і редуктор. В індивідуальному приводі, де кожен з прокатних валків має свій приводний двигун, ці елементи відсутні.

Використання індивідуального приводу валків дозволяє збільшити граничну потужність приводу кожного валка і, відповідно, збільшити прискорення і уповільнення приводу, а отже, продуктивність стану; при цьому відпадає потреба в точному підборі діаметра валків[1].



1- станина кліті; 2 - прокатні валки; 3 - універсальні шпинделі, 4 - шестеренні кліті (на рисунку "б" - вал); 5 - електродвигун

Рисунок 1.1 – Схема реверсивних станів з груповим (а) і індивідуальним (б) приводами

До інших переваг індивідуального приводу валків перед груповим відносяться: зменшення сумарного моменту інерції, що припадає на одиницю потужності приводу; відсутність шестеренної кліти, втрати потужності в якій можуть досягати 5 % потужності приводу; зменшення моменту інерції, що дозволяє додатково збільшити допустимі значення прискорення і уповільнення приводу і підвищити його продуктивність, знизити втрати енергії при перехідних процесах.

Індивідуальний привід дозволяє регулювати співвідношення швидкостей валків. У цьому випадку, вибираючи швидкість нижнього валка більш високою, домагаються вигину металу вгору, що сприяє кращому проходженню металу по рольгангу. У разі використання індивідуального приводу поліпшуються умови захоплення і підвищується швидкість захоплення; знижуються габарити двигунів, підвищується ККД.

Найбільший ефект дає застосування індивідуального приводу на потужних обтискних станах з діаметром валків (1100...1300) мм. Практика показує, що в процесі прокатки навантаження між двома двигунами кліти розподіляється нерівномірно. Тому індивідуальний привід має забезпечити підтримку заданого співвідношення швидкостей валків без навантаження, а також вирівнювання навантажень на двигуни. Вирівнювання навантаження здійснюють звичайно шляхом впливу на напругу якоря або на струм збудження двигуна таким чином, щоб більш завантажений двигун зменшував швидкість, а менш завантажений - збільшував. Зокрема, при неузгодженості струмів двигунів напруги менш завантаженого двигуна збільшується. При цьому відбувається вирівнювання навантаження. У схемах, де з метою вирівнювання навантажень використовується вплив на струм збудження двигунів, у разі неузгодженості навантажень струм порушення більш навантаженого двигуна повинен збільшуватися, а менш навантаженого зменшуватися.

У той же час для більш дрібних станів (обтискних, заготівельних, рейкобалкових та ін.) більш доцільним може виявитися застосування групового

приводу. У порівнянні з індивідуальним груповий привід має менше електрообладнання, яке і менш складне.

У залежності від функціонального призначення режиму прокатки та інших факторів режими роботи електроприводу будуть відрізнятися. Однак, як правило, режими ці є важкими. Вони характеризуються ударним додатком навантаження в момент захоплення металу, широким діапазоном регулювання швидкості, великими динамічними перевантаженнями, особливо в період розгону приводу з металом у валках. З огляду на такий режим роботи і високі вимоги, що стосуються діапазону регулювання швидкості, в більшості випадків у головних механізми прокатних станів використовують привід постійного струму з підлеглою системою регулювання.

1. 2 Електродвигуни прокатних станів

В установках потужністю до 200 кВт використовуються в основному серійні двигуни, а для установок більшої потужності розробляються спеціальні двигуни, які є базовими для свого типорозміру.

Для приводу валків потужних прокатних станів застосовують електродвигуни постійного струму типу МП, П, ПС. Цифри після літерного позначення двигуна позначають його потужність і частоту обертання: МП600-300 (600 кВт, 300 об / хв); МП 1000-210 (1000 кВт, 210 об / хв) і т. д.

Однією з основних характеристик двигуна прокатного стану є його технічний показник :

$$\alpha = \frac{P_n \cdot M_n}{J} . \quad (1.1)$$

Чим вищий цей показник, тим більша продуктивність стану може бути забезпечена при даній потужності двигуна. Важливість технічного показника при оцінці рівня електричної машини пояснюється тим, що просте збільшення номінальної потужності і моменту двигунів далеко не завжди може дати належний ефект, якщо не врахувати їх динамічні показники.

В таблиці 1.1 наведені технічні дані електродвигунів головних електроприводів реверсивних станів гарячої прокатки.

З метою підвищення одиничної потужності двигунів при високих динамічних показниках в прокатних станах використовуються електродвигуни так званої граничної потужності[1, 2].

Таблиця 1.1. - Технічні дані електродвигунів головних електроприводів реверсивних станів гарячої прокатки.

Тип двигуна	МП 11000-65	МП 9000-16	МП 11500-60	МП 12 500-6
Потужність P_n , кВт	8000	8700	11500	12500
Напруга, В	900	700	930	930
Частота обертання, об/хв	65/90	60/90	60/90	60/90
Момент номінальний, M_n , кН·м	1180	1420	1750	1900
Момент інерції, $T \cdot m^2$	75	75	125	125
Технічний показник, $103 \text{ кВт} \cdot \text{кН} \cdot \text{м} / (T \cdot m^2)$	126	164	161	190

Гранична потужність двигунів постійного струму обмежується допустимою напругою між сусідніми колекторними пластинами (10...20) В, нагріванням якоря, максимально допустимої окружною швидкістю якоря (70 м / с).

Подальший розвиток електродвигунів прокатних станів здійснюється в наступних напрямках: підвищення одиничної потужності реверсивних прокатних електродвигунів постійного струму до 16 МВт; поліпшення конструкції магнітопривода з використанням магнітом'яких і магнітотвердих сталей і сплавів; розвиток принципів нової електромагнітної геометрії на основі складних обмоток якоря - двоходових і триходових. Застосування багатоходових обмоток дозволяє зменшити діаметр якоря і, відповідно, момент інерції двигуна даної потужності; підвищити окружну швидкість якоря; підвищити ККД; розширити діапазон регулювання швидкості шляхом зміни напруги.

Значний ефект дає застосування в двигунах компенсаційної обмотки, що забезпечує високі динамічні показники; використання в потужних прокатних двигунах явища надпровідності. Надпровідна обмотка збудження дозволяє значно підвищити робочу індукцію, виключити магнітопровід, вносить корінні зміни в конструкцію двигуна - знижує масу, розміри машини, момент інерції якоря, завдяки чому поліпшуються його динамічні та експлуатаційні характеристики. Проводяться роботи з впровадження на прокатних станах регульованого електропривода змінного струму: частотно-регульованого; приводу з зверненими синхронними двигунами і приводу з вентильними двигунами. У деяких випадках, наприклад в приводі чорнових клітей безперервних станів гарячої прокатки, використовуються синхронні електродвигуни; в приводі окалиноламачів таких станів застосовуються асинхронні електродвигуни.

Експлуатаційні характеристики двигунів. Для оцінки показників електродвигунів використовуються експлуатаційні характеристики, що представляють собою залежність моменту M , струму якоря I_a , напруги якоря двигуна U потужності P і потоку Φ від швидкості [1, 3].

Як відомо, в процесі обтиску з кожним пропуском момент прокатки знижується, а довжина смуги зростає. З метою збільшення продуктивності

стану в цьому випадку доцільно підвищити швидкість приводу вище основної, використовуючи двозонне регулювання. Однак при зниженні магнітного потоку і збільшення швидкості двигуна змінюється його перевантажувальна здатність, що необхідно враховувати з метою забезпечення надійної та ефективної роботи електропривода.

Для двигунів реверсивних прокатних станів розрізняють номінальні, максимальні робочі та максимальні вимикаючі значення моменту, струму, потужності.

Номінальні експлуатаційні характеристики будують для тривалого режиму роботи, виходячи з умови, що струм якоря, що визначає нагрівання двигуна у всьому діапазоні швидкостей, не повинен перевищувати номінального значення I_n . Такі характеристики наведені на рисунку 1.2.

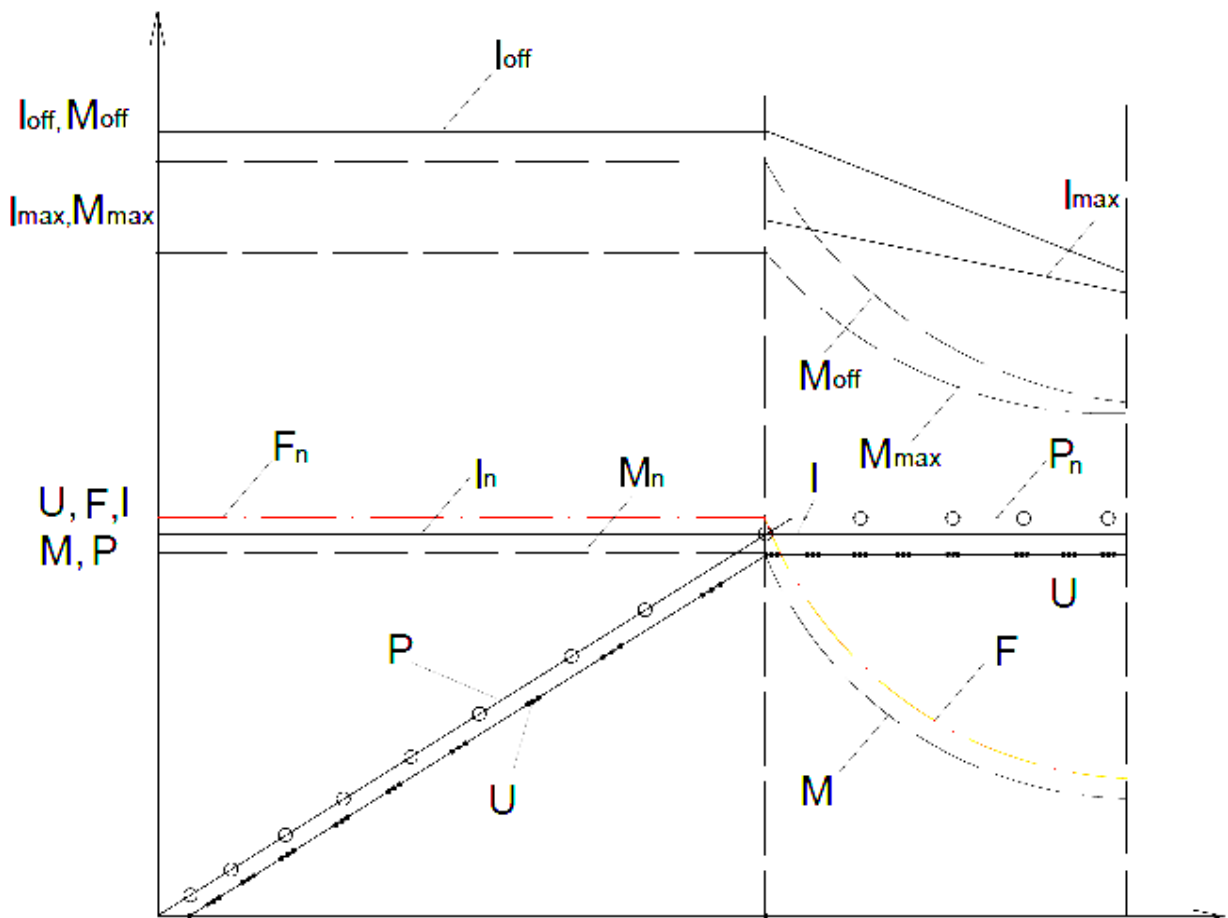


Рисунок 1.2 – Експлуатаційні характеристики прокатного електродвигуна

Регулювання швидкості від нуля до основної $\omega \leq \omega_n$ здійснюється шляхом зміни напруги U , що підводиться до якоря двигуна при номінальних значеннях струму I_n і потоку двигуна Φ_n , тобто при постійному моменті $M = k_m \cdot \Phi_n \cdot I_n$ та змінної потужності $P = M \cdot \omega$, пропорційної ω . При $\omega = \omega_n$ потужність $P = P_n$ [4].

Регулювання швидкості вище номінальної виконується шляхом зменшення потоку двигуна Φ_n при постійній нарузі U , що підводиться до якоря, тобто при постійній потужності і змінному моменті $M = \frac{P}{\omega}$. При цьому зміна магнітного потоку визначається ставленням $\Phi = \frac{\Phi_n \cdot \omega_n}{\omega}$, а допустимий момент двигуна $M = \frac{M_n \cdot \omega_n}{\omega}$. Таким чином, допустимий момент двигуна і його магнітний потік при $\omega > \omega_n$ змінюються обернено пропорційно швидкості.

Для більш повного використання прокатного двигуна і підвищення продуктивності подолання при роботі динамічних навантажень, що виникають (наприклад, при розгоні приводу з металом у валках) здійснюється з урахуванням перевантажувальної здатності двигуна, яка залежить від швидкості. Максимально допустимі значення струму I_{\max} і моменту M_{\max} двигуна при регулюванні кутової швидкості від нуля до номінальної залишаються постійними $M_{\max} = \lambda \cdot M_n$, де λ - перевантажувальна здатність двигуна при $\omega \leq \omega_n$.

Зі збільшенням швидкості двигуна зростає його е.р.с, внаслідок чого погіршуються умови комутації, що вимагає зниження моменту і струму двигуна.

Максимальні робочі експлуатаційні характеристики (рисунок 1.2) будують, виходячи з умови, що гранично допустимий струм I_{\max} для кожного

значення кутової швидкості повинен забезпечувати надійну комутацію двигуна.

Гранично допустимий момент знижується при збільшенні швидкості $M_{\max} = \lambda \cdot M_n \omega_n / \omega$, де λ - допустиме перевантаження двигуна при $\omega > \omega_n$.

Під максимальними значеннями моменту вимкнення $M_{\text{вим}}$, потужності, струму розуміють ті їх значення, при яких двигун відключається від джерела живлення. Зазвичай ці величини на (15...20) % вище їх максимальних робочих значень при кутовій швидкості $\omega > \omega_n$ і на 25 % – при кутовій швидкості $0 - \omega_n$.

1.3 Електропривод реверсивних станів

До реверсивних станів, де прокатка здійснюється як в прямому, так і зворотному напрямках, а напрямок обертання валків змінюється після кожного проходу, відносяться обтискні стани (слябінг, блюмінг); чотирихвалкові кліті товстолистових станів; реверсивні кліті заготовочних, рейок-балкових, листових станів, реверсивних станів холодної прокатки і т. п.

Перед кожним пропуском відбувається розгін стану вхолосту. При певній швидкості, яку називають швидкістю захоплення, у валки надходить прокочуваний метал. Після захоплення стан знову розганяється з металом у валках. Перед кінцем прокатки швидкість знижується з таким розрахунком, щоб злиток не був викинутий на велику відстань від кліті. Другий пропуск відбувається у зворотному напрямі, після реверсу. Після другого пропуску злиток зазвичай кантують і знову рольгангом направляють до робочих валків

для наступного пропуску. Загальна кількість пропусків зазвичай від 9 до 19. В останньому пропуску викид злитку проводиться з максимальною швидкістю, оскільки в цьому випадку метал не повертається назад в кліть[2].

Під час паузи між пропусками за допомогою натискного пристрою в кліті проводиться переміщення верхнього валка відповідно до необхідного обтисненням. У разі необхідності заготівля переміщається в поперечному напрямку по рольганги за допомогою лінійок маніпулятора і кантів (повертається на 90° навколо своєї поздовжньої осі) з допомогою кантувача.

Захоплення і викид смуги проводиться на знижених швидкостях. Швидкість захоплення $v_3 = (1,0 \dots 1,75)$ м/с ($n_3 = (15 \dots 30)$ об/хв); швидкість викиду $v_B = (1,5 \dots 2,0)$ м/с ($n_3 = (25 \dots 40)$ об/хв). Порівняно невелика швидкість при захопленні пояснюється умовами надійного захоплення металу валками. Як відомо, гранична швидкість захоплення визначається коефіцієнтом тертя металу об валки, який знижується зі збільшенням швидкості. Максимальна швидкість прокатки становить $(5 \dots 6)$ м/с ($100 \dots 120$) об/хв. Розгін і гальмування приводу здійснюються з металом у валках.

У перших пропусках довжина злитку невелика і швидкість не встигає досягти номінального значення v_n (рисунок 1.3).

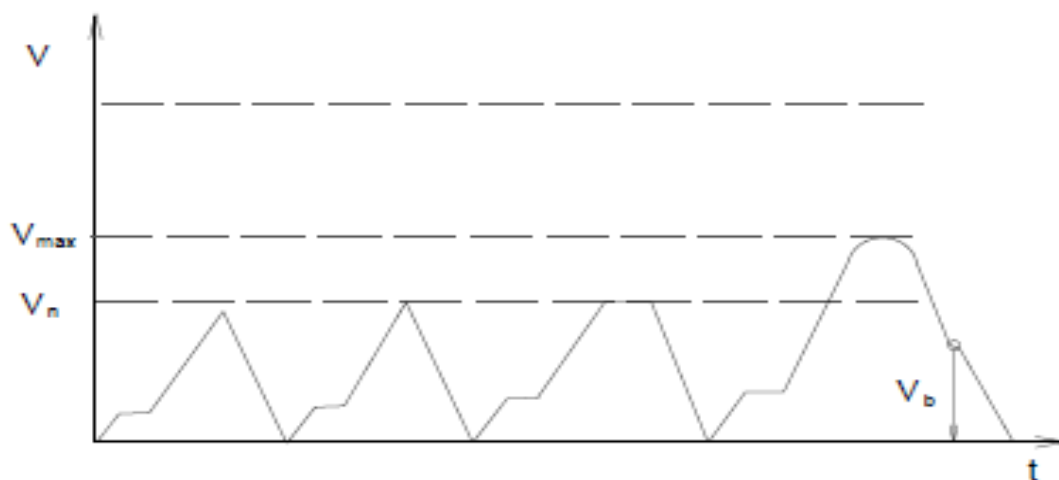


Рисунок 1.3 – Графіки швидкості прокату реверсивного стану

Графік швидкості в перших пропусках - трикутний. Зі збільшенням номера пропуску довжина злитку збільшується, а перетин зменшується. Для підвищення продуктивності стану швидкість робочих валків зі збільшенням номера пропуску збільшується і досягає номінального значення V_n . Після цього графік швидкості може набувати виду трапеції. Однак часто в останніх пропусках, коли заготівля досягає значної довжини, збільшують швидкість вище номінальної шляхом ослаблення поля двигуна. У цьому випадку темп прискорення і уповільнення необхідно знизити, і графік швидкості приймає вигляд, показаний на рисунку 1.3 [1, 6].

Електродвигуни реверсивних прокатних станів працюють у дуже напруженому режимі, який характеризується великою частотою пусків (до 1500 в годину), частими реверсами, зупинками, великими перевантаженнями. У момент захоплення металу валками різко зростають струм двигуна і його момент. Поштовхи струму досягають (250...300) % від номінального значення. Прискорення стану проводиться зі злитком у валках, що пов'язано з великими додатковими динамічними моментами і, як наслідок, перевантаженнями двигуна. Практично двигун реверсивного стану весь час працює в перехідних режимах, причому потрібне глибоке й плавне регулювання швидкості.

З урахуванням цих специфічних особливостей роботи до електроприводу прокатних станів висувають високі вимоги, основні з яких наступні: широкий діапазон регулювання швидкості (не менше 10:1); висока перевантажувальна здатність ($\lambda \geq 2,5$); жорсткість механічних характеристик; високі динамічні показники, зокрема мінімальний момент інерції, великий пусковий та максимальний моменти; мінімальний час перехідних процесів при заданому значенні динамічного струму; обмеження струму якоря двигуна при перевантаженнях у відповідності з експлуатаційною характеристикою; надійна зупинка приводу при нульовому положенні командоапарата (відсутність «повзучої» швидкості); сталість величини прискорення приводу при роботі до основної швидкості; висока експлуатаційна надійність.

Реверсивні кліті слябінгів, товстолистових, балкових станів можуть мати, крім горизонтальних прокатних валків, пару допоміжних вертикальних валків для обтиску бічних граней заготовки. Такі кліті називаються універсальними. Прокатка відбувається одночасно в обох парах валків.

Щоб метал, що прокочується не відчував стиснення або розтягування, необхідно забезпечити рівність секундних обсягів металу:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2, \quad (1.2)$$

де v_1, v_2 - лінійні швидкості прокатки відповідно в горизонтальних і вертикальних валках;

A_1, A_2 - площі поперечного перерізу металу.

Для забезпечення прокатки без натягів і підпорів необхідно підтримувати співвідношення кутових швидкостей горизонтальних і вертикальних валків відповідно до вираження :

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{A_1 \cdot D_1 \cdot (1 + S_1)}{A_2 \cdot D_2 \cdot (1 + S_2)}, \quad (1.3)$$

де $\frac{D_1}{D_2}$ - діаметри валків;

S_1, S_2 - випередження металу при виході з валків.

Випередження залежить від ряду факторів, у тому числі від натягнення або підпору металу між валками.

Співвідношення швидкостей горизонтальних і вертикальних валків змінюється при зміні напрямку прокатки, а також при переточуванні валків. Якщо знехтувати випередженням металу, то співвідношення між швидкостями валків при прокатці від вертикальних валків до горизонтальних повинно бути

$$S_1 = \frac{v_1 - v_n}{v_n}. \quad (1.4)$$

На слябінгу зміна співвідношення швидкостей валків не впливає на якість сляба. Але при цьому можливе перевантаження двигуна вертикальних валків, оскільки цей двигун має меншу потужність, ніж двигун горизонтальних валків. Тому в електроприводі універсальних клітей необхідно вводити пристрій узгодження швидкостей валків.

Реверсивні обтискні стани мають в основному безредукторний електропривод постійного струму по системі ТП-Д або Г-Д - індивідуальний, і рідше – груповий з шестеренною кліттю. У приводі використовуються реверсивні прокатні електродвигуни спеціального металургійного виконання з підвищеною механічною і електричною міцністю (посилені підшипники і кріплення обмоток якоря, теплостійка ізоляції і т. п.). Перевантажувальна здатність становить (2,5...3); станини двигунів виконують роз'ємними для зручності монтажу і ремонту. Потужність головного приводу горизонтальних валків досягає (12...13) МВт, тому сучасні потужні обтискні стани мають тільки індивідуальний привід валків. Напруга двигунів (750...1000) В, номінальна частота обертання (50...65) об/хв і максимальна при ослабленому полі до 120 об /хв [7].

Приводи сучасних реверсивних станів гарячої прокатки виконуються в даний час по системі тиристорний перетворювач-двигун постійного струму. Система управління будується за принципом підлеглого регулювання на елементах УБСР і її модифікацій. Живлення ланцюга якоря двигуна здійснюється від реверсивного перетворювача, що має дві групи вентилів з роздільним або спільним управлінням. Для електроприводів випускаються тиристорні агрегати в нереверсивні і реверсивному виконаннях потужністю до 16 МВт.

1.4 Схеми електроприводу реверсивного стану гарячої прокатки

Як зазначалося, на обтискних реверсивних станах ще досить широко використовується привід постійного струму, виконаний за системою Г-Д. Пояснюється це відомими труднощами заміни зазначеного приводу на тиристорний на діючих станах[1, 2].

На рисунку 1.4 представлена схема приводу реверсивного стану, виконана за системою Г-Д.

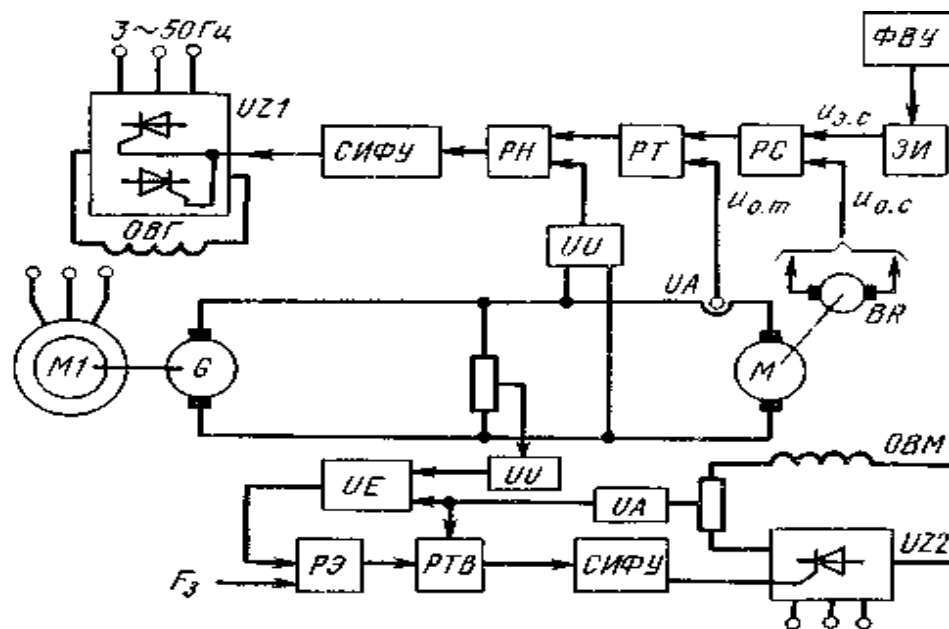


Рисунок 1.4 – Схема електроприводу реверсивного стану гарячої прокатки, виконаного за системою Г-Д

Двигун постійного струму М отримує живлення від електромашинного генератора С, який приводиться в обертання синхронним двигуном М1. Обмотка збудження ОБГ генератора підключена до реверсивного тиристорного перетворювача VII. Як зазначалося раніше, все управління приводом валків (розгін, гальмування, реверс, регулювання швидкості і ін.) здійснюється в

даному випадку шляхом впливу на обмотку збудження генератора ОВГ. За допомогою обмотки збудження двигуна ОВМ здійснюється лише двозонне регулювання швидкості. Обмотка ОВМ отримує живлення від нереверсивного тиристорного перетворювача С/22. Як зазначалося, на сучасних реверсивних станах гарячої прокатки передбачається тиристорний електропривод постійного струму.

Система управління – багатоконтурна з підлеглим регулюванням параметрів, з двозонним регулюванням швидкості. Вона виконана на базі універсальної блокової системи регулювання УБСР. Для живлення якоря двигуна М1 використаний реверсивний двокомплектний тиристорний перетворювач VII, V22. Харчування обмотки збудження двигуна ОВМ виробляється від нереверсивного тиристорного перетворювача V23.

Система управління приводом складається з двох систем, що здійснюють взаємопов'язане регулювання напруги якоря і струму збудження двигуна. Система регулювання напруги має два контури: контур регулювання швидкості і підлеглий йому контур регулювання струму якоря. У контур регулювання струму якоря входять: датчик струму VA1, регулятор струму РТ, СІФУ, перетворювач V22 або V21 (комплект електрообладнання двигуна М2 аналогічний, на схемі не показаний).

Керування електроприводом, тобто завдання швидкості і напрямку обертання, виробляє оператор за допомогою педального сельсину командоапарата 5,4. Темп розгону визначається задатчиком інтенсивності ЗИ, ступінчастий сигнал, що надходить від 8А через фазовипрямляючий пристрій ФВУ, перетворюється в лінійний та змінюється сигнал завдання швидкості двигуна. Для отримання більш якісного перехідного процесу (виключення перерегулювання) між задатчиком ЗИ і регулятором швидкості РС включений фільтр Ф.

Сигнал завдання швидкості СОЗ на вході регулятора швидкості РС порівнюється з сигналом з, пропорційним фактичній швидкості двигуна, який

отримано від тахогенератора В. Вихідний сигнал регулятора швидкості служить завданням регулятору струму РТ. На вході регулятора струму сигнал завдання і порівнюється з сигналом, пропорційним фактичному значенню струму, отриманого від датчика струму якоря І. Вихідний сигнал регулятора струму подається на вхід системи імпульсно-фазового управління СІФУ реверсивного тиристорного перетворювача 021, 1122, здійснюючи необхідну регулювання напруги на якорі двигуна[8].

У систему управління збудженням входять датчик напруги 11У2, датчик ЕРС.UE, блок завдання ЕРС, регулятор ЕРС РЕ, датчик струму збудження 1/А2, регулятор струму збудження РТВ. Схема керування потоком двигуна також є двоконтурною з головною зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, з підлеглим регулюванням струму збудження. Таким чином, схема складається з двох контурів: контуру струму збудження і контуру ЕРС. У системах підпорядкованого регулювання управління полем двигуна здійснюється зазвичай у функції сталості ЕРС двигуна. За допомогою зворотного зв'язку по ЕРС двигуна і регулятора ЕРС відбувається поділ режимів керування напругою і полем двигуна.

Як зазначалося раніше, при двозонному регулюванні магнітний потік двигуна зберігається постійним, рівним номінальному, до тих пір поки швидкість двигуна при управлінні з якоря не досягне основної. Подальше підвищення швидкості здійснюється ослабленням магнітного потоку двигуна при напрузі на якорі, близькому до номінального.

Зв'язок між системами регулювання напругою і потоком здійснюється через ЕРС двигуна наступним чином. Поки відбувається управління швидкістю напругою якоря, регулятор ЕРС РЕ (рисунок 1.5) знаходиться в насиченому стані (в обмеженні) і розгін двигуна до номінальної швидкості відбувається при номінальному потоці збудження.

Ступінь ослаблення потоку двигуна буде визначатися величиною, що задає сигнал ЕЗ. Зворотній зв'язок по ЕРС двигуна заснований на комбінації

зворотного зв'язку по напрузі двигуна і зворотного зв'язку по струму, що компенсує падіння напруги в ланцюзі якоря двигуна. Здійснюється вона датчиком ЕРС, на вході якого алгебраїчно сумуються сигнали, пропорційні відповідно напрузі якоря [1].

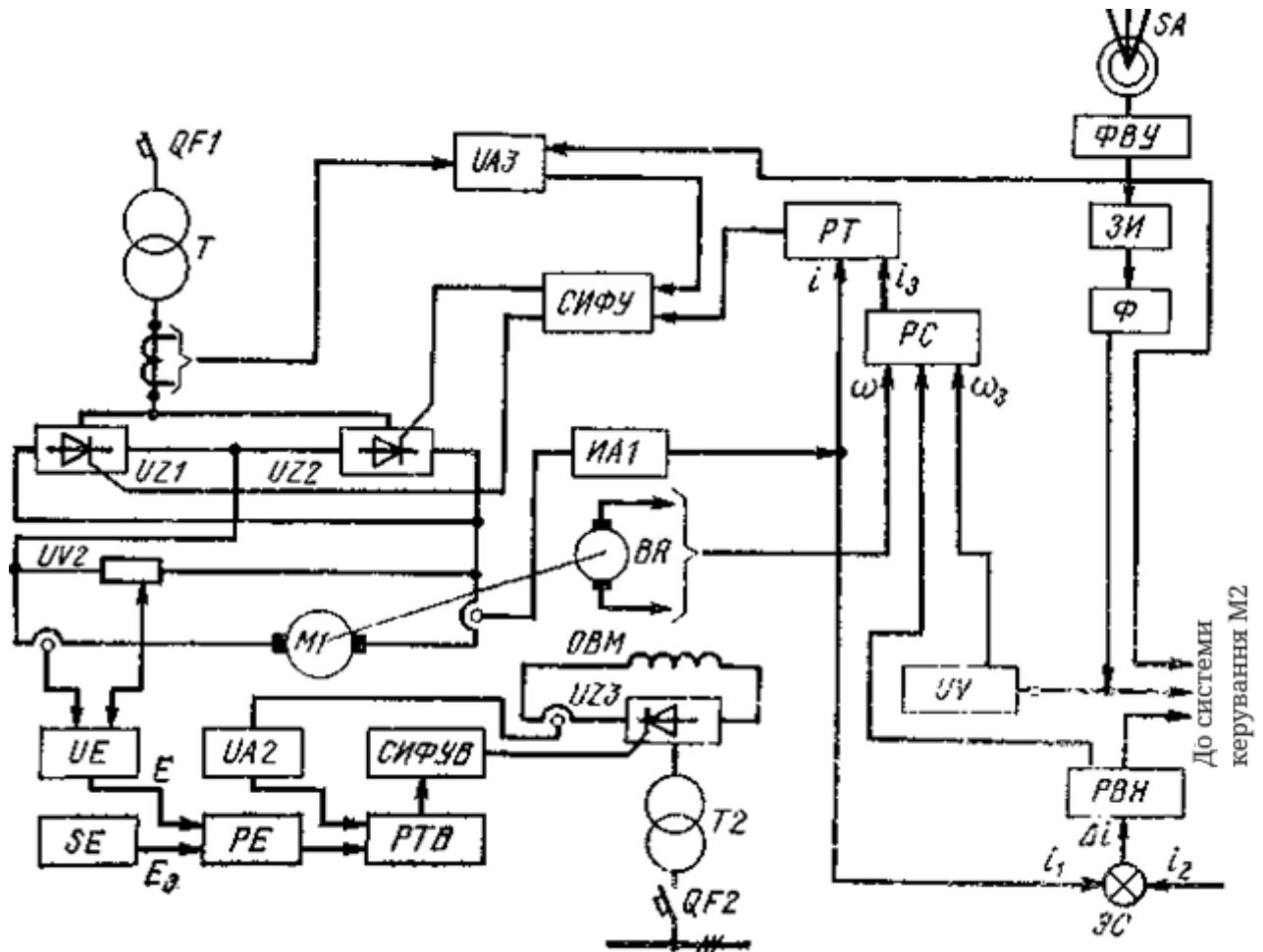


Рисунок 1.5 – Схема електроприводу реверсивного стану гарячої прокатки, виконана за системою ТП-Д

На вході регулятора PE порівнюються два сигнали: сигнал заданого значення протидії ЕРС E_3 і сигнал I ; пропорційні і дійсного значення протидії ЕРС, що надходить від датчика HE. Вихідний сигнал PE є завданням для регулятора струму збудження. На вході РТВ він порівнюється з сигналом, пропорційним дійсному значенню струму від датчика струму збудження 11A2.

Вихідний сигнал регулятора струму РТВ подається на вхід системи імпульсно-фазного керування СІФУ у тиристорного збудника 1123, здійснюючи керування струмом збудження.

Такі елементи, як ЗА, ФВУ, ЗИ, Ф, а також регулятор вирівнювання навантажень РВН, є загальними для систем регулювання напруги якоря і струму збудження двигуна. Сигнал датчика струму 1) А1 поступає на елемент порівняння ЕС, на виході якого сигнал дорівнює різниці струмів двигунів. При рівномірному завантаженні двигунів М1 і М2 сигнал і вихідний сигнал РВН також дорівнює нулю. При перевантаженні, наприклад двигуна М2, на виході РВН з'явиться сигнал. При цьому вихідні сигнали РВН будуть зменшувати завдання на швидкість двигуна М2 і збільшувати завдання на швидкість двигуна М1 на вході регуляторів швидкості РС. Відповідно зменшаться напруга перетворювача, швидкість і струм двигуна М2. У той же час напруга перетворювача, швидкість і струм двигуна М1 збільшаться [1, 6].

До складу тиристорного електропривода входять елементи захисту, сигналізації та блокування. Широко використовуються такі види захистів: від аварійних режимів у перетворювачах, від струмів перевантаження в ланцюзі якоря двигуна, від перевищення напруги на якорі і струмів перевантаження обмотки збудження двигуна, а також від перевищення швидкості двигуна, від зниження рівня ізоляції силових ланцюгів і т.д. При спрацьовуванні захисту відключається привод і включається аварійна сигналізація, показує, який саме захист спрацював. Блокування забезпечують включення приводу тільки при зібраних ланцюгах захисту, потрібну послідовність включення приводу, а також різні технологічні блокування [10].

1.5 Високовольтні перетворювачі для частотно-регульованого електроприводу прокатних станів

Досвід індустріально розвинених країн показує, що при ефективній технічній політиці питання про те, куди направляти капіталовкладення - на збільшення виробництва електроенергії або на енергозбереження, в переважній більшості випадків вирішується на користь інвестицій в енергозбереження. За даними консалтингової групи ARCADvisoryGroup (США) світовий ринок регульованих електроприводів оцінювався приблизно в 2,5 млрд. USD і в найближчі кілька років буде рости щорічно на 5,3 %. Передбачається, що за п'ять років в індустріально розвинених країнах співвідношення нерегульованого і регульованого електропривода складе 1:1.

Створення силових напівпровідникових приладів з новими властивостями і характеристиками дозволило здійснювати перетворення електричної енергії у формах, найбільш зручних для її електромеханічного перетворення, що відкрило широкі можливості для створення технічно досконалих регульованих електроприводів. А використання досягнень мікропроцесорної та комп'ютерної техніки принципово змінило елементну базу, функціональні можливості і «інтелект» систем керування електроприводами.

У спектрі засобів силовій електроніки для автоматизованого електроприводу з асинхронними двигунами особливе місце займають високовольтні перетворювачі частоти з регульованою вихідною частотою (ВПЧ). У парку асинхронних двигунів України значна частка припадає на високовольтні двигуни напругою 6000 В, шкала потужностей яких охоплює ряд (250...8000) кВт.

Очевидно, що найбільший енергозберігаючий ефект слід очікувати при переведенні в режим з регульованою частотою обертання двигунів високої потужності. Саме з такими приводними двигунами (наприклад, за даними EPRI

інститут електроенергетики США), в рамках реалізації програми з реконструкції 60 енергоблоків ТЕС введені більше 300 частотно-регульованих асинхронних електроприводів потужністю (630...4500) кВт напругою 2400, 4160 і 6600 В, що забезпечило річну економію електроенергії близько 1 млрд.кВт·год. Крім прямої економії електроенергії, застосування потужних частотно-регульованих електроприводів з ВПЧ дозволило підняти потужність енергоблоків.

Вище наведений приклад свідчить про високу ефективність застосування регульованих електроприводів з ВПЧ. Тому більшістю провідних електротехнічних фірм особлива увага приділяється розробкам високовольтних перетворювачів з регульованою вихідний частотою. Незважаючи на відмінності в технічній політиці фірм у цій області (що пов'язано з досить гострою конкуренцією, необхідністю проведення дорогих досліджень і т.п.), в цілому можна виділити деякі тенденції загального підходу до створення електроприводів з високовольтними перетворювачами з регульованою вихідною частотою:

- забезпечення електромагнітної сумісності автономного інвертора і асинхронного двигуна, що дозволяє використовувати стандартні двигуни практично без їх розвантаження за потужністю;
- оптимізація параметрів високовольтного «вентиля», що складається з послідовно з'єднаних силових напівпровідникових приладів, що особливо важливо при застосуванні приладів нового типу (IGBT, GTO, IGCT, SGCT);
- діагностика вентильного обладнання перетворювача, що забезпечує превентивний контроль силової схеми;
- вдосконалення функцій мікропроцесорного контролера;
- розширення можливостей (опцій), що надаються замовнику для різних технологічних застосувань високовольтного частотно-регульованого електропривода (двигуни прокатних станів, насоси, вентилятори, компресори, конвеєри);

- вдосконалення тест-контролю елементів обладнання та вихідного контролю перетворювачів частоти;
- застосування нових конструкційних матеріалів, оптоелектроніки, вдосконалення системи охолодження силових напівпровідникових приладів;
- забезпечення електромагнітної сумісності високовольтних перетворювачів з системою електропостачання та відповідності показників якості електроенергії чинним стандартам.

Як відомо, частотне управління є найбільш економічним способом плавного регулювання частоти обертання асинхронного двигуна. Він у всьому діапазоні регулювання працює з малою величиною ковзання ротора (малими втратами ковзання), зберігає високий коефіцієнт корисної дії (ККД) і хорошу «жорсткість» механічних характеристик, може працювати в руховому і генераторному режимі.

Найбільше застосування для широкодіапазонного регулювання частоти обертання асинхронних двигунів отримали дволанкові ВПЧ. Такі пристрої перетворюють електроенергію мережі в електроенергію з необхідними значеннями напруги, струму та частоти в два етапи. На першому з допомогою випрямляча відбувається перетворення струму та напруги мережі з частотою 50 Гц в постійні струм і напругу.

На другому етапі постійні струм і напруга перетворюються в змінні, але вже з новими, необхідними для забезпечення бажаного режиму роботи електродвигуна значеннями струму, напруги і частоти. Це перетворення здійснюється спеціальними пристроями - автономними інверторами.

Автономним інвертор названий тому, що його робота не пов'язана безпосередньо з мережею живлення. Автономний інвертор може працювати, наприклад, і від акумуляторної батареї, а не тільки від мережевого випрямляча. Незважаючи на громіздкість такого методу перетворення, ККД дволанкових ВПЧ виявляється досить високим (96,5...98,5) %. Це зумовлено ефективністю

застосовуваних силових напівпровідникових приладів у ключовому режимі роботи.

Якщо автономний інвертор отримує живлення від джерела напруги, тобто від джерела з малим внутрішнім опором (акумуляторна батарея, випрямляч з ємкісним фільтром), то на його виході при перемиканні силових напівпровідникових «ключів» може бути отримано змінну напругу у формі послідовності різнополярних прямокутних імпульсів. Перша гармоніка такій послідовності повинна відповідати необхідному значенню вихідної напруги. У цьому випадку для навантаження – асинхронного електродвигуна, інвертор також є джерелом з малим внутрішнім опором, тобто – джерелом напруги. Такий інвертор називається автономним інвертором напруги (АІН).

На українському ринку з початку 90-х років минулого століття для економічного регулювання потужних насосних та вентиляторних установок застосовуються різні ВПЧ з автономними інверторами, в основному – виробництва західних фірм. Відмінності в технічних рішеннях таких фірм, як ABB, Siemens, Allen-Bradley, Toshiba, Mitsubishi, Robicon, Ansaldo, Alstom, ESTEL, GE, Hyundai, що пропонують українським споживачам ВПЛ і прагнуть забезпечити свою присутність на українському ринку, визначають доцільність проведення аналізу їх продукції і в першу чергу застосування автономних інверторів. Адже в переважній більшості випадків вони повинні сполучатися з серійними асинхронними двигунами українського виробництва.

Одним з найважливіших критеріїв при оцінюванні ефективності автономних інверторів є забезпечення їх електромагнітної сумісності зі стандартними асинхронними двигунами. Будучи джерелом вищих гармонік, вони впливають як на втрати в двигуні та його допустиме навантаження, так і на ізоляцію статора. Ця обставина є особливо важливою, і її потрібно враховувати при виборі типу інвертора і відповідно ВПЧ для стандартних високовольтних асинхронних двигунів, які мають обмежені запаси за ізоляційної міцності. У системі «ВПЧ-асинхронний двигун» можна

використовувати будь-який стандартний двигун, але необхідно враховувати зниження допустимого моменту внаслідок додаткових втрат через вищі гармоніки в струмі автономного інвертора і погіршення умов охолодження самовентилюваних двигунів при роботі в діапазоні регулювання частоти обертання.

Це обмеження не настільки критично для частотно-регульованих електроприводів турбомеханізмів з квадратичною характеристикою моменту опору, оскільки в цьому випадку при зниженні частоти обертання активно знижується струм навантаження двигуна.

Електричний вплив вихідної напруги інвертора на ізоляцію статора залежить від топології АІН та алгоритмів керування. Радикальне рішення, найбільш ефективно забезпечує електромагнітну сумісність інвертора та електродвигуна практично без розвантаження останнього, - застосування широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) при управлінні інвертором. ШІМ дозволяє сформувати квазисинусоїдальні форми струму в асинхронному двигуні з сумарними нелінійними спотвореннями (total harmonic distortion) менше (5...6)%. Хоча коло раціональних технічних рішень і схем ВПЧ з автономними інверторами струму і напруги в цілому визначився, процес їх вдосконалення безперервно триває. З одного боку, їх характеристики значною мірою визначають техніко-економічні показники електропривода в цілому, з іншого – істотно впливають на цей процес. Нарешті, такий важливий фактор, як застосування комп'ютерного управління і спеціалізованих мікропроцесорних контролерів, дозволяє формувати нові споживчі характеристики регульованого електроприводу.

Тип силового напівпровідникового приладу істотно впливає на топологію силової схеми автономного інвертора та ВПЧ в цілому. На зміну інверторів струму на SCR-тиристорах (що включаються з управління) з конденсаторної комутацією приходять інвертори напруги і струму на повністю керованих (що

включаються і вимикати по управлінню) GTO, IGCT і SGCT-тиристорах, а також на силових біполярних транзисторах з ізольованим затвором - IGBT.

Використання нових напівпровідникових приладів дозволило принципово змінити не тільки топологію силової схеми інвертора, перш за все АІН, а й принципи управління інверторами. Для АІН на повністю керованих «високовольтних ключах» застосовуються різні технології широтно-імпульсної модуляції: ШІМ зі «стеженням» (релейного типу), програмна ШІМ з виборчим придушенням вищих гармонік, багаторівнева ШІМ, ШІМ в комбінації з амплітудно-імпульсною модуляцією і т.п.

Підхід більшості виробників до топології автономних інверторів у ВПЧ можна звести до наступних принципів рішенням:

- виконання АІН з трьома рівнями напруги (3-level) та комутацією в «зірку» (з фіксованою нульовою точкою або фіксованою нейтраллю (Neutral-Point Clamped - NPC));
- виконання АІН з чотирма рівнями напруги (4-level);
- виконання АІН багаторівневим (Multi-level).

Першими на початку 80-х років були створені ВПЧ, що містять автономні інвертори струму на SCR-тиристорах. Переключення тиристорів в таких АІС забезпечується введенням тим чи іншим способом додаткової ЕРС в контур комутації. Як джерело такої ЕРС в цих інверторах використовують конденсатори.

Схема на рисунку 1.6 розроблена під ВНІЕ більше 20 років тому і є базовою для ВПЧ серії ЕТВА, застосовуваних у частотно-регульованих електроприводах потужністю (630...5000) кВт, напругою 6000 і 10000 В. Промислове виробництво таких перетворювачів було освоєно Талліннським електротехнічним заводом (нині фірма ESTEL). Основне обмеження цього інвертора - комутаційні піки в вихідній напрузі і великий вміст вищих гармонік в інвертованих струмі й напрузі.

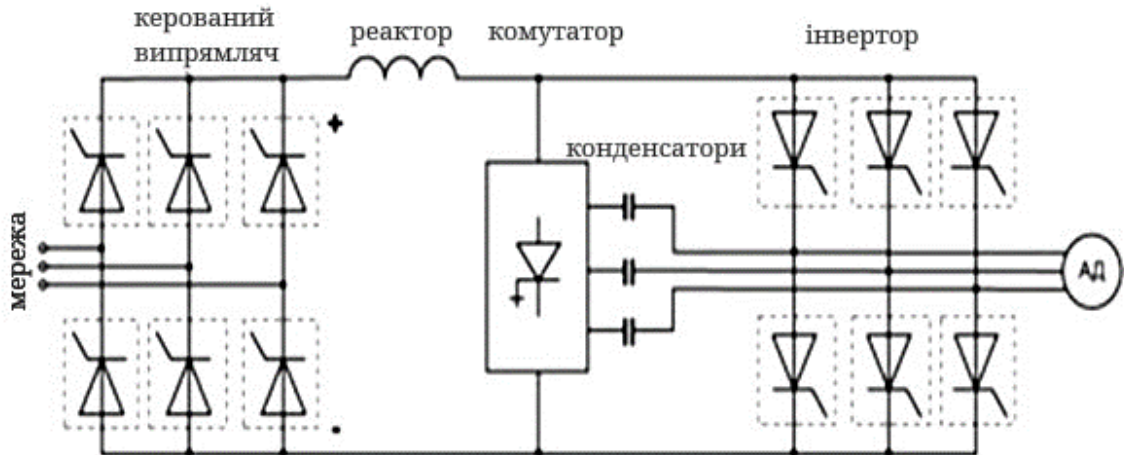


Рисунок 1.6 – Схема ВПЛ на основі автономного інвертора струму

Осцилограма на рисунку 1.7, що знята на електроприводі ЕТВА живильного насоса ТЕС, ілюструє форми струму в фазі і лінійної напруги статора асинхронного двигуна при частоті порядку 32 Гц [18]. Зміст вищих гармонік в струмі й напрузі для цього електропривода при частоті 50 Гц показано в таблиці 1.2.

Слід зазначити, що, незважаючи на «примусову» конденсаторну комутацію в цій схемі АІТ, комутаційний пік напруги формується у два етапи. Амплітуда напруги, прикладається до статора двигуна, завантаженого на (90...95) %, не перевершує 1,25 амплітуди номінальної лінійної напруги, що дозволяє використовувати серійні асинхронні двигуни з перенавантаженням не більше $0,9 U_{ном}$.

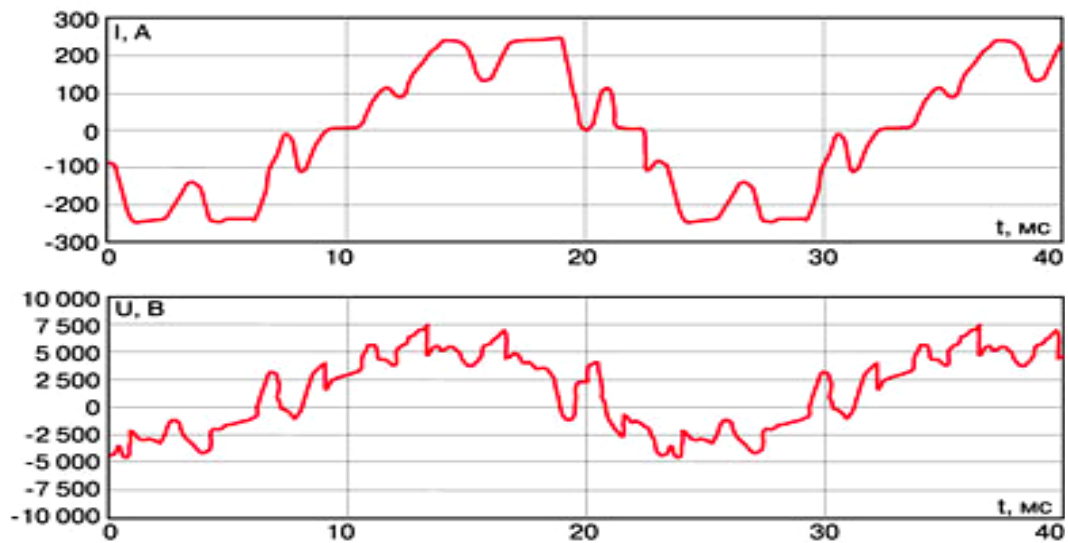


Рисунок 1.7 – Форми статорного струму та напруги двигуна при живленні АІС

Таблиця 1.2 – Гармонічний склад інвертуємого струму і напруги для електроприводу з АІС із примусовою комутацією

№ гармоніки	5	7	11	13	17	19	23
Значення,%, в струмі	22,6	13,6	10,8	10,2	2,7	2,2	1,9
Значення,%, в напрузі	14,4	12,3	16,1	16,9	6,6	5,3	5,5

Схема АІС на рисунку 1.8 була запропонована фірмою Ross Hill (США). Такі перетворювачі випускалися також компаніями „Hill Gracham”, Англія (типу „Imvar”) і „Ansaldo”, Італія (типу „Silcovert Н”). Шкала потужностей цих перетворювачів складає (630...12500) кВт, шкала напруг – (3300...13500) В. Перетворювач на основі АІС з паралельними конденсаторами має достатньо «гладкі» форми вихідних струмів і напруг (осцилограма на рисунку 1.9 знята при номінальному навантаженні електроприводу 1570 кВт, 3300 В).

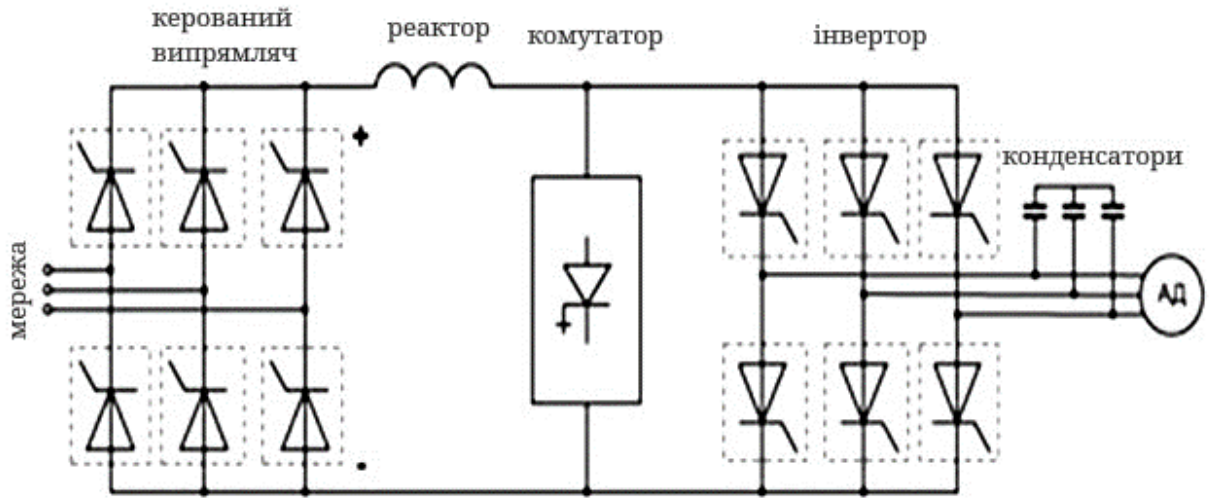


Рисунок 1.8 – Силова схема ЧП на основі АІС фірми Ross Hill(США)

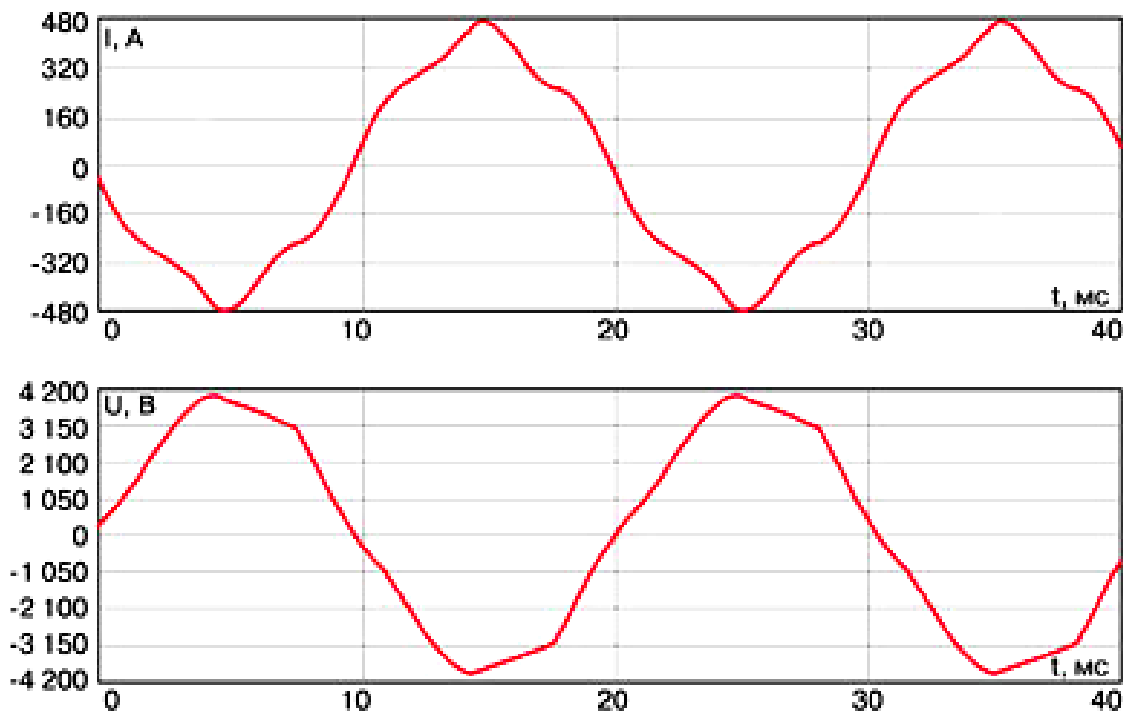


Рисунок 1.9 – Форми статорного струму та напруги двигуна в електроприводі фірми Ross Hill

Гармонійний склад струму і напруги для зазначених вище умов наведено в таблиці 1.3. Комутація в АІС також здійснюється за допомогою

конденсаторів, але їх роль інша - забезпечити «природну» комутацію тиристорів, що можливо, якщо вихідний струм інвертора випереджає вихідну напругу.

Таблиця 1.3 – Гармонійний склад інвертуючого струму і напруги для електроприводу з АІТ з паралельними конденсаторами

№ гармоніки	1	5	7	11	13	17	19	THD
Значення,%, струму	100	8,8	1,5	0,6	0,3	0,1	0,1	9,0%
Значення,%, напруги	100	5,1	1,2	0,7	0,4	0,4	0,2	5,4%

Оскільки асинхронний двигун - це активно-індуктивне навантаження, паралельні конденсатори компенсують індуктивний характер навантаження, забезпечуючи перемикання тиристорів в режимі «природною» комутацією. Однак ця компенсація можлива в певному діапазоні частот електроприводу. Зазвичай паралельні конденсатори вибирають так, щоб забезпечити випередження фазового зсуву струму для діапазону вихідної частоти інвертора приблизно (20...50) Гц. При менших частотах умови комутації погіршуються і для її забезпечення використовується вузол примусової комутації (комутатор)[17].

Комутатор забезпечує режим «Multi-swith» (переривання струму) від пускових частот аж до частоти(20...2) Гц, закорочуючи ланку постійного струму і надаючи тиристорам інвертору відновити замикаючі і управляючі властивості. В якості комутатора можуть бути застосовані або високовольтний ключ на SCR-тиристорах з примусовою комутацією, або повністю керований ключ на включених і вимкнених сигналом управління симетричних тиристорах

(GTO або SGCT). Для зменшення коливань електромагнітного моменту при низьких частотах електроприводу струм інвертора з допомогою режиму «Multi-swit» можна модулювати.

При напрузі асинхронних двигунів 10 кВ і вище подібні перетворювачі до цих пір не мають конкуренції. Електроприводи на основі таких схем високовольтних перетворювачів частоти з АІС на SCR-тиристорах досі приваблюють споживачів, перш за все через відносно невисоку вартість.

Лідером у виробництві та збуті ВПЧ на GTO-тиристорах є фірма Allen-Bradley (Канада), з початку 90-х років виробляла серію 1557 MV з повітряним та рідинним охолодженням тиристорів. В даний час перетворювачі з ШІМ-АІТ виробляє також фірма Hyundai (П.Корея).

На рисунку 1.10 наведена типова схема ВПЧ на основі АІТ з ШІМ. Інші схеми відрізняються тільки схемою керованого випрямляча.

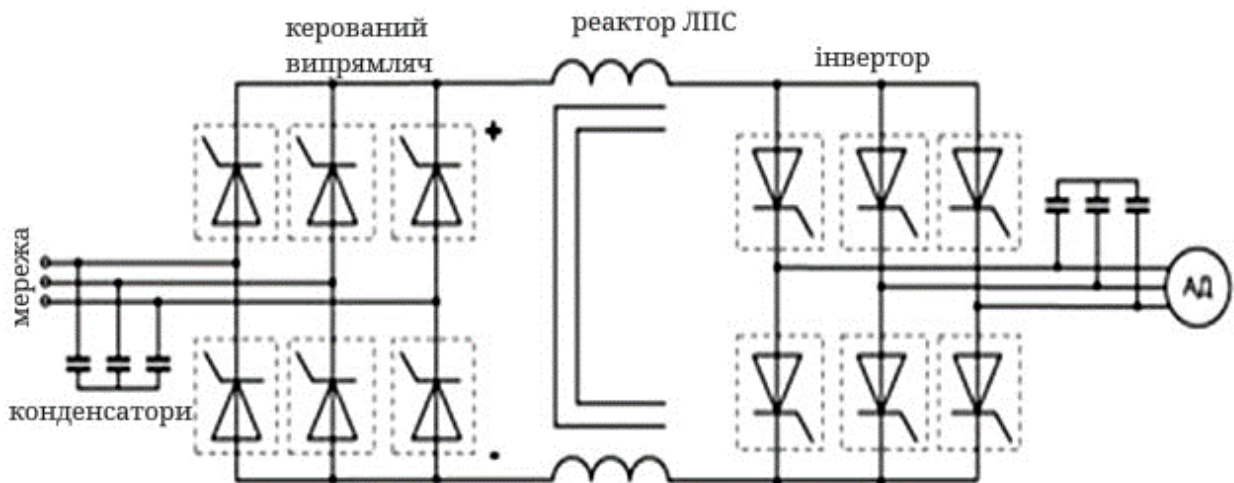


Рисунок 1.10 – Силова схема ЧП на основі АІС з ШІМ

Застосування ШІМ дозволило одержати близькі до синусоїдальної форми інвертуючих струму і напруги двигуна, оскільки конденсаторний фільтр на

виході інвертора, поглинає високочастотні гармоніки, забезпечує формування в двигуні квазисинусоїдального струму і напруги.

Наступну модифікацію ВПЛ з ШІМ-АІТ-типу Power Flex 7000 фірми „Allen-Bradley” виконано на симетричних комутаційних тиристорах з інтегрованим управлінням - типу SGCT. Більш висока частота модуляції (440-1000 Гц в порівнянні з 200-225 Гц у GTO-тиристорів) дозволила ще більше наблизити форми інвертируючих струму і напруги двигуна до синусоїдальної і добитися значення THD менше (5...6)% .

Осцилограма на рисунку 1.11 докладно ілюструє форми струму та напруги на виході АІТ перетворювача „Power Flex 7000” при роботі на асинхронний двигун потужністю 1250 кВт, напругою 6000 В, за певний проміжок часу, коли проводиться моделювання системи двигуна в електроприводі фірми “Allen-Bradley”.

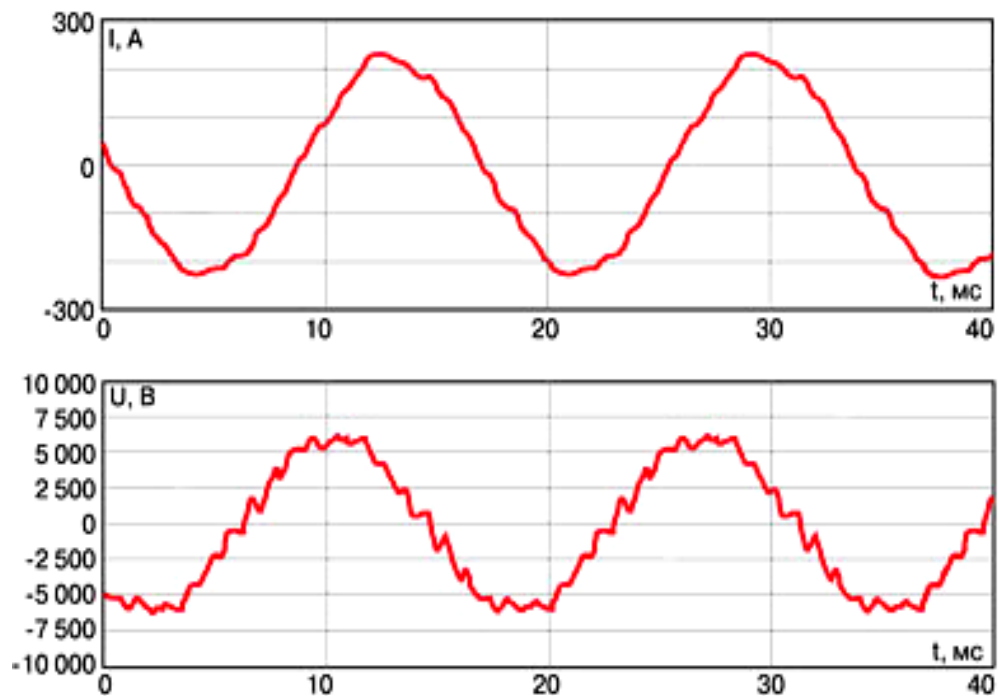


Рисунок 1.11 – Форми статорного струму та напруги двигуна в електроприводі фірми “Allen-Bradley”

Номенклатура силових повністю керованих напівпровідникових приладів, що застосовуються в автономних інверторах напруги сучасних ВПЧ, досить широка:

- симетричні тиристори GTO (в АІН перетворювачів типу „ALPSA VDM 7000” фірми Alstom);
- асиметричні комутаційні тиристори з інтегрованим управлінням IGCT в АІН перетворювачів типу „ACS-1000” і фірми „ABB”;
- біполярні транзистори з ізольованим керуючим електродом IGBT в АІН перетворювачів типу „Simovort MV” фірми „Siemens”, „Perfect Harmony” і „New Baby” фірми „Robicon”, та типу „Tosvert-MV” фірми „Toshiba”, типу „Innovation Medium” і „Innovation SeriesH” фірми „General Electric”, „Meltrac F 500 HV” і „Tmdrive-MV” фірми „Mitsubishi Electric”. АІН в ВПЧ зазначених фірм, як вже зазначалося раніше, мають різні принципи побудови силової схеми, один з прикладів побудови силової схеми трирівневого автономного інвертора напруги зображено на рисунку 1.12.

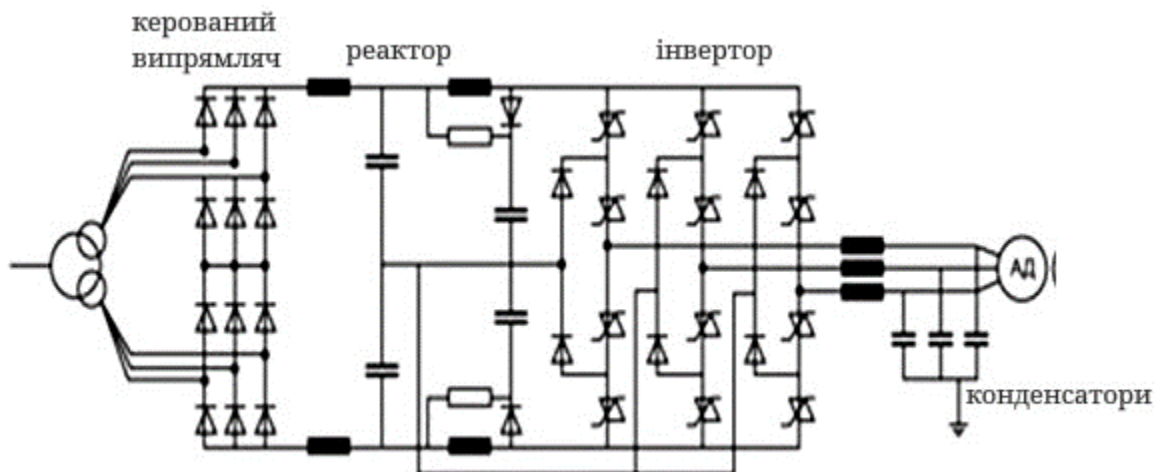


Рисунок 1.12 – Силова схема трирівневого АІН (по топології NPC) з ШІМ на IGCT

На рисунку 1.13 показані осцилограми напруги і струму такого АІН при навантаженні на асинхронний двигун потужністю 800 кВт, 3300 В. На виході АІН встановлений синусоїдальний (LC) фільтр.

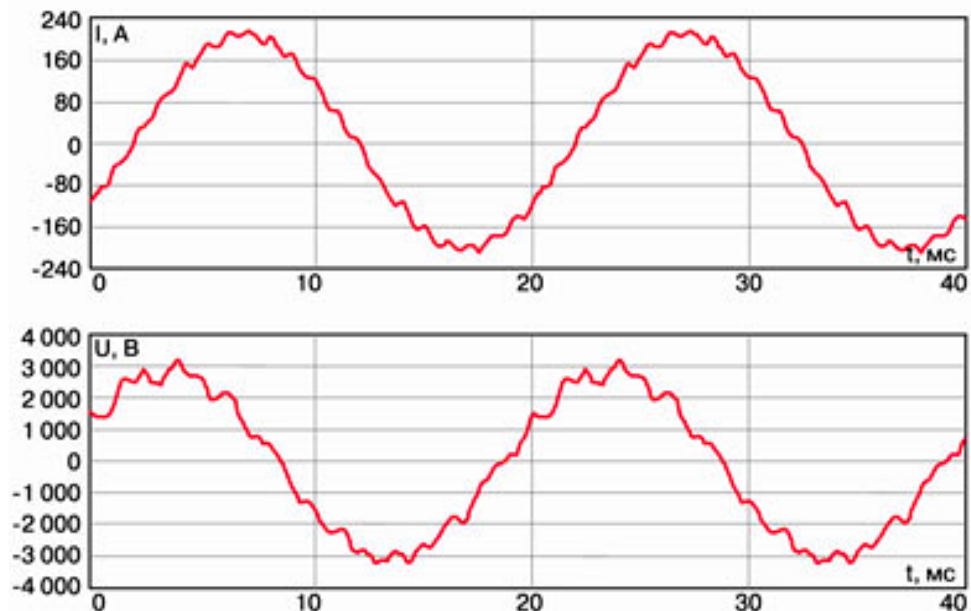


Рисунок 1.13 – Форми статорного струму та напруги в трирівневому АІН з ШІМ

Особливість АІН - формування двополярної вихідної напруги у вигляді прямокутної «решітки» імпульсів високої крутизни, обумовленою частотою перемикання напівпровідникових приладів (IGCT, IGBT). Тому всі АІН по NPC-топології обов'язково забезпечуються LC-фільтром (синусоїдальним фільтром), щоб уникнути пошкодження ізоляції статора асинхронного двигуна імпульсами напруги з високим значенням $\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)$ (швидкості наростання напруги). Перетворювачі на основі розглянутого АІН (3-level) випускаються фірмами ABB і Siemens на потужності до 5000 кВт при нарузі 3300 і 4160 В. При необхідності мати напругу 6000 В фірма „ABB” пропонує встановлення на виході після LC-фільтра трансформатора, напруга інвертора. Фірма „Siemens” пропонує встановлення автотрансформаторного синусоїдального фільтра (IHV-фільтр) [20].

Цікаве рішення для створення ВПЧ було знайдено фірмами „Alstom” і „General Electric”. Це рішення засноване на чотирирівневій формі (4-level) вихідної напруги, для чого довелося змінити топологію АІН, як показано на рисунку 1.14. Інвертори ВПЛ типу „ALSPA VDM 6000” фірми „Alstom” виконані на IGBT, а інвертори ВПЛ фірми „Innovation Medium GE” виконані на IGCT.

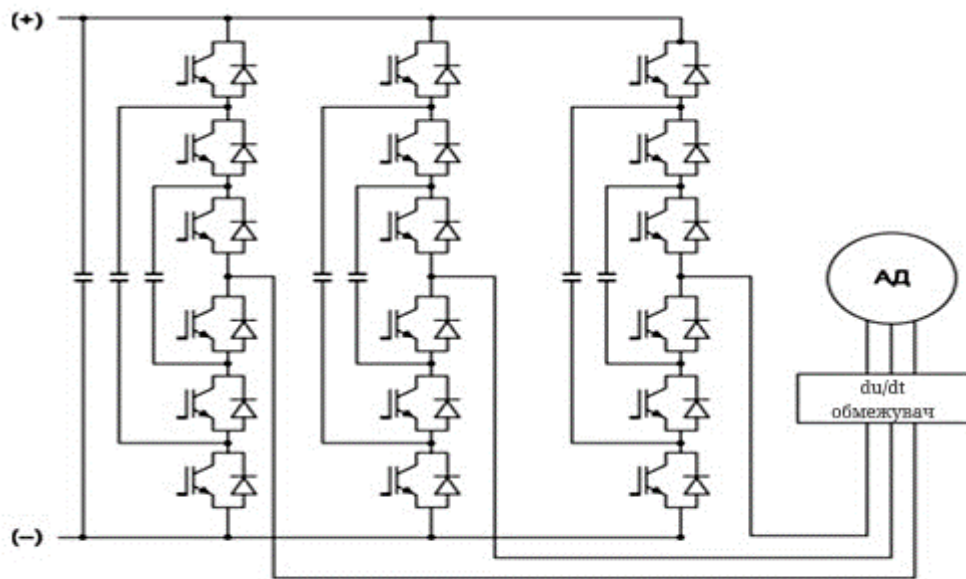


Рисунок 1.14 – Силова схема чотирирівневого АІН

Як видно з осцилограм на рисунку 1.15, форма вихідного струму чотирирівневого ШІМ-інвертора практично синусоїдальна, а вихідна напруга за рахунок більшої кількості сходинок має огинаючу, близьку до синусоїди форму.

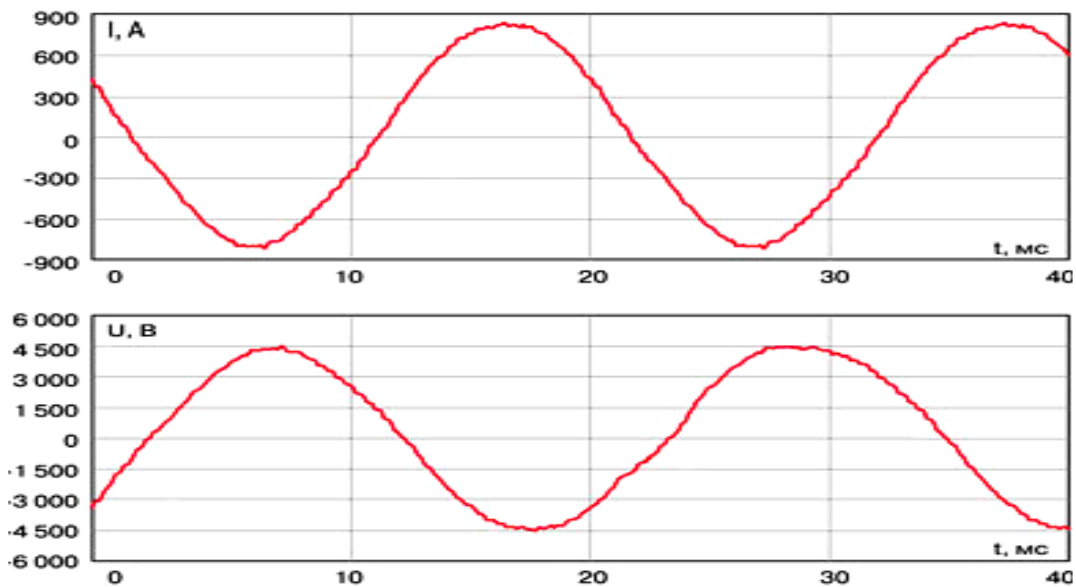


Рисунок 1.15 – Форми статорного струму та напруги двигуна при живленні від чотирирівневого АІН

Однак, як правило, і в цьому випадку бажана установка (правда, кілька полегшеного) LC-фільтра.

Наступним кроком у поліпшенні форми вихідної напруги АІН, а отже, і умов електромагнітної сумісності з асинхронними двигунами, є виконання їх багаторівневими (multi-level). ВПЧ з такими АІН в різних модифікаціях випускають фірми „Robicon”, „Toshiba”, „Mitsubishi Electric”, „GE”. На рисунку 1.16 наведена принципова схема перетворювача частоти з багаторівневим АІН. Такі ВПЧ (рис.1.17) поєднуються зі стандартними загальнопромисловими асинхронними двигунами без установки спеціальних фільтрів на виході, що дозволяє використовувати двигуни практично без розвантаження. Найбільш складним елементом ВПЧ зазначених вище фірм є вхідний трансформатор, вторинні обмотки якого розділені на три групи - по шість обмоток в групі. Фазовий зсув між напругами сусідніх обмоток при, наприклад, еквівалентній 18-фазною схемою становить 10 ел. градусів. При цьому фазовий зсув, наприклад, між першою і шостою обмотками групи - 50 ел. градусів.

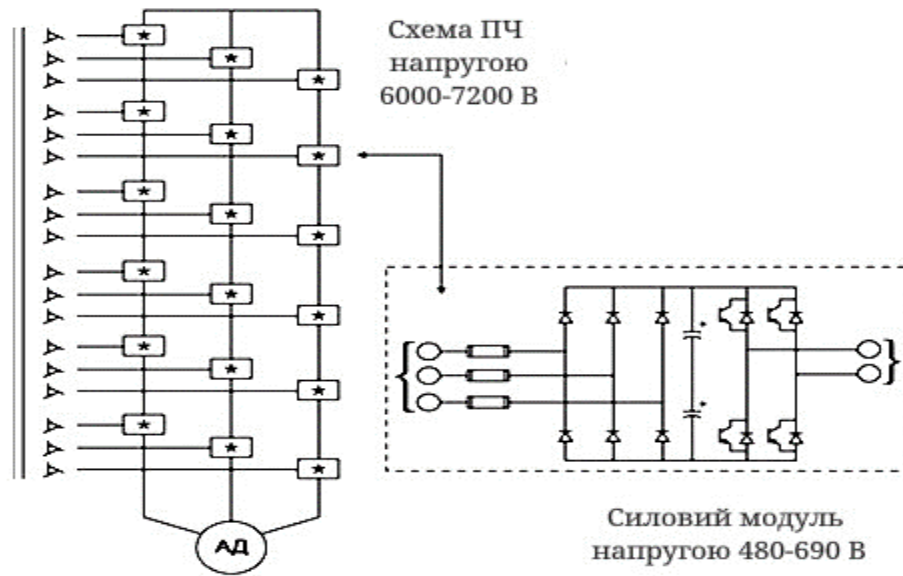


Рисунок 1.16 – Силова схема перетворювача частоти з багаторівневим АІН

Кожна обмотка трансформатора підключена до силового модулю - осередку Power-Cell, що складається, як показано на рисунку 1.16, з діодного випрямляча та однофазного IGBT-АІН з ШІМ.

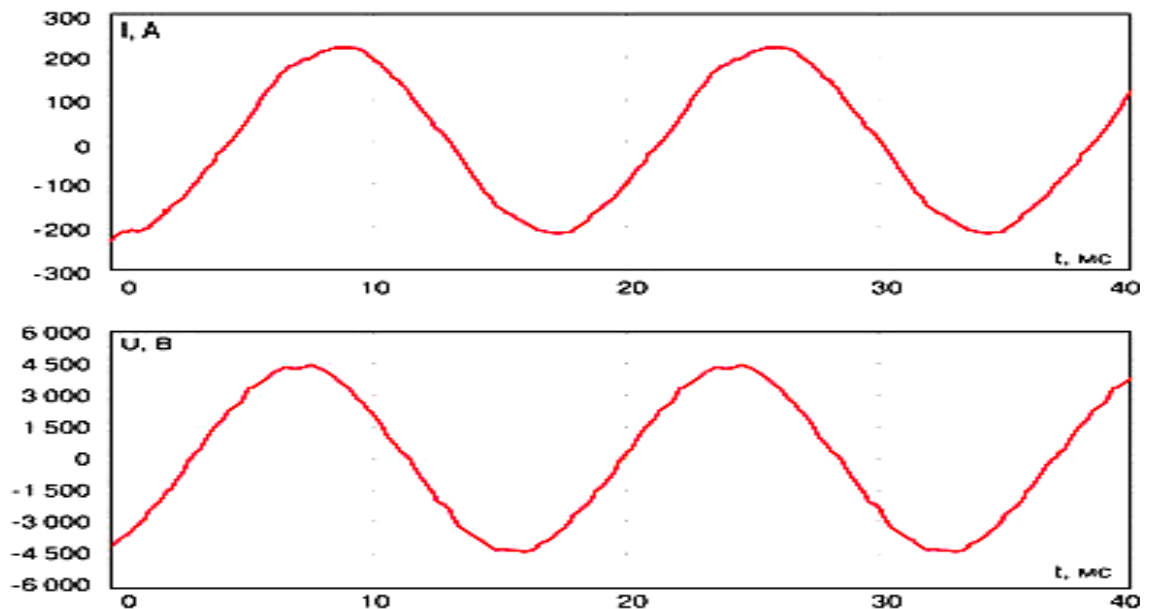


Рисунок 1.17 – Форми статорного струму та напруги двигуна в електроприводі з багаторівневим АІН

У випадку несправності осередку, завдяки функції Power-Cell-Bypass, дефектний осередок автоматично шунтується (виводиться з роботи), а управління іншими осередками автоматично коригується. Це обумовлює досить високу живучість ВПЧ.

Конструктивна особливість ВПЛ з багаторівневою вихідною напругою - нероз'ємність конструкції, тобто відокремити перетворювальну частину від трансформатора неможливо. Друга особливість таких ВПЧ - починаючи від потужності 2400 кВА при напрузі 6600 В, встановлюється, як правило, не один, а два трансформатора. Це, природно, збільшує габарити і масу перетворювача.

Так, наприклад, високовольтний перетворювач типу „Tosvert-MV” потужністю (2400...3600) кВА ,напругою 6,6 кВ має габарити 7800мм x 2400мм x 1000 мм, а масу – 13400 кг. Для порівняння: перетворювач типу „Power Flex 7000” на потужність 2750 кВА має розміри 3300мм x 2643мм x 1000 мм, а масу – близько 11000 кг. Габарити вхідного чотириобмоточного трансформатора для 18-фазного випрямляча перетворювача Power Flex 7000мм x 3048мм x 3048мм x 1829 мм. ВПЛ з такими АІН в різних модифікаціях випускають фірми „Robicon”, „Toshiba”, „Mitsubishi Electric”, „GE”.

2 ЕЛЕКТРОПРИВІД ВАЛКІВ ПРОКАТНОГО СТАНУ ТРУБОПРОКАТНОГО ЦЕХУ

2.1 Технологія і устаткування трубопрокатного цеху

Трубопрокатний цех випускає безшовні гарячедеформовані труби діаметром (55,9...168,3) мм із товщиною стінки (5,0...22,5) мм і довжиною готових труб (4,0...12,5) м.

Сортамент продукції, що випускається

Перелік типів продукції, що виготовляється в трубопрокатному цеху представлений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Перелік продукції, що виготовляється, у цеху

Труби	Розміри труб	Перелік продукції
1. Сталеві безшовні гарячедеформовані	D (73...168) мм S (5,0...18,0) мм L (4...12,5) м	10, 20, 35, 45, 10Г2, 15ХМ. Технічні вимоги за ДСТ 8731, 8732, 550, ТУ 14-3-190, 14-3-1128, 14-3-1600, 14-3-1604, 14-3-1801, 14-3-1831, 14-3Р-25
2. Обсадні й муфти до них	D (114...146) мм S (5,2...10,7) мм	Групи міцності Д, ДО, Е, Л, М, ДЕРЖСТАНДАРТ 632-80, ТУ 14-3-1667, 14-161-163, 14-161-175, 14-161-204, АРІ 5СТ
3. Насосно-компресорні й муфти до них	D (101,6...114) мм S (5,0...7,0) мм L (5,5...11) м	Групи міцності: Д, ДО, Е, Л, Кс, Лс, J55, K55, N80, L80 ДЕРЖСТАНДАРТ 633-80, ТУ 14-3-1534, 14-3-1772, 14-3-1649
4. Газліфтні, нафтогазопровідні	D (73...159) мм S (5,0...16,0) мм	20, 09Г2С, 12ГФ, 20ЮЧ

Призначення труб, що випускаються цехом:

- труби загального призначення, призначені для різних сфер господарської діяльності (сільське господарство, машинобудування);

- труби нафтового сортаменту, призначені для транспортування газу й нафти:

- а) нафтогазопровідні, у тому числі підвищеної корозійної стійкості;

- б) обсадні, у тому числі підвищеної корозійної й холодостійкості;

- в) насосно – компресорні гладкі й з висадженими кінцями, у тому числі підвищеної корозійної й холодостійкості;

- г) труби бурильні.

- труби передільні, призначені для одержання холоднодеформованих труб у трубоволочильних цехах заводу, для виготовлення муфт до нарізних труб (насосно – компресорні, обсадні труби), металевих протекторів різьблення.

Вихідна сировина

Вихідною сировиною для виготовлення готових товарних (труби загального призначення, нафтогазопровідні, насосно – компресорні, бурильні, обсадні) і передільних (для переділу в інших цехах, у тому числі у волочильних, муфтової заготовки для насосно – компресорних, обсадних труб) труб у трубопрокатному цеху №2 є:

- а) для одержання безшовних гарячедеформованих труб власного прокату ТПА-140 діаметром (73...168,3) мм – трубна заготовка круглого перетину, отримана методами прокатки (катана) або безперервного розливання (безупинно – лита) діаметром 120 мм, 130 мм, 140 мм, 150 мм, 156 мм, одержувана у вигляді штанг довжиною (6,5...12,0) м, овальністю до 8 мм; кривизною не більш 0,3 % довжини з косиною різь торців не більше 7 мм. Матеріал заготовки – марки сталі 10, 15, 20, 30, 35, 45, 20Ф, 20 ДО, 20ПВ, 20ЮЧ, 09Г2С, 12ГБ, 14Г1Ф, 14Г2Ф, 15ГФ, 15Х5М, 17ГС, 26ХМФА, 30ХМА, 30ХГС, 12Х1МФ, 32ХМА, 32ХГ, 32Г2, 37Г2С, 38ХНМ, 37ХГФ, 38Г2С, 40ХН, Д;

б) для виготовлення безшовних гарячедеформованих труб з передільних труб прокату ТПА-80 – трубна заготовка діаметром (55,9...89) мм без обробки кінців (без висадження, фаски, різьблення, муфт, бурильних замків) аналогічних марок сталей з допусками по діаметру й товщині стінки залежно від вимог стандартів на продукцію;

в) для виготовлення безшовних гарячедеформованих труб;

г) комплектуючі вироби:

- муфти для звинчування нарізних сполучень насосно – компресорних і обсадних труб груп міцності відповідних до групи міцності труб (в окремих стандартах допускається використання муфт більш високих груп міцності);

- замки для приварки тертям до бурильних труб також відповідних груп міцності;

- запобіжні деталі (протектори) комбінованого (метал і полімер) або суцільнометалевого типу для захисту різьблення, фаски, внутрішньої поверхні труб.

Технологія прокатки труб.

Ділянка підготовки трубної заготовки.

Заготовку подають у трубопрокатний цех у вигляді штанг, піддають вхідному контролю якості; придатні заготовки передають на ділянку різання на мірні довжини. Розкрій заготовок здійснюється переважно на гідравлічних пресах або різанням на прес-ножицях.

Прес – ножиці «Ерфурт» ексцентрикового типу призначені для розкрою трубної заготовки на мірні довжини (зі штанг довжиною (6,5...12,0) м у заготовку для посаду в нагрівальну кільцеву піч ТПА-140 довжиною (1,15...3,85) м. Коротка технічна характеристика наведена в таблиці 2.2.

Гідравлічний прес для ламання трубної заготовки Н8439 також призначений для розкрою трубної заготовки на мірні довжини, в основному, використовується для розкрою безупинно - литої заготовки через злам, одержуваний при розкрої на прес-ножицях, показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Прес - ножиці «Ерфурт»

Таблиця 2.2-Коротка технічна характеристика прес - ножиців «Ерфурт»

№ п/п	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Максимальне зусилля ламання (різу)	МН (ТС)	16 (1600)
2	Межа міцності заготовки, не більше	Н/мм ²	784
3	Діаметр заготовки	мм	(115...150)
4	Довжина штанг, не більше	мм	12000
5	Довжина заготовки після розкрою	мм	(1000...4000)

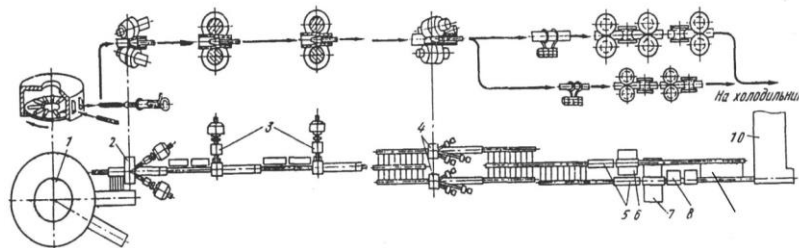
Особливістю розкрою на пресі є те, що перший надріз у місці розкрою проводиться за допомогою установки плазмового підрізування (плазмотроном) приблизно на 1/3 перетини, а потім остаточний злам проводиться ножом з гідравлічним приводом за класичною схемою. Коротка технічна характеристика наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Коротка технічна характеристика гідравлічного преса

№ з/п	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Максимальне зусилля ламання (різа)	МН (ТС)	7,8 (800)
2	Межа міцності заготовки, не більш	Н/мм ²	981
3	Діаметр заготовки	мм	від 100 до 300
4	Довжина штанг	мм	від 3300 до 12000
5	Довжина заготовки після розкрою	мм	від 300 до 4000
6	Напруга холостого ходу	В	300
7	Робоча напруга на дузі	В	200
8	Межі регулювання робочого струму	А	від 100 до 400
9	Плазмообразуючий газ	-	повітря
10	Тиск повітря	МПа	від 0,196 до 0,392
11	Тиск охолодженої води	МПа	від 0,147 до 0,294
12	Діаметр стабілізуючого каналу сопла	мм	від 2,5 до 4,5

Ділянка гарячого прокату труб

У трубопрокатному цеху прокатка труб здійснюється на агрегаті ТПА-140. Схема розташування устаткування ТПА-140, наведена на рисунку 2.2.



1 - кільцева нагрівальна піч; 2 - прошивний стан; 3 - стан поздовжньої прокатки; 4 - тривалковий обкаточний стан; 5 - індукційна піч; 6 - калібрований стан; 7 - редукційний стан; 8 - летуча пилка; 9, 10 - холодильники.

Рисунок 2.2 - Схема ТПА-140

Зважені на вагах заготовки завантажуються в кільцеву нагрівальну піч, де вони нагріваються до температури прошивання (1100...1200) °С.

Потім заготовка подається в прошивний стан гвинтової прокатки, де вона прошивається на короткому оправленні в гільзу.

Гільза видається на вихідну сторону прошивного стану з осьовою видачею. Знята зі стрижня гільза передається до установки поздовжньої прокатки (СПП-1). Труба перед другою кліткою стану (СПП-2) кантується на 90°. Перед кожним проходом у СПП усередину гільзи-труби подається змащення (триполіфосфат натрію, «Трифом-2000»).

Розкатана в СПП труба передається до одного з двох тривалкових обкатаних станів. У трубу подається змащення. Обкаточні стани призначені для усунення рисок на поверхні й зниження поздовжньої й поперечної різностіності труб.

Труби після обкатування надходять у прохідну індукційну піч для підігріву до (900...1000) °С.

Після підігріву труби направляють у калібровочний стан. Основною метою операції калібрування труб є забезпечення одержання труб необхідного діаметра з високою точністю геометричних розмірів. Якщо необхідне одержання труб малих розмірів, то труби після підігріву, не піддаючи калібруванню, направляють у редуційний стан, основне призначення якого – зменшення зовнішнього діаметра. Після редуційного стану труби ріжуться на мірні довжини, обрізаються кінці летучою пилкою.

Після калібровочного (редуційного) стану труби прохолоджуються, проходячи через холодильники. Труби правлять на трубоправильній машині. Після виправлення обрізають стовщені й розкуйовджені кінці труб на трубовідрізних верстатах, ріжуть труби на необхідні довжини й торцюють їхні кінці. Далі труби передають на ділянку продувки для видалення стружки.

Надалі труби надходять на інспекційні столи для контролю якості, проводять неруйнуючий контроль.

Після всіх операцій здійснюють приймальний і остаточний контроль труб. Вимірюють вагу й довжину придатних труб, маркують, пакують і передають на склад готової продукції. Труби, які не відповідають вимогам, піддають ремонту й знову контролю якості.

Кільцева піч з обертовим подом призначена для нагрівання заготовок довжиною до 3850 мм до температур (1200...1280) °С (залежно від марки сталі) для наступного прокату сталевих безшовних горячедеформованих труб у лінії трубопрокатного агрегату 140. Коротка технічна характеристика наведена в таблиці 2.4.

Прошивний стан з грибоподібними валками з індивідуальним приводом призначений для прошивання заготовки суцільного перетину, попередньо нагрітої в кільцевій печі, у порожню товстостінну гільзу за допомогою методу гвинтової прокатки. Прошивання забезпечує одержання гільз необхідних розмірів з високою якістю зовнішньої й внутрішньої поверхонь, тому що якість гільзи значною мірою визначає якість готових труб.



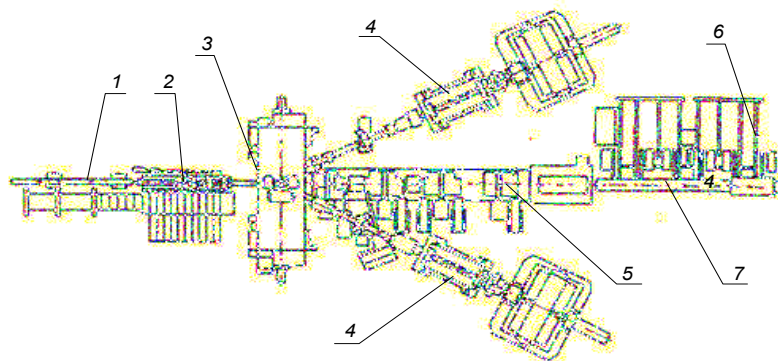
Рисунок 2.3 – Трубопрокатний агрегат ТПА-140

Таблиця 2.4 - Коротка технічна характеристика кільцевої печі

№ п/п	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Діаметр заготовки	мм	(105...160)
2	Довжина заготовки	мм	(1000...3850)
3	Схема посаду	-	1- і 2- во рядна
4	Час нагрівання	Хв..	(52...67)
5	Температура нагрівання заготовки	°С	(1200...128)
6	Температура робочого простору	°С	(970...1300)
7	Кількість робочих зон нагрівання	од	5
8	Діаметр печі	м	24,2

Подання заготовки у валки прошивного стану здійснюється за допомогою пневматичного вштовхувача, зацентрування заготовки перед прошиванням для забезпечення впровадження оправлення точно по осі не здійснюється.

Розташування устаткування робочої лінії прошивного стану показано на рисунку 2.4.



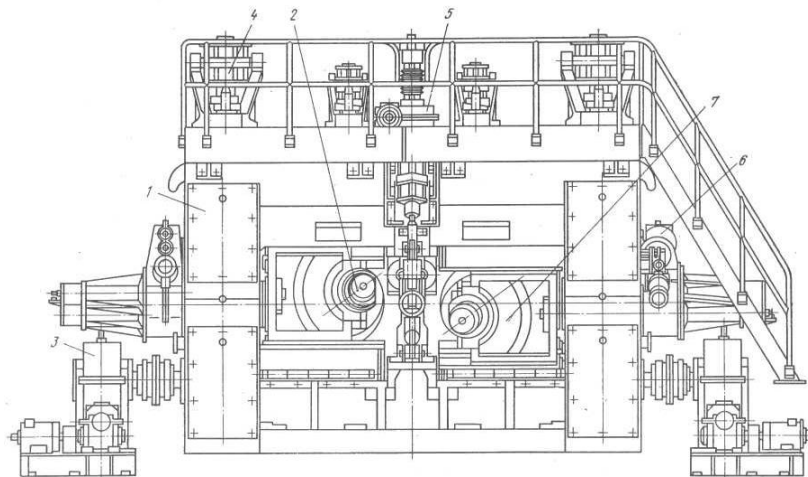
1- вштовхувач; 2 – передній стіл; 3 – робоча кліть; 4 – головний привід; 5 – вихідна сторона; 6 – хитні ґрати; 7 – рольганг

Рисунок 2.4 - Схема розташування устаткування прошивного стану з індивідуальним приводом валків

Передній стіл призначений для приймання нагрітої заготовки з похилих ґрат, сполучення осі заготовки з віссю прокатки й обмеження биття заготовки при прошиванні.

Вштовхувач служить для подачі заготовок по жолобу в робочу кліть. Він представляє собою довгоходовий пневмоциліндр, встановлений на двох стійках. На кінці штока закріплюється змінний подовжувач з наконечником. Довжина подовжувача й діаметр наконечника вибираються залежно від довжини й діаметра заготовки.

Схема робочої кліті прошивного стану наведена на рисунку 2.5.



1 – станина; 2 – касети подушок робочих валків; 3 – червячний редуктор; 4 – механізм стопоріння; 5 – верхня лінійка; 6 – механізми натискних гвинтів; 7 – барабани

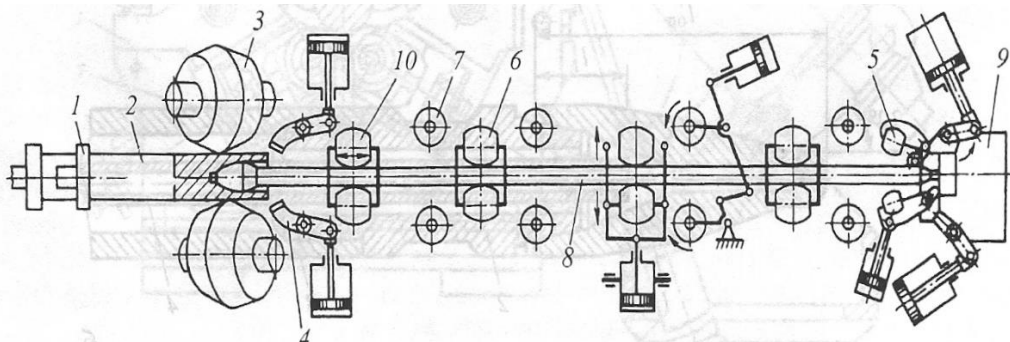
Рисунок 2.5 - Робоча кліть прошивного стану

Робоча кліть сприймає весь тиск металу на валки, тому її лита станина має масивну коробчату форму. Усередині станини розміщені пустотілі барабани з прорізами, у яких рухливо встановлені касети подушок робочих валків. Зближення й розведення валків здійснюється переміщенням касет подушок по напрямних барабанах горизонтальними натискними гвинтами, що приводяться в обертання механізмами, встановленими на торцях барабанів.

Привід повороту барабана здійснюється від електродвигунів через два черв'ячні редуктори й провідну шестірню, що перебуває в зачепленні з зубчастим вінцем, насадженим на барабан. У робочому положенні валки встановлюються на кут подачі $(12...18)^\circ$ і закріплюються механізмом стопоріння.

Нижня лінійка встановлюється на стаціонарному стільці, верхня лінійка закріплюється в траверсі, яка може переміщатися нагору й униз від спеціального механізму, що складається з двох настановних гвинтів і черв'ячних редукторів. Головний привід призначений для обертання робочих валків з заданими швидкістю й крутним моментом. Привід валків – індивідуальний, здійснюється від електродвигунів постійного струму потужністю 1250 кВт. Прошивний стан працює із застосуванням коротких оправлень, укріплених на кінці стрижня. Тому однієї з основних операцій, що проводяться на вихідній стороні є зняття гільзи зі стрижня.

На вихідній стороні встановлені роликові центрувачі стрижня, які підтримують і центрують стрижень, як перед прошиванням, так і в процесі прошивання, коли на нього діють високі осьові зусилля й можливий його поздовжній вигин (рис.2.6).



1 – вштовхувач заготовки; 2 – заготовка; 3 – робочі валки; 4 – переднє перехоплення; 5 – заднє перехоплення; 6 – стаціонарний і 10 – рухливий центрувач; 7 – ролики, що видають; 8 – стрижень із оправленням; 9 – завзято-регулювальний механізм

Рисунок 2.6 - Вихідна сторона прошивного стану

Знята зі стрижня гільза передається до стану поздовжньої прокатки (стан «тандем»). Конструкція вихідної сторони з осовою видачею гільз забезпечує більш високий темп прокатки.

Коротка технічна характеристика прошивного стану наведена в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Коротка технічна характеристика прошивного стану

№ п/п	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Діаметр робочих валків по пережиму	мм	(850...1000)
2	Матеріал валків	-	сталь 35, 45
3	Привід валків	-	індивідуальний
4	Тип електродвигунів приводу	-	постійного струму
5	Потужність електродвигунів приводу	кВт	1250
6	Частота обертання	об/хв	315
7	Кут розкочування	°	17
8	Кут подачі	°	(0...20)
9	Довжина стрижня	мм	11200

Проаналізувавши споживання електричної енергії у трубопрокатному цеху (таблиця споживання електричної енергії наведена нижче), найбільшим споживачем є прокатний (прошивний) стан, тому у даній роботі енергозберігаючі заходи будемо застосовувати для прокатного стану.

2.2 Аналіз споживання електроенергії споживачами трубопрокатного цеху

У таблиці 2.6 приведені дані споживання електричної енергії основними споживачами трубопрокатного цеху.

Таблиця 2.6 – Фактичне споживання електроенергії основними споживачами трубопрокатного цеху

Номер з/п	Назва споживача	Споживання електроенергії (W), кВт×год					
		Рік					
		2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	Прошивний стан	4608	4147	5069	4838	3686	4608
2	Установка подовжньої прокатки	2458	2212	2703	2580	1966	2458
3	Агрегат ТПА	1843	1659	2028	1935	1475	1843
4	Індукційна піч	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4	38,4
5	Освітлення	32	32	32	32	32	32
6	Калібрувальний стан	3021	3021	3021	3021	3021	3021
7	Редукційний стан	1075	1075	1075	1075	1075	1075

З таблиці видно що найбільше споживання припадає на прошивний стан.

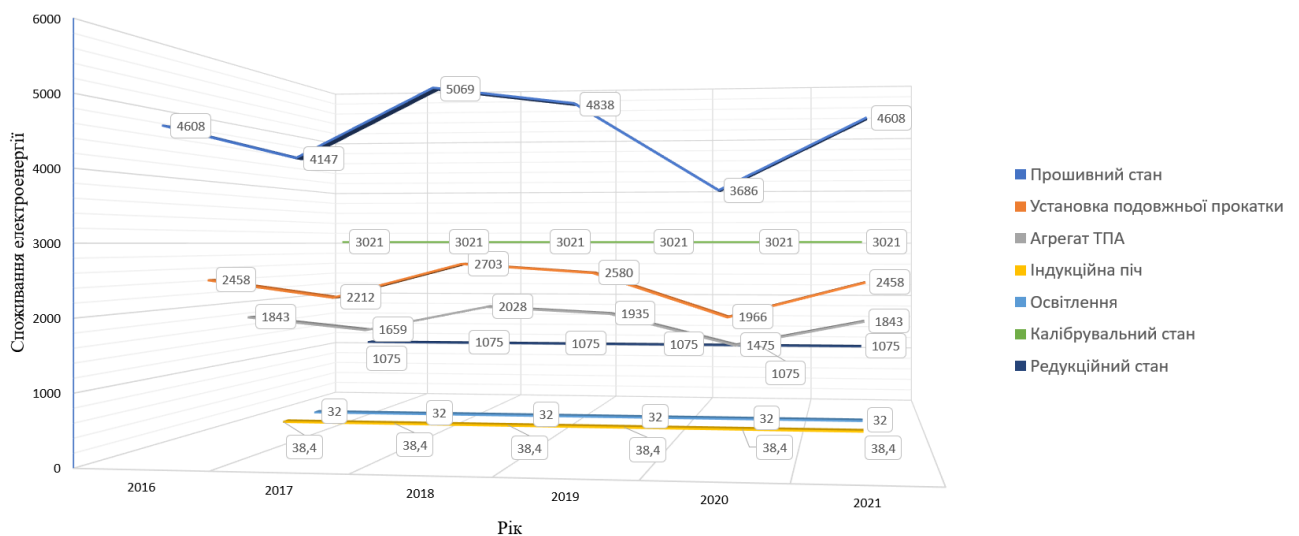


Рисунок 2.7 – Фактичне споживання електроенергії основними споживачами трубопрокатного цеху

2.3 Розрахунок електромеханічних процесів в базовому варіанті електроприводу

В основі розрахунку використовується найбільш напружений режим роботи електроприводу валків прошивного стану, що проілюстрований діаграмами зміни швидкості і моменту опору, які представлені на рисунку 2.5. в табл..2.7 наведені паспортні дані одного з чотирьох двигунів.

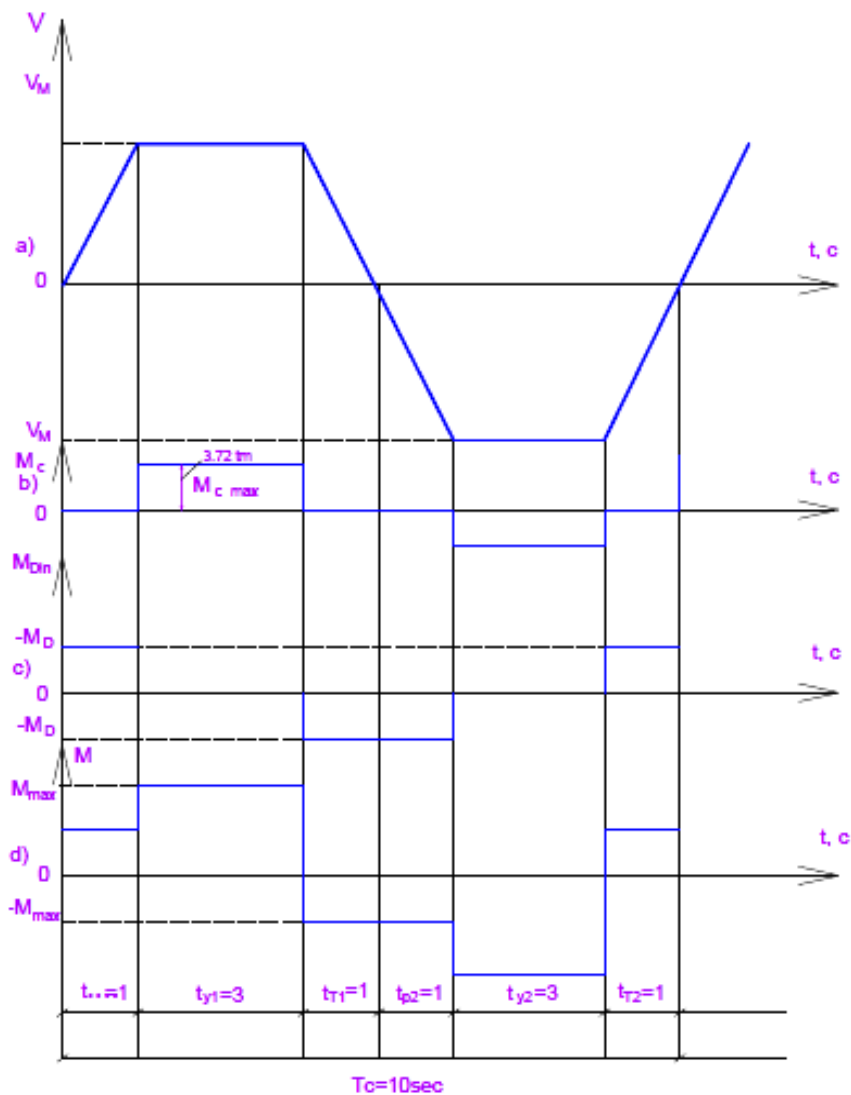


Рисунок 2.5 – Часові діаграми роботи електроприводу прокатного стану трубокатного цеху

Таблиця 2.7 – Паспортні данні одного з чотирьох двигунів

Назва величини	Фізична величина	Розмірність
Номінальна потужність двигуна	кВт	1250
Номінальний струм якоря	А	1775
Синхронна частота обертання	об/хв	315
Номінальний КПД	%	92,4
Номінальний момент	Т·м	3,86
Момент інерції якоря	Кг·м ²	500

Вхідні дані:

- $V_m = 2,59$ м/с.
- $M_c = 3,72$ Т·м або 36,7 кН·м.
- $t_{p,e} = 1$ с .
- $t_{cm} = 3$ с.
- $M_{ном} = 3,86 \cdot 9,8 = 37,8$ кН·м.
- $\omega_m = \frac{2 \cdot V_{cm} \cdot t_p}{D_{cm}} = \frac{2 \cdot 2,59 \cdot 3,75}{0,7} = 27,75$ рад/с.
- $n_m = \omega_m \cdot 9,55 = 265$ об/хв.
- $M_\delta = j_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1110 \cdot \frac{27,75}{1с} = 30,8$ кН·м.
- $M = M_c + M_\delta$.

Перевірка за моментом:

$$M_{макс(ст)} = M_{с.макс} \leq 2 \cdot M_{ном} \cdot \lambda_m,$$

$$\text{де } \lambda_m = \frac{I_{макс}}{I_{ном}} = \frac{3990}{1775} = 2,24,$$

$$36,4 \leq 2 \cdot 37,8 \cdot 2,24,$$

$$36,4 \leq 169,344 .$$

Розрахунок втрат потужності.

Величину загальних втрат потужності $\Delta P_{\text{ов.ст}}$ якоря двигуна постійного струму в сталому режимі, розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{\text{ов.ст.}} = \Delta P_{\text{я.ст}} + \Delta P_{\text{об.зб.}}, \quad (2.1)$$

де $\Delta P_{\text{я.ст}}$ – втрати потужності якоря двигуна постійного струму в сталому режимі, що можна розрахувати за формулою:

$$\Delta P_{\text{я.ст}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{ст}}^2, \quad (2.2)$$

де $R_{\text{я}} = 0,01743$ Ом – опір обмотки якоря двигуна;

$I_{\text{я.ст}}$ – струм сталого режиму двигуна, що обчислюється за формулою:

$$I_{\text{я.ст}} = I_{\text{я.н.}} \cdot \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{н}}} = 1775 \cdot \frac{36,4}{37,8} = 1709,25 \text{ А.}$$

$$\Delta P_{\text{я.ст}} = 0,01743 \cdot (1709,25)^2 = 50,9 \text{ кВт.}$$

Величину загальних втрат потужності $\Delta P_{\text{ов.р.з.}}$ якоря двигуна постійного струму в режимі „розгін-гальмування”, розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{\text{ов.р.з.}} = \Delta P_{\text{я.р.з.}} + \Delta P_{\text{об.зб.}}, \quad (2.3)$$

де $\Delta P_{\text{я.р.з.}}$ – втрати потужності якоря двигуна постійного струму, в режимі „розгін-гальмування”, що можна розрахувати за формулою:

$$\Delta P_{я.р.з.} = R_{я} \cdot I_{р.з.}^2, \quad (2.4)$$

$I_{я.р.з.}$ -струм режиму „розгону-гальмування” двигуна, що обчислюється за формулою :

$$I_{я.р.з.} = I_{я.н.} \cdot \frac{M_c}{M_n} = 1775 \cdot \frac{30,8}{37,8} = 1446,29 \text{ А.}$$

$$\Delta P_{я.р.з.} = 0,01743 \cdot (1446,29)^2 = 36,4 \text{ кВт.}$$

.Величину втрат обмотки збудження $\Delta P_{об.зб.}$, можна розраховувати за формулою, кВт:

$$\Delta P_{об.зб.} = R_{об.зб.} \cdot I_{об.зб.}^2, \quad (2.5)$$

де $R_{об.зб.} = 3,5 \text{ Ом}$, - опір обмотки збудження двигуна постійного струму;

$I_{об.зб.} = 56 \text{ А}$, - струм обмотки збудження двигуна постійного струму.

$$\Delta P_{об.зб.} = 3,5 \cdot (56)^2 = 10,9.$$

Величину втрати потужності $\Delta P_{тлст}$ у тиристорному перетворювачі в сталому режимі, обчислюємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{тлст} = R_d \cdot I_{я.ст.}^2, \quad (2.6)$$

де $R_d = 0,0386 \text{ Ом}$ – опір тиристорного перетворювача;

$$\Delta P_{тлст} = 0,0027 \cdot (1709,25)^2 = 7,8.$$

Величину втрат потужності $\Delta P_{ТПр.з}$ у тиристорному перетворювачі в режимі „розгін-гальмування”, розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{ТПр.з} = R_d \cdot I_{я.р.з}^2, \quad (2.7)$$

$$\Delta P_{ТПр.з} = 0,0027 \cdot (1446,29)^2 = 5,64.$$

Величину втрат потужності $\Delta P_{мереж.ст}$ у мережі в сталому режимі, обчислюємо за формулою:

$$\Delta P_{мереж.ст} = \frac{3 \cdot R_\phi \cdot (0,817 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{я.в.ст})^2}{K_{тр}^2}, \quad (2.8)$$

де R_ϕ – опір мережі, що обчислюється за формулою:

$$R_\phi = R_{тр} + R_{каб}, \quad (2.9)$$

де $R_{тр}$ – опір трансформатора, що обчислюється за формулою, Ом:

$$R_{тр} = R_{к.з},$$

$$R_{к.з.} = \frac{\Delta P_{к.з.}}{3 \cdot (I_{1н.ф.})^2}, \quad (2.10)$$

$$R_{к.з.} = \frac{42,5 \cdot 10^3}{3 \cdot (281,5)^2} = 0,1788.$$

$R_{каб}$ – опір кабелю, що обчислюємо за формулою, Ом

$$R_{каб} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,0175 \cdot \frac{45}{185} = 0,0042 ;$$

$$R_{\phi} = 0,1788 + 0,0042 = 0,1830 .$$

K_{mp} – коефіцієнт трансформатора:

$$K_{mp} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{6000}{720} = 8,33 .$$

$$\Delta P_{мереж.вст} = \frac{3 \cdot 0,1830 \cdot (0,817 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1709,25)^2}{(8,33)^2} = 184,7 .$$

$\Delta P_{мереж.р.г.}$ – втрати потужності у мережі в режимі „розгін-гальмування”, розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{мереж.р.г.} = \frac{3 \cdot R_{\phi} \cdot (0,817 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{я.р.г.})^2}{K_{mp}^2} , \quad (2.11)$$

$$\Delta P_{мереж.р.г.} = \frac{3 \cdot 0,1830 \cdot (0,817 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1446,29)^2}{(8,33)^2} = 132,2$$

Втрати енергії двигуна постійного струму ,в сталому режимі, що можна розрахувати за формулою, кДж:

$$\Delta W_{вст} = 4 \cdot \Delta P_{ДПС.вст.} \cdot (t_{вст1} + t_{вст2}) , \quad (2.12)$$

$$\Delta W_{вст} = 4 \cdot 61,8 \cdot (3 + 3) = 1483,2 .$$

Втрати енергії двигуна постійного струму, в режимі „розгін-гальмування”, що можна розрахувати за формулою, кДж:

$$\Delta W_{p.z.} = 4 \cdot \Delta P_{ДПС.p.z.} \cdot (t_{p1} + t_{p2} + t_{z1} + t_{z2}), \quad (2.13)$$

$$\Delta W_{p.z.} = 4 \cdot 47,4 \cdot (1 + 1 + 1 + 1) = 758,4;$$

$$\Delta W_{ог} = 1483,2 + 758,4 = 2241,6.$$

Втрати енергії у тиристорному перетворювачі в сталому режимі можна розрахувати за формулою, кДж:

$$\Delta W_{III_{\epsilon cm}} = 2 \cdot \Delta P_{III_{\epsilon cm}} \cdot (t_{\epsilon cm1} + t_{\epsilon cm2}), \quad (2.14)$$

$$\Delta W_{III_{\epsilon cm}} = 2 \cdot 7,88 \cdot (3 + 3) = 94,65 .$$

Втрати енергії у тиристорному перетворювачі в режимі „розгін-гальмування” можна розрахувати за формулою, кДж:

$$\Delta W_{III_{p.z.}} = 2 \cdot \Delta P_{III_{p.z.}} \cdot (t_{p1} + t_{p2} + t_{z1} + t_{z2}), \quad (2.15)$$

$$\Delta W_{III_{p.z.}} = 2 \cdot 5,64 \cdot (1 + 1 + 1 + 1) = 45,16;$$

$$\Delta W_{III} = 94,65 + 45,16 = 140.$$

Втрати енергії у мережі розраховуємо за формулою:

$$\Delta W_{\text{мереж.}} = \Delta W_{\text{мереж.вст}} + \Delta W_{\text{мереж.р.г.}} + \Delta W_{\text{мереж.х.х.}} \quad (2.16)$$

Втрати енергії у мережі в сталому режимі розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{мереж.вст}} = \Delta P_{\text{мереж.вст}} \cdot (t_{\text{вст1}} + t_{\text{вст2}}), \quad (2.17)$$

$$\Delta W_{\text{мереж.ст}} = 184,7 \cdot (3 + 3) = 1108.$$

Втрати енергії у мережі в режимі „розгін-гальмування”: розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{мереж.р.г.}} = \Delta P_{\text{мереж.р.г.}} \cdot (t_{p1} + t_{p2} + t_{z1} + t_{z2}), \quad (2.18)$$

$$\Delta W_{\text{мереж.р.г.}} = 132,2 \cdot (1 + 1 + 1 + 1) = 529.$$

Втрати енергії у мережі в режимі „холостого ходу”: розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{мереж.х.х.}} = \Delta P_{\text{х.х.}} \cdot T_{\text{ц}}, \quad (2.19)$$

де $\Delta P_{\text{х.х.}}$ – втрати холостого ходу мережі, що наведені в паспортних даних, та дорівнюють 9,8 кВт;

$T_{\text{ц}}$ – час циклу, що дорівнює 10 секунд;

$$\Delta W_{\text{мереж.х.х.}} = 9,8 \cdot 10 = 98.$$

Сумарні втрати енергії у мережі розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{мереж.}} = 1108 + 529 + 98 = 1736.$$

Величину номінальної втрати потужності двигуна постійного струму розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_n = \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \cdot P_{2n}, \quad (2.20)$$

$$\Delta P_n = \left(\frac{1}{0,924} - 1 \right) \cdot 1250 = 102,81.$$

Величину номінальної втрати енергії двигуна постійного струму розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_n = 4 \cdot \Delta P_n \cdot T_u, \quad (2.21)$$

$$\Delta W_n = 4 \cdot 102,81 \cdot 10 = 4112.$$

Сумарні втрати:

$$\Delta W_{\Sigma} = [\Delta W_{\text{дпс}} + \Delta W_{\text{тп}} + \Delta W_{\text{мереж.}}] \cdot K_u, \quad (2.22)$$

$$\Delta W_{\Sigma} = [2241,6 + 140 + 1736] \cdot 360 = 1577376 \text{ кДж або } 411 \text{ кВт/год.}$$

Перевірка двигуна на нагрівання:

$$\Delta W_{\text{дпс}} \leq \Delta W_n,$$

$$2241,6 \leq 4112.$$

3 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРОКАТНИХ ВИРОБНИЦТВ

3.1 Розрахунок втрат та параметрів „Т” – подібної схеми заміщення асинхронного двигуна типу АДО-2000-6000-12У1

Паспортні дані двигуна АДО-2000-6000-12У1, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Паспортні дані двигуна АДО-2000-6000-12У1

Назва величини	Фізична величина	Розмірність
Номінальна корисна потужність двигуна	кВт	2000
Номінальна напруга	В	6000
Номінальний струм статора	А	259,5
Номінальне ковзання	%	0,5
Синхронна частота обертання	об/хв	500
Номінальний КПД	%	96,3
Номінальний коефіцієнт потужності	-	0,77
Перевантажувальна здатність по моменту	-	2,5
Кратність пускових струмів	-	5,5
Кратність пускових моментів	-	1
Момент інерції ротору	кг·м ²	786
Число пар полюсів	-	6

Вхідні дані асинхронного двигуна типу АДО-2000-6000-12У1 (табл.3.2):

Таблиця 3.2 – Вхідні дані для розрахунку

Назва величини	Позначення	Фізична величина	Розмірність
Фазна напруга	$U_{н.ф.}$	В	3468,208
Номінальна корисна потужність двигуна	P_n	кВт	2000
Частота обертання	n	об/хв	497,5
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos \phi_n$	-	0,77
Кратність пускових струмів	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	-	5,5
Перевантажувальна здатність по моменту	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	-	2,5
Кратність пускових моментів	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	-	1
Фазний струм	$I_{1н.ф.}$	А	259,5
Момент інерції ротору	j	кг·м ²	786
Число пар полюсів	p	-	6

Розрахунок втрат потужності в двигуні [23, 24, 25].

Величину електричної потужності P_n , що підводиться до статора двигуна в номінальному режимі можна розраховувати за формулою, кВт:

$$P_n = 3 \cdot U_{1нф} \cdot I_{1н.ф.} \cdot \cos \phi_n, \quad (3.1)$$

де $U_{1n\phi}$ - номінальна напруга, В;

$I_{1n\phi}$ - номінальний струм, А;

$\cos \varphi_n$ - номінальний коефіцієнт потужності;

$$P_{1n} = 3 \cdot 3468,2 \cdot 259,5 \cdot 0,77 = 2078,995 .$$

Величину додаткових втрат $\Delta P_{доо}$, розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{доо} = 0,005 \cdot P_{1n} , \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{доо} = 0,005 \cdot 2078,995 = 10,39 .$$

Величину механічних втрат $\Delta P_{мех}$, розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{мех} = \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_n}{10} \right)^4 \cdot 10^{-3} , \quad (3.3)$$

де n - частота обертання, об/хв;

D_{n1} - діаметр зовнішньої розточки статора.

$$\Delta P_{мех} = \left(\frac{497,5}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{130}{10} \right)^4 \cdot 10^{-3} = 7,112 .$$

Величину втрат холостого ходу $\Delta P_{x,x}$, розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{x,x} = \Delta P_{доо} + \Delta P_{мех} , \quad (3.4)$$

$$\Delta P_{x,x} = 10,39 + 9,507 = 19,89 .$$

Величину повної механічної потужності $P_{мех}$, розраховуємо за формулою, кВт:

$$P_{мех} = P_H + \Delta P_{доб} + \Delta P_{мех}, \quad (3.5)$$

де P_H - номінальна потужність;

$$P_{мех} = 2000 + 10,39 + 9,507 = 2019,89.$$

Величину номінального електромагнітного моменту $M_{емн}$, розраховуємо за формулою, кВт:

$$M_{емн} = M_H = \frac{P_{мех}}{\omega_{2n}}, \quad (3.6)$$

де ω_{2n} - частота обертання, що обчислюється за формулою, рад/хв:

$$\omega_{2n} = \frac{n}{9,55}, \quad (3.7)$$

$$\omega_{2n} = \frac{497,5}{9,55} = 52,09;$$

$$M_{емн} = M_H = \frac{2019,8}{52,09} = 38776,9.$$

Величину номінальної електромагнітної потужності $P_{емн}$, розраховуємо за формулою, кВт:

$$P_{емн} = P_{\sigma} = M_H \cdot \omega_1, \quad (3.8)$$

де ω_{1n} - асинхронна частота, що обчислюється за формулою, рад/хв.:

$$\omega_{1n} = \frac{n_0}{9,55} = \frac{500}{9,55} = 52,3; \quad (3.9)$$

$$P_{емн} = P_{\sigma} = 38776,9 \cdot 52,3 = 2028,03.$$

Величину номінальних електричних втрат у роторі ΔP_{E2} , розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{E2} = P_{EM} - P_{мех}, \quad (3.10)$$

$$\Delta P_{E2} = 2028,03 - 2019,81 = 8,23.$$

Величину номінальних електричних втрат у статорі ΔP_{E1} , розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{E1} = 3 \cdot r_1 \cdot I_{1нф}^2, \quad (3.11)$$

де $r_1 = 0,120$ (Ом) – питомий опір міді статора;

$$\Delta P_{E1} = 3 \cdot 0,120 \cdot (259,5)^2 = 24,24.$$

Величину номінальних електричних втрат у сталі ΔP_{cm} , розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{cm} = P_{1н} - P_{EM} - \Delta P_{E1}, \quad (3.12)$$

$$\Delta P_{cm} = 2078,99 - 2028,03 - 24,24 = 26,72.$$

Результати розрахованих параметрів двигуна заносимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Складова втрат у двигуні

Назва величини	Позначення	Фізична величина	Розмірність
Механічні втрати	$\Delta P_{мех}$	кВт	7,11
Додаткові втрати	$\Delta P_{доб}$	кВт	10,39
Втрати у роторі	ΔP_{E1}	кВт	24,24
Втрати у статорі	ΔP_{E2}	кВт	8,23
Втрати в сталі	$\Delta P_{ст}$	кВт	26,72
Сумарні втрати потужності	$\Delta P_{н} = \sum \Delta P$	кВт	76,8

Розрахунок «Г»-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна.

Критичне ковзання:

$$S_k = S_n \cdot (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}), \quad (3.13)$$

де S_n - номінальне ковзання, що складає 0,5%;

$\lambda_m = \frac{M_{макс}}{M_{ном}} = 2,5$ - перевантажувальна здатність по моменту;

$$S_k = 0,005 \cdot (2,5 + \sqrt{(2,5)^2 - 1}) = 0,023.$$

Визначимо індуктивний опір короткого замикання:

$$x_k = (x_1 + x_2) = \frac{3 \cdot V_{н.ф}^2 \cdot p}{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{макс}}, \quad (3.14)$$

де p - число пар полюсів двигуна;

ω_0 - частота мережі.

$$x_k = \frac{3 \cdot (3468)^2 \cdot 6}{2 \cdot 314 \cdot 38776,9 \cdot 2,5} = 3,55.$$

Величину наведеного активного опору r_2 , розраховуємо за формулою,
Ом:

$$r_2 = S_k \cdot x_k, \quad (3.15)$$

$$r_2 = 0,023 \cdot 3,56 = 0,0817.$$

Величину активного опору статора r_1 , розраховуємо за формулою, Ом:

$$r_1 = \sigma_1 \cdot r_1, \quad (3.16)$$

де σ_1 - коефіцієнт переходу з „Г”-подібної схеми заміщення в „Г”-подібну.

$$r_1 = 1,05 \cdot 0,120 = 0,126.$$

З „Г”-подібної схеми заміщення отримаємо вираз для $tg\varphi_n$:

$$tg\varphi_n = \frac{x_k(x_k + x_\mu) + (r_1 + \frac{r_2}{S_n})^2}{(r_1 + \frac{r_2}{S_n})x_\mu}, \quad (3.17)$$

$$\frac{r_2}{S_n} = \frac{0,0817}{0,005} = 16,34;$$

$$r_1 + \frac{r_2}{S_{\mu}} = 0,126 + 16,34 = 16,46 \text{ Ом.}$$

$$x_k = x_1 + x_2 = 3,55 \text{ Ом.}$$

Після підстановки в попередній вираз (3.17.) відомих параметрів отримаємо вираз з одним невідомим x_{μ} , Ом:

$$0,828 = \frac{3,55(3,55 + x_{\mu}) + (16,34)^2}{(16,34)x_{\mu}},$$

$$x_{\mu} = 27,74 .$$

Приймемо наближено:

$$x_1 = x_2 = \frac{x_k}{2} = \frac{3,55}{2} = 1,777 \text{ Ом.}$$

Параметри „Г”-подібної схеми заміщення, Ом:

$$r_1 = 0,120 ;$$

$$r_2 = \frac{r_{2''\Gamma''}}{\sigma^2} = \frac{0,0817}{(1,05)^2} = 0,074 ;$$

$$x_1 = \frac{x_{1''\Gamma''}}{\sigma} = \frac{1,777}{1,05} = 1,69 ;$$

$$x_2 = \frac{x_{2''\Gamma''}}{\sigma^2} = \frac{1,777}{(1,05)^2} = 1,611 ;$$

$$x_{\mu} = x_{\mu^{\prime} \Gamma^{\prime}} - x_1 = 27,5 - 1,69 = 25,81 .$$

Розрахунки відносних параметрів схеми заміщення АД

Базові параметри:

$$x_{\sigma} = z_{\sigma} = \frac{U_{\text{фазн}}}{I_{\text{ф,дн}}},$$

$$x_{\sigma} = z_{\sigma} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 259,5} = 13,36 \text{ Ом.}$$

$$I_{\sigma} = I_{\text{фдн}} = 259,5 \text{ А.}$$

Величину базової частоти обертання(рад/с), розраховуємо за формулою,
рад/с:

$$\omega_{\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f_{1н}, \quad (3.18)$$

$$\omega_{\sigma} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 .$$

Величину базової потужності розраховуємо за формулою, кВт:

$$P_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{фдн}} \cdot I_{\text{фдн}}, \quad (3.19)$$

$$P_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 259,5 = 2696803 .$$

Величину базового моменту розраховуємо за формулою, Н·м:

$$M_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{\omega_{\delta} / z}, \quad (3.20)$$

$$M_{\delta} = \frac{2696803 \cdot 6}{314} = 51531.$$

Величину базового магнітного потоку розраховуємо за формулою, Вб:

$$\psi_{\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{фдн}}}{\omega_{\delta}}, \quad (3.21)$$

$$\psi_{\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot 314} = 15,602.$$

Далі розрахунки проводимо у відносних параметрах.

Величину відносного номінального моменту розраховуємо за формулою:

$$M'_n = \frac{M_n}{M_{\delta}}, \quad (3.22)$$

$$M'_n = \frac{38776}{51531} = 0,753 \text{ в.о.}$$

Величину відносного опору розраховуємо за формулою:

$$R'_2 = \frac{R_2}{R_{\delta}}, \quad (3.23)$$

$$R'_2 = \frac{0,074}{13,36} = 0,005539 \text{ в.о.}$$

Величину відносної номінальної зміни потоку ротору розраховуємо за формулою:

$$\psi'_{rn} = \sqrt{\frac{M'_n \cdot R'_2}{\beta_n}}, \quad (3.24)$$

$$\psi'_{rn} = \sqrt{\frac{0,753 \cdot 0,005539}{0,005}} = 0,913 \text{ в.о.}$$

Величину абсолютної номінальної зміни потоку ротору розраховуємо за формулою:

$$\psi_{rn} = \psi'_{rn} \cdot \psi_{\delta}, \quad (3.25)$$

$$\psi_{rn} = 0,913 \cdot 15,46 = 14,11.$$

Величину відносної номінальної зміни потоку ротору розраховуємо за формулою:

$$L'_m = \frac{x_m}{x_{\delta}}, \quad (3.26)$$

$$L'_m = \frac{25,8}{13,36} = 1,931 \text{ в.о.}$$

Величину коефіцієнта приведення розраховуємо за формулою:

$$K = \frac{x_{\mu}}{x_{\mu} + x_2}, \quad (3.27)$$

$$K = \frac{25,8}{25,8 + 1,6} = 0,941.$$

Величину відносного струму розраховуємо за формулою:

$$I'_{1x} = \frac{\psi'_{rn}}{L'_m}, \quad (3.28)$$

$$I'_{1x} = \frac{0,913}{1,931} = 0,4728 \text{ в.о.}$$

Абсолютну величину намагнічуваної складової струму розраховуємо за формулою, А:

$$I_{1x} = I'_{1x} \cdot I_{\sigma}, \quad (3.29)$$

$$I_{1x} = 0,4728 \cdot 259,5 = 122,5969.$$

Величину відносного значення магнітного потоку зазору розраховуємо за формулою:

$$\psi'_{mn} = \sqrt{(\psi'_{rn})^2 + \left[\frac{x_2 \cdot M'_n}{x_{\mu} \cdot I'_{1x}} \right]^2}, \quad (3.30)$$

$$\psi'_{mn} = \sqrt{(0,913)^2 + \left[\frac{1,6 \cdot 0,753}{25,8 \cdot 0,4728} \right]^2} = 0,918 \text{ в.о.}$$

Величину відносного струму в сталому режимі розраховуємо за формулою:

$$I'_{1(cm)} = \sqrt{(I'_{1x})^2 + \left(\frac{M'_{cm}}{K \cdot \psi'_{rn}}\right)^2}, \quad (3.31)$$

$$I'_{1(cm)} = \sqrt{(0,4728)^2 + \left(\frac{0,707}{0,941 \cdot 0,913}\right)^2} = 0,949 \text{ в.о.}$$

Величину відносного струму в режимі „розгону-гальмування” розраховуємо за формулою:

$$I'_{1(p,z)} = \sqrt{(I'_{1x})^2 + \left(\frac{M'_{p,z}}{K \cdot \psi'_{rn}}\right)^2}, \quad (3.32)$$

$$I'_{1(p,z)} = \sqrt{(0,4728)^2 + \left(\frac{0,617}{0,941 \cdot 0,913}\right)^2} = 0,8598 \text{ в.о.}$$

$$\psi'_{mx} = \psi'_{rn} = 0,913 \text{ в.о.}$$

$$\psi'_{m.cm} = \frac{x_2 \cdot M'_{ycm}}{x_\mu \cdot I'_{1x}}, \quad (3.33)$$

$$\psi'_{m.cm} = \frac{1,61 \cdot 0,707}{25,81 \cdot 0,4728} = 0,0932 \text{ в.о.}$$

$$\psi'_{m.p.m} = \frac{x_2 \cdot M'_{p.m}}{x_\mu \cdot I'_{1x}}, \quad (3.34)$$

$$\psi'_{m.p.z} = \frac{1,61 \cdot 0,617}{25,81 \cdot 0,4728} = 0,081 \text{ в.о.}$$

$$\psi'_{m.cm} = \sqrt{(\psi'_{m.x})^2 + (\psi'_{m.cm})^2}, \quad (3.35)$$

$$\psi'_{m.cm} = \sqrt{(0,913)^2 + (0,0932)^2} = 0,9177 \text{ в.о.}$$

$$\psi'_{m.p.z} = \sqrt{(\psi'_{m.x})^2 + (\psi'_{m.p.z})^2}, \quad (3.36)$$

$$\psi'_{m.p.z} = \sqrt{(0,913)^2 + (0,081)^2} = 0,9165 \text{ в.о.}$$

Величину відносного моменту розраховуємо за формулою:

$$M' = M'_{cm} + M'_{p.z}, \quad (3.37)$$

де M'_{cm} – величина відносного моменту в сталому режимі, що обчислюється за формулою:

$$M'_{cm} = \frac{M_c}{M_{\sigma}} = \frac{36,45}{51,531} = 0,707 \text{ в.о.}, \quad (3.38)$$

де $M'_{p.z}$ – величина відносного моменту (в.о) в режимі „розгін-гальмування”, що обчислюється за формулою:

$$M'_{p.z} = \frac{M_c + M_{x.x}}{M_{\sigma}} = \frac{30,8 + 0,1 \cdot 9,8}{51,531} = 0,617 \text{ в.о.} \quad (3.39)$$

Величина $\sin \varphi_{cm}$ в сталому режимі, що обчислюється за формулою:

$$\sin \varphi_{cm} = \frac{M'_{cm}}{K \cdot L'_m \cdot I'_{1x}}, \quad (3.40)$$

$$\sin \varphi_{cm} = \frac{0,707}{0,941 \cdot 1,931 \cdot 0,4728} = 0,8229.$$

Величина $\sin \varphi_{p,m}$ в режимі „розгін-гальмування”, що обчислюється за формулою:

$$\sin \varphi_{p,m} = \frac{M'_{p,m}}{K \cdot L'_m \cdot I'_{1x}}, \quad (3.41)$$

$$\sin \varphi_{p,m} = \frac{0,617}{0,941 \cdot 1,931 \cdot 0,4728} = 0,718.$$

$$L'_{or} = L'_2 = \frac{x_2}{x_6} = \frac{1,61}{13,36} = 0,1205. \quad (3.42)$$

Величину фазного струму в сталому режимі розраховуємо за формулою,
А:

$$I_{\phi(cm)} = \frac{P_{cm}}{\sqrt{3} \cdot U_{л\delta} \cdot K_M}, \quad (3.43)$$

де $P_{\deltaв.см}$ – потужність двигуна в сталому режимі, кВт:

$$P_{\deltaв.см} = M_{cm} \cdot \omega_{cm} + \Delta P_{\deltaв.см}, \quad (3.44)$$

$$P_{\deltaв.см} = 36,4 \cdot 32,9 + 41,134 = 1238;$$

$$I_{ПЧ(см)} = \frac{1238}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,98} = 122.$$

Величину фазного струму перетворювача частоти в режимі „розгін-гальмування” можна розраховувати за формулою, Ат:

$$I_{ПЧф(p.m)} = \frac{P_{p.m}}{\sqrt{3} \cdot U_{л\delta} \cdot K_m}, \quad (3.45)$$

де $P_{\deltaв.p.m}$ – потужність двигуна в режимі „розгін-гальмування”, кВт:

$$P_{\deltaв.p.m} = M_{p.m} \cdot \omega_{p.m} + \Delta P_{\deltaв.p.m}, \quad (3.46)$$

$$P_{\deltaв.уст} = 31,7 \cdot 32,9 + 32,387 = 1075;$$

$$I_{ПЧ(p.m)} = \frac{1075}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,98} = 106.$$

Величину робочої частоти двигуна розраховуємо за формулою, Гц:

$$f_1 = \frac{\omega_{см} \cdot p}{2 \cdot \pi},$$

де p -число пар полюсів двигуна;

$$f_1 = \frac{32,9 \cdot 6}{2 \cdot 3,14} = 31,4.$$

Величину втрат потужності двигуна в сталому режимі розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{\text{дв.см}} = 3 \cdot \lambda_1 \cdot I_{\text{ycm}}^2 (R_1 + K^2 \cdot R_2 \cdot \sin \varphi_{\text{ycm}}), \quad (3.47)$$

$$\Delta P_{\text{дв.см}} = 3 \cdot 1,3 \cdot (246,26)^2 (0,12 + (0,941)^2 \cdot 0,074 \cdot 0,8229) = 41,134 \text{ кВт.}$$

$$I_{\text{1cm}} = I'_{\text{1cm}} \cdot I_{\text{б}}, \quad (3.48)$$

$$I_{\text{1cm}} = 0,949 \cdot 259,5 = 246,26 \text{ А.}$$

Величину втрат потужності двигуна в режимі „розгін-гальмування” можна розраховувати за формулою:

$$\Delta P_{\text{дв.р.м}} = 3 \cdot \lambda_1 \cdot I_{\text{р.м}}^2 (R_1 + K^2 \cdot R_2 \cdot \sin \varphi_{\text{р.м}}), \quad (3.48)$$

$$\Delta P_{\text{дв.р.м}} = 3 \cdot 1,3 \cdot (223)^2 (0,12 + (0,941)^2 \cdot 0,074 \cdot 0,718) = 32,387 \text{ кВт.}$$

$$I_{\text{1р.з.}} = I'_{\text{1р.з.}} \cdot I_{\text{б}}, \quad (3.49)$$

$$I_{\text{1р.з.}} = 0,8598 \cdot 259,5 = 223 \text{ А.}$$

Величину втрат потужності частотного перетворювача в сталому режимі розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{\text{ПЧ.см}} = \Delta P_{\text{ПЧ.Н}} (K_1 \cdot I'_{\text{1ycm}}^2 + K_2 \cdot I'_{\text{1ycm}} + K_3), \quad (3.50)$$

$$\Delta P_{\text{ПЧ.см}} = 28,4(0,4 \cdot (0,949)^2 + 0,4 \cdot 0,949 + 0,2) = 26,69.$$

Величину втрат потужності частотного перетворювача в режимі „розгін-гальмування” розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{ПЧ.p.m} = \Delta P_{ПЧ.H} (K_1 \cdot I'_{1p.m}{}^2 + K_2 \cdot I'_{1p.m} + K_3), \quad (3.51)$$

$$\Delta P_{ПЧ.p.m} = 28,4(0,4 \cdot (0,8598)^2 + 0,4 \cdot 0,8598 + 0,2) = 23,832.$$

Величину втрат потужності частотного перетворювача в номінальному режимі розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{ПЧН} = \left(\frac{1}{\eta_{ПЧ.H}} - 1 \right) \cdot P_{ПЧ.H}, \quad (3.52)$$

$$\Delta P_{ПЧН} = \left(\frac{1}{0,986} - 1 \right) \cdot 2000 = 28,39.$$

Величину втрат потужності мережі в сталому режимі розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{мереж.в.ст.} = 3 \cdot R_{\phi} \cdot (2 \cdot I_{\phi.ст.})^2, \quad (3.53)$$

$$\Delta P_{мереж.в.ст.} = 3 \cdot 0,0042 \cdot (2 \cdot 122)^2 = 0,750.$$

Величину втрат потужності частотного перетворювача в режимі „розгін-гальмування” розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{мереж.p.г.} = 3 \cdot R_{\phi} \cdot (2 \cdot I_{\phi.p.г.})^2, \quad (3.54)$$

$$\Delta P_{мереж.p.г.} = 3 \cdot 0,0042 \cdot (2 \cdot 106)^2 = 0,566.$$

Величину втрат потужності в сталі в сталому режимі розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{Мст} = \frac{\Delta P_{MH}}{2 \cdot (\psi'_{mn})^2} \left[(L'_m)^2 \cdot (\cos^2 \varphi_{вст}) + (K^2 \cdot L'_{or})^2 \cdot (\sin^2 \varphi_{вст}) \right] \cdot (I'_{вст})^2, \quad (3.55)$$

$$\Delta P_{Мст} = \frac{26,72}{2 \cdot (0,918)^2} \cdot ((1,93)^2 \cdot 0,3228 + (0,94)^4 \cdot (0,120)^2 \cdot (0,677)^2) \cdot (0,949)^2 = 17,29 .$$

Величину втрат потужності в сталі в режимі „розгін-гальмування” розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{Мр.г} = \frac{\Delta P}{2 \cdot (\psi'_{mn})^2} \left[(L'_m)^2 \cdot (\cos^2 \varphi_{р.м}) + (K^2 \cdot L'_{or})^2 \cdot (\sin^2 \varphi_{р.м}) \right] \cdot \frac{(I'_{1р.м})^2}{2,3}, \quad (3.56)$$

$$\Delta P_{Мр.г} = \frac{26,72}{2 \cdot (0,918)^2} \cdot ((1,931)^2 \cdot (0,484) + (0,941)^4 \cdot (0,1205)^2 \cdot (0,515)^2) \cdot \frac{(0,85)^2}{2,3} = 9,2 .$$

Величину додаткових втрат потужності в сталому режимі розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{доб.ст} = \Delta P_{доб.л} \left(\frac{I_{1ст}}{I_{1л}} \right)^2, \quad (3.57)$$

$$\Delta P_{доб.вст} = 10,39 \cdot (0,949)^2 = 9,357 .$$

Величину додаткових втрат потужності в режимі „розгін-гальмування” розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{\text{доб.р.з}} = \Delta P_{\text{доб.н}} \left(\frac{I_{1p.z}}{I_{1н}} \right)^2, \quad (3.58)$$

$$\Delta P_{\text{доб.р.з}} = 10,39 \cdot (0,8598)^2 = 7,68.$$

Величину втрат електромагнітної енергії розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{E1} = 3 \cdot I_{ycm}^2 (R_1 + K^2 \cdot R_2 \cdot \sin \varphi_{ycm}) \cdot (t_{ycm1} + t_{ycm2}) + 3 \cdot I_{p.m}^2 (R_1 + K^2 \cdot R_2 \cdot \sin \varphi_{p.m}) \cdot (t_{p1} + t_{p2} + t_{m1} + t_{m2}), \quad (3.59)$$

$$\Delta W_{E1} = 3 \cdot (246,26)^2 (0,12 + (0,941)^2 \cdot 0,074 \cdot 0,8229) \cdot (3 + 3) + 3 \cdot (223)^2 (0,12 + (0,41)^2 \cdot 0,074 \cdot 0,718) \cdot (1 + 1 + 1 + 1) = 289,535.$$

Величину втрат енергії в сталі розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{M1} = \frac{\Delta P}{2(\psi'_{mn})^2} \left[\left[(L'_m)^2 (\cos^2 \varphi_{cm}) + (K^2 \cdot L'_{or})^2 (\sin^2 \varphi_{cm}) \right] (I'_{cm})^2 (t_{cm1} + t_{cm2}) + \left[(L'_m)^2 (\cos^2 \varphi_p) + (K^2 \cdot L'_{or})^2 (\sin^2 \varphi_{p.z}) \right] \frac{(I'_{1p.z})^2}{2,3} (t_{p1} + t_{p2} + t_{z1} + t_{z2}) \right] \quad (3.60)$$

$$\Delta W_{M1} = \frac{26,72}{2 \cdot (0,918)^2} \cdot \left[\left((1,93)^2 \cdot 0,32 + (0,94)^4 \cdot (0,120)^2 \cdot (0,67) \right) (0,94)^2 \cdot (3 + 3) + \left((1,93)^2 \cdot (0,48) + (0,94)^4 \cdot (0,12)^2 \cdot (0,51) \right) \cdot 4 \cdot 1^{1,3} \cdot \frac{(0,85)^2}{2,3} \right] = 140,9.$$

Величину втрат енергії (кДж) в частотному перетворювачі розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{ПЧ} = \Delta P_{ПЧ} \cdot ((K_1 \cdot I'_{1ycm})^2 + K_2 \cdot I'_{1ycm} + K_3) \cdot (t_{ycm1} + t_{ycm2}) + (K_1 \cdot I'_{1p.m})^2 + K_2 \cdot I'_{1p.m} + K_3) \cdot (t_{p1} + t_{p2} + t_{m1} + t_{m2}), \quad (3.61)$$

$$\Delta W_{\text{ПЧ}} = 28,4 \cdot ((0,4 \cdot (0,949)^2 + 0,4 \cdot 0,949 + 0,2) \cdot (3+3) + (0,4 \cdot (0,8598)^2 + 0,4 \cdot 0,8598 + 0,2) \cdot (1+1+1+1)) = 255,53$$

Величину втрат додаткової енергії можна розраховувати за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{доб}} = \Delta P_{\text{доб.н}} \left(\left(\frac{I_{\text{узм}}}{I_{\text{н}}} \right)^2 \cdot (t_{\text{узм1}} + t_{\text{узм2}}) + \left(\frac{I_{\text{п.м}}}{I_{\text{н}}} \right)^2 \cdot (t_{\text{п1}} + t_{\text{п2}} + t_{\text{м1}} + t_{\text{м2}}) \right), \quad (3.62)$$

$$\Delta W_{\text{доб}} = 10,39 \left((0,949)^2 \cdot (3+3) + (0,8598)^2 \cdot (1+1+1+1) \right) = 86,866$$

Величину втрат енергії в мережі розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{мереж}} = \Delta P_{\text{мереж.ст}} \cdot (t_{\text{см1}} + t_{\text{см2}}) + \frac{\Delta P_{\text{мереж.р.с}} \cdot (t_{\text{п1}} + t_{\text{п2}} + t_{\text{с1}} + t_{\text{с2}})}{3},$$

$$\Delta W_{\text{сети}} = 0,766 \cdot (3+3) + \frac{0,566 \cdot (1+1+1+1)}{3} = 5,25$$

Для отримання більш точних величин, необхідно помножити втрати енергії на поправочні коефіцієнти, що враховують несинусоїдальність струму статора:

$$\lambda_1 = 1,3; \lambda_2 = 1,05.$$

Помноживши відповідні коефіцієнти на відомі величини отримаємо, кДж :

$$\Delta W_E = \lambda_1 \cdot \Delta W_{E1} = 1,3 \cdot 289,535 = 376,39$$

$$\Delta W_{M1} = \lambda_2 \cdot \Delta W_{M1} = 1,05 \cdot 140,9 = 147,945$$

Величину втрат енергії в номінальному режимі розраховуємо за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{дв.н}} = P_{2\text{н.дв}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \cdot T_{\text{ц}}, \quad (3.63)$$

$$\Delta W_{\text{дв.н}} = 2000 \cdot \left(\frac{1}{0,963} - 1 \right) \cdot 10 = 780 .$$

Перевірка:

$$\Delta W_E + \Delta W_{CT} + \Delta W_{\text{дод}} \leq \Delta W_{\text{дв.н}}, \quad (3.64)$$

$$376,39 + 147,945 + 86,866 \leq 780 ,$$

$$610,811 \leq 780 .$$

Сумарні втрати:

$$\Delta W_{\Sigma} = [\Delta W_{AD} + \Delta W_{ПЧ} + \Delta W_{\text{мереж}}] \cdot K_{\text{ц}}, \quad (3.65)$$

$$\Delta W_{\Sigma} = [1221,622 + 511,06 + 10,5] \cdot 360 = 624720,2 \text{ кДж або } 174 \text{ кВт/год.}$$

Оскільки система частотного регулювання асинхронного електроприводу вперше застосовується до прокатного стану, необхідно порівняти даний проект с аналогічним енергозберігаючим.

Впроваджуємо в існуючу систему фільтрокомпесуючий прилад-розрахунок параметрів тиристорного перетворювача та двигуна постійного струму аналогічній системі „ТП-ДПС”, змінюються втрати в мережі.

Величину втрат потужності $\Delta P_{\text{мереж.ст}}$ у мережі в сталому режимі, обчислюємо за формулою:

$$\Delta P_{\text{мереж.ст}} = 3 \cdot R_{\phi} \cdot (I_{\phi.\text{ст}})^2, \quad (3.66)$$

де R_{ϕ} – опір мережі, що обчислюється за формулою:

$$R_{\phi} = R_{\text{тр}} + R_{\text{каб}}, \quad (3.67)$$

де $R_{\text{тр}}$ – опір трансформатора, що обчислюється за формулою:

$$R_{\text{тр}} = R_{\text{к.з}},$$

де $R_{\text{к.з}} = 0,00085$ – опір короткого замикання трансформатора;

$$R_{\text{тр}} = 0,0085 \text{ Ом.}$$

$R_{\text{каб}}$ – опір кабелю, що обчислюємо за формулою, Ом:

$$R_{\text{каб}} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,0175 \cdot \frac{45}{185} = 0,0042. \quad (3.68)$$

$$R_{\phi} = 0,00085 + 0,0042 = 0,00505.$$

$I_{\phi.\text{вст}}$ – фазний струм сталого режиму двигуна, що обчислюється за формулою, А:

$$I_{\phi.\text{вст}} = \frac{P_{\Sigma\text{вст}}}{\sqrt{3} \cdot U_{10} \cdot K_{\text{м}}}, \quad (3.69)$$

де де $P_{\Sigma_{вст}}$ – сумарна потужність системи у сталому режимі, що обчислюється за формулою, кВт:

$$P_{\Sigma_{вст}} = 2 \cdot M_{вст} \cdot \omega_{вст} + 4 \cdot \Delta P_{ДПСст} + \Delta P_{ТПст}, \quad (3.70)$$

$$P_{\Sigma_{вст}} = 2 \cdot 36,4 \cdot 32,9 + 247,2 + 225,4 = 2867,$$

$$I_{\phi_{вст}} = \frac{2867}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,98} = 281,9,$$

$$\Delta P_{мереж.вст} = 3 \cdot 0,1830 \cdot (281,9)^2 = 43,6.$$

Величину втрат потужності $\Delta P_{мереж.р.з.}$ у мережі в режимі „розгін-гальмування” ,розраховуємо за формулою, кВт:

$$\Delta P_{мереж.р.з.} = 3 \cdot R_{\phi} \cdot (I_{\phi.р.з.})^2, \quad (3.71)$$

де $I_{\phi.р.з.}$ – фазний струм режиму „розгін-гальмування” двигуна, що обчислюється за формулою, А:

$$I_{\phi.р.з.} = \frac{P_{\Sigma_{р.з.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\phi} \cdot K_{\text{м}}}, \quad (3.72)$$

де $P_{\Sigma_{р.з.}}$ – сумарна потужність системи у режимі „розгін-гальмування”, що обчислюється за формулою, кВт:

$$P_{\Sigma_{р.з.}} = 2 \cdot M_{р.з.} \cdot \omega_{вст} + \Delta P_{ДПСр.з.} + \Delta P_{ТПр.з.}, \quad (3.73)$$

$$P_{\Sigma p.z.} = 2 \cdot 31,8 \cdot 32,9 + 189,2 + 161,4 = 2443 ,$$

$$I_{\phi.p.z.} = \frac{2443}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,98} = 252,7 ,$$

$$\Delta P_{\text{мереж.p.z.}} = 3 \cdot 0,1830 \cdot (252,7)^2 = 35,057 .$$

Втрати енергії у мережі можна розрахувати за формулою:

$$\Delta W_{\text{мереж.}} = \Delta W_{\text{мереж.вст}} + \Delta W_{\text{мереж.p.z.}} + \Delta W_{\text{мереж.х.х.}} \quad (3.74)$$

Втрати енергії у мережі в сталому режимі можна розрахувати за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{мереж.вст}} = \Delta P_{\text{мереж.вст.}} \cdot (t_{\text{вст1}} + t_{\text{вст2}}) , \quad (3.75)$$

$$\Delta W_{\text{мереж.ст}} = 43,6 \cdot (3 + 3) = 261 .$$

Втрати енергії у мережі в режимі „розгін-гальмування”: можна розрахувати за формулою, кДж·с:

$$\Delta W_{\text{мереж.p.z.}} = \Delta P_{\text{мереж.p.z.}} \cdot (t_{p1} + t_{p2} + t_{z1} + t_{z2}) , \quad (3.76)$$

$$\Delta W_{\text{мереж.p.z.}} = 35 \cdot (1 + 1 + 1 + 1) = 140,2 .$$

Втрати енергії у мережі в режимі „холостого ходу”: можна розрахувати за формулою, кДж·с:

$$\Delta W_{\text{мереж.х.х.}} = \Delta P_{\text{х.х.}} \cdot T_{\text{ц}}, \quad (3.77)$$

де $\Delta P_{\text{х.х.}}$ – втрати холостого ходу мережі, що наведені в паспортних даних, та дорівнюють 9,8 кВт;

$T_{\text{ц}}$ – час циклу, що дорівнює 10 секунд,

$$\Delta W_{\text{мереж.х.х.}} = 9,8 \cdot 10 = 98 .$$

Сумарні втрати енергії у мережі (кДж·с) можна розрахувати за формулою, кДж·с.:

$$\Delta W_{\text{мереж.}} = 261,7 + 140 + 98 = 500 .$$

Величину номінальної втрати потужності двигуна постійного струму можна розрахувати за формулою, кВт:

$$\Delta P_{\text{н}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \cdot P_{2\text{н}}, \quad (3.78)$$

$$\Delta P_{\text{н}} = \left(\frac{1}{0,924} - 1 \right) \cdot 1250 = 102,81 .$$

Величину номінальної втрати енергії двигуна постійного струму можна розрахувати за формулою, кДж:

$$\Delta W_{\text{н}} = 4 \cdot \Delta P_{\text{н}} \cdot T_{\text{ц}}, \quad (3.79)$$

$$\Delta W_{\text{н}} = 4 \cdot 102,81 \cdot 10 = 4112 .$$

Сумарні втрати:

$$\Delta W_{\Sigma} = [\Delta W_{ДПС} + \Delta W_{ТП} + \Delta W_{мереж.}] \cdot K_{ц}, \quad (3.80)$$

$$\Delta W_{\Sigma} = [2241,6 + 140 + 500] \cdot 360 = 1564589 \text{ кДж або } 278 \text{ кВт/год.}$$

Перевірка двигуна на нагрівання:

$$\Delta W_{ДПС} \leq \Delta W_{Н}, \quad (3.81)$$

$$2241,6 \leq 4112.$$

3.2 Економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів

Система „тиристорний перетворювач – двигун постійного струму” – морально застаріла й має невелику надійність через значний знос деталей. Попередні розрахунки та вказують на необхідність проведення аналізу модернізації, яка може бути проведена заміною системи тиристорний перетворювач – двигун (ТП-Д) на систему частотний перетворювач – асинхронний двигун. Вона дозволить не тільки випускати продукцію кращої якості, але й знизити витрати на обслуговування та електроенергію.

Капітальні витрати на модернізацію приводу валків однакові та складаються з витрат на електропривод, вартості монтажних робіт, зарплати за монтажні роботи, вартості устаткування, вартості займаної площі, транспортних витрат, заготівельно–складських витрат.

Результати розрахунків вартості ТП-Д та ЧП-АД заносимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Капітальні вкладення, грн

Найменування	Усього грн.	
	Система ТП-Д	Система АД-ЧП
Електропривод	1002057	8109060
Зарплата за монтажні роботи	501025	405453
Вартість монтажних робіт	1002051	810906
Вартість устаткування	1152354	9325419
Вартість займаної площі	18688	16819
Транспортні витрати (5%)	501025	45453
Заготівельно-складські витрати (1,2%)	120246	97308
Сума капітальних вкладень	1216354	9845000

Експлуатаційні витрати при застосуванні тієї або іншої системи електропривода визначаються технологічною собівартістю, що складаються зі статей:

- амортизаційні відрахування;
- витрати на споживання електроенергії;
- витрати на ремонт устаткування.

Отримані результати розрахунку витрат для обох варіантів приведені в таблиці 3.2.

Показники економічної оцінки ефективності інвестиційного проекту враховують затрати та результати, пов'язані з реалізацією проекту; виступають за границі прямих фінансових інтересів учасників інвестиційного проекту і приймають вартісне вимірювання.

Таблиця 3.2 – Експлуатаційні витрати систем Г-Д і ТП-Д для стану

Найменування витрат	ТП-Д варіант	ЧП-АД варіант	Показник економії
Амортизаційні відрахування	2429907	1966477	463430
Витрати на електроенергію	2615604	1107336	1508268
Заробітна плата	216387	3600	213259
Загальновиробничі господарські витрати	783,9	261,8	522,12
Витрати на матеріал	96126	1600	94572
Разом	2678971,7	1236413,88	2194937

Проводимо економічну оцінку для системи ЧП-АД.

Чиста приведена вартість (ЧПВ) - це дисконтована різниця між доходами та витратами, що виникли внаслідок реалізації проекту :

$$ЧПВ = \sum_{t=0}^T \frac{Rt - It}{(1 + \alpha)^t}, \quad (3.82.)$$

де R_t - результати, які досягаються на t - ому році розрахунку;

I_t - затрати на t - му році розрахунку;

n - термін розрахункового періоду, рівний номеру кроку розрахунку, на якому проводиться закриття проекту;

$E = R_t - I_t$ - ефект, який досягається на t - ому кроці розрахунку;

α – постійна ставка дисконту;

$k = (1 + \alpha)^t$ - коефіцієнт дисконтування.

Внутрішня норма рентабельності (ВНР) - ставка дисконту (α), при якій величина приведених ефектів дорівнює приведеним капіталовкладенням:

$$\sum_{t=0}^T \frac{Rt - It}{(1 + \alpha)^t} . \quad (3.83)$$

Показник ВНР слугує індикатором рівня ризику проекту. Чим більше ВНР, тим більше запас міцності проекту.

Простий термін окупності - це мінімальний часовий інтервал, за межами якого інтегральний ефект стає позитивним і залишається таким надалі, визначається за формулою.

$$T_{ок} = \frac{KB}{\sum \epsilon} , \quad (3.84)$$

де KB – капітальні витрати, що з урахуванням ліквідаційної вартості існуючого обладнання у цеху складають:

$$KB = KB_{ТП-ДПС} - KB_{ликв} ,$$

де $KB_{ликв}$ -ліквідаційна вартість комплекту ТП-ДПС,що враховує знос обладнання при ставці дисконту 15% на рік.

$$KB = 9845000 - 2394693 = 7450000 \text{ грн.}$$

$$T_{ок} = \frac{7450000}{2187222} = 3,4 . \quad (3.85)$$

Дисконтування враховує зміну вартості грошей у часі. Ставка дисконту визначається специфікою проекту. Для даного проекту покращення енергоефективності ставку дисконту можна приймати 10-15 %.

Коефіцієнт дисконтування розраховується за наступною формулою:

$$k = (1 + \alpha)^t , \quad (3.86)$$

де $\alpha=10\%$.

Щорічний дисконтований грошовий потік, тис. грн.:

$$ДГП = \frac{ЧГП}{k}. \quad (3.87)$$

Дані для розрахунку ЧГП проекту заносимо до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4– Вихідні дані для економічної оцінки проекту варіанту

ЧП-АД

Проектні дані	Роки					
	0	1	2	3	4	5
Капітальні витрати	745000	0	0	0	0	0
Економія ПЕР	0	1516000	1516000	1516000	1516000	1516000
Експлуатаційні витрати	0	-679000	-679000	-679000	-679000	-679000
Амортизація	0	1490000	1490000	1490000	1490000	1490000
Балансовий прибуток	0	705000	705000	705000	705000	705000
Податок на прибуток	0	211500	211500	211500	211500	211500
Чистий прибуток	0	493500	493500	493500	493500	493500
Чистий грошовий потік	0	1983500	1983500	1983500	1983500	1983500

Розрахуємо чисту приведену вартість (ЧПВ) при дисконтній ставці $\alpha = 10\%$ дані заносимо до таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Знаходження ЧПВ при $\alpha = 10\%$, тис. грн.

Роки	ЧГП	КД10%	ДГП	КГП
0	0	1	0	-745000
1	1983000	1,1	1802727	-5647300
2	1983000	1,21	1638843	-4008400
3	1983000	1,331	1489857	-2518600
4	1983000	1,4641	1354415	-1164200
5	1983000	1,6105	1231287	671300

Для визначення ВНР розрахуємо чисту приведену вартість (ЧПВ) при дисконтній ставці $\alpha = 20\%$, дані заносимо до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Знаходження ЧПВ при $\alpha = 20\%$, тис.грн.

Роки	ЧГП	КД20%	ДГП	КГП
0	0	1	0	-7450000
1	1983500	1,2	1652916	-5797100
2	1983500	1,44	1377430	-4419700
3	1983500	1,728	1147858	-3271800
4	1983500	2,0736	956549	-2315200
5	1983500	2,4883	797124	-1518100

На основі отриманих даних в розрахунку на рисунку 3.2 визначаємо дисконтований термін окупності проекту.

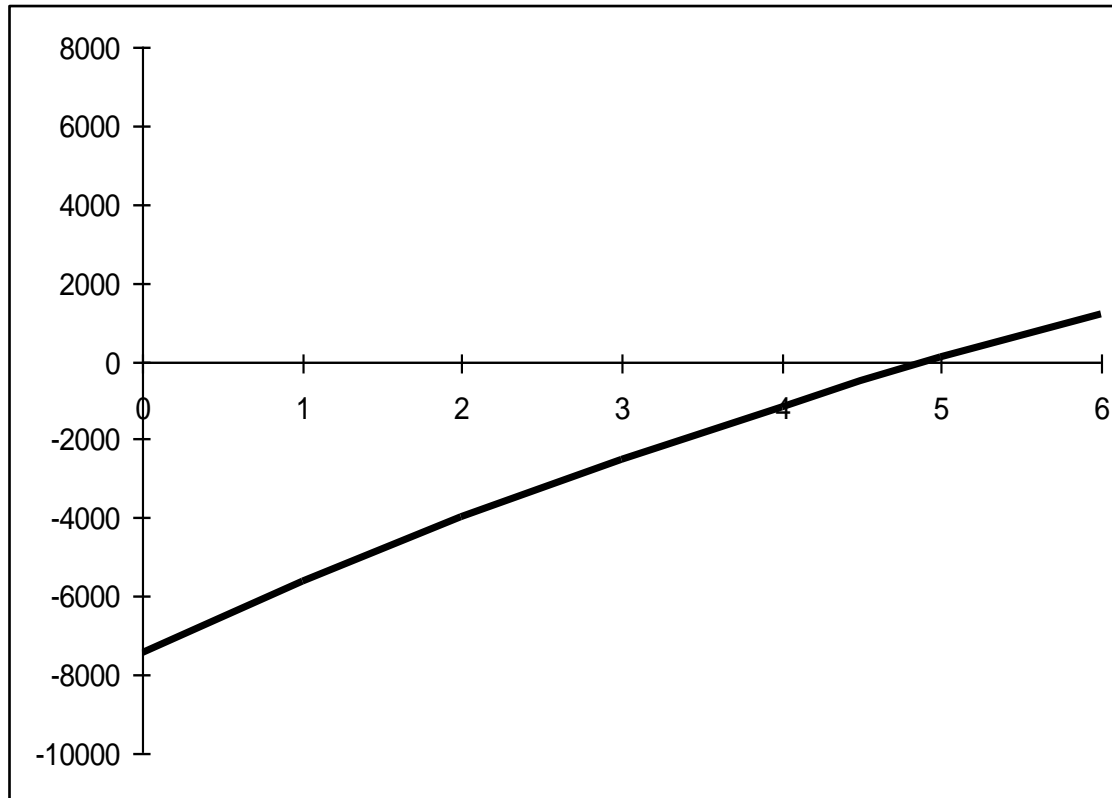


Рисунок 3.2 – Дисконтований термін окупності варіанту ЧП-АД

Виходячи з того, що на енергозберігаючі заходи витрачається 7450000 грн., а економія становить 1555000 грн. Простий термін окупності для даного проекту складе 3,4 роки. Дисконтований термін окупності для даного проекту складе 4,9 роки. Даний інвестиційний проект можна вважати прийнятним.

Оскільки система частотного регулювання асинхронного електроприводу вперше застосовується до прокатного стану, та як видно з попередніх розрахунків надає суттєве зниження витрат на енергоресурси та обслуговування обладнання, а також має сприятливий термін окупності, необхідно порівняти даний проект з аналогічним енергозберігаючим, щоб бути впевненим в правильності його прийняття.

Фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКУ) призначені для зниження гармонійних спотворень напруги та компенсації реактивної потужності

навантажень споживачів в мережах електропостачання промислових підприємств і в електричних мережах. До системи ТП–ДПС додаємо 2 ФКУ, загальною вартістю 1280000 грн.

Розрахунок витрат (табл. 3.7) робимо за аналогією, як для обчислення витрат за системою ТП–ДПС та ЧП – АД.

Таблиця 3.7 – Експлуатаційні витрати ФКУ для системи ТП-Д

Найменування витрат	ТП-Д -ФКУ варіант
Амортизаційні відрахування	310482
Витрати на електроенергію	1769382
Заробітна плата	1804
Загальновиробничі господарські витрати	800
Разом	313086

Проводимо економічну оцінку для системи ТП–ДПС–ФКУ.

Простий термін окупності - це мінімальний часовий інтервал, за межами якого інтегральний ефект стає позитивним і залишається таким надалі, визначається за формулою.

$$T_{ок} = \frac{KB}{\sum \epsilon} , \quad (3.88)$$

де KB – капітальні витрати складають 1555565 грн,

ϵ – економія енергоресурсів від впровадження проекту.

$$T_{ок} = \frac{1555565}{878000} = 1,7$$

Дані для розрахунку ЧГП проекту заносимо до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8– Вихідні дані для економічної оцінки проекту варіанту з ФКП

Проектні дані	Роки					
	0	1	2	3	4	5
Капітальні витрати	1555565	0	0	0	0	0
Економія ПЕР	0	878,00	878,00	878,00	878,00	878,00
Експлуатаційні витрати	0	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Амортизація	0	311,00	311,00	311,00	311,00	311,00
Балансовий прибуток	0	254,00	254,00	254,00	254,00	254,00
Податок на прибуток	0	76,20	76,20	76,20	76,20	76,20
Чистий прибуток	0	177,80	177,80	177,80	177,80	177,80
Чистий грошовий потік	0	488,80	488,80	488,80	488,80	488,80

Дисконтування враховує зміну вартості грошей у часі. Ставка дисконту визначається специфікою проекту. Для даного проекту покращення енергоефективності ставку дисконту можна приймати 10-15 %.

Коефіцієнт дисконтування розраховується за наступною формулою:

$$k = (1 + \alpha)^t.$$

Щорічний дисконтований грошовий потік, тис. грн.:

$$ДГП = \frac{ЧП}{k}$$

Розрахуємо чисту приведену вартість (*ЧПВ*) при дисконтній ставці $\alpha = 10\%$ дані заносимо до таблиці 3.5, в якій використовуються наступні позначення *ЧП*, *ДГП*, *КГП*.

Таблиця 3.9 – Знаходження ЧПВ при $\alpha = 10\%$, грн.

Роки	ЧП	КД10%	ДГП	КГП
0	0	1	0	-1555000
1	488800	1,1	444363	-1110600
2	488800	1,21	403966	-706670
3	488800	1,331	367242	-339430
4	488800	1,4641	333856	-8105
5	488800	1,6105	303506	294940

Для визначення ВНР розрахуємо чисту приведену вартість (*ЧПВ*) при дисконтній ставці $\alpha = 40\%$, дані заносимо до таблиці 3.6.

Таблиця 3.10 – Знаходження ЧПВ при $\alpha = 40\%$, грн

Роки	ЧП	КД 40%	ДГП	КГП
0	0	1	0	-1555000
1	488000	1,2	406666	-1148330
2	488000	1,44	338888	-809444
3	488000	1,728	282407	-527037
4	488000	2,0736	235339	-291698
5	488000	2,48832	196116	-95581

На основі отриманих даних знаходимо ВНР, (рисунок 3.3).

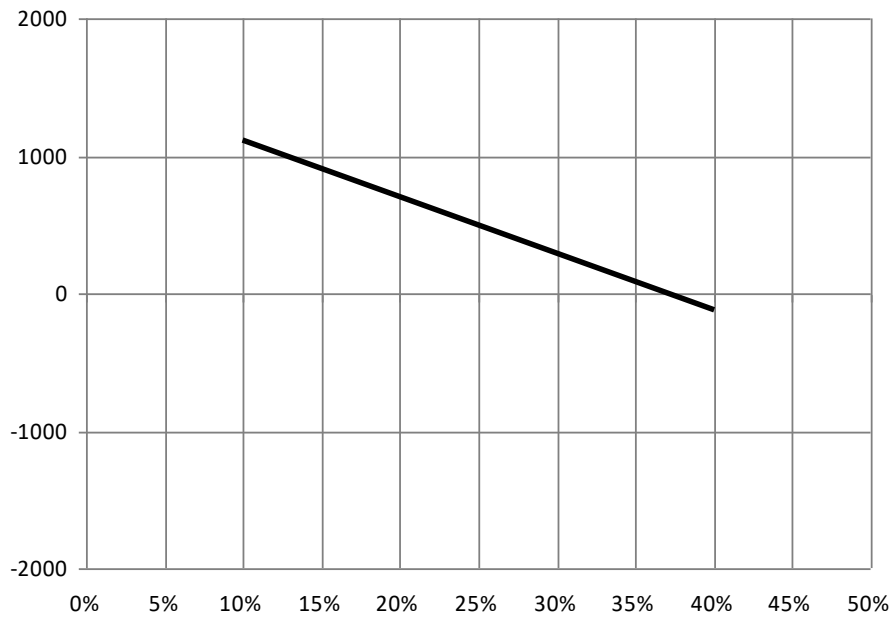


Рисунок 3.3 – Внутрішня норма рентабельності варіанту з ФКП

Цей результат показує, що при ставці дисконту, яка буде менше ніж 37%, проект буде вигідним.

На рисунку 3.2 визначаємо дисконтований термін окупності.

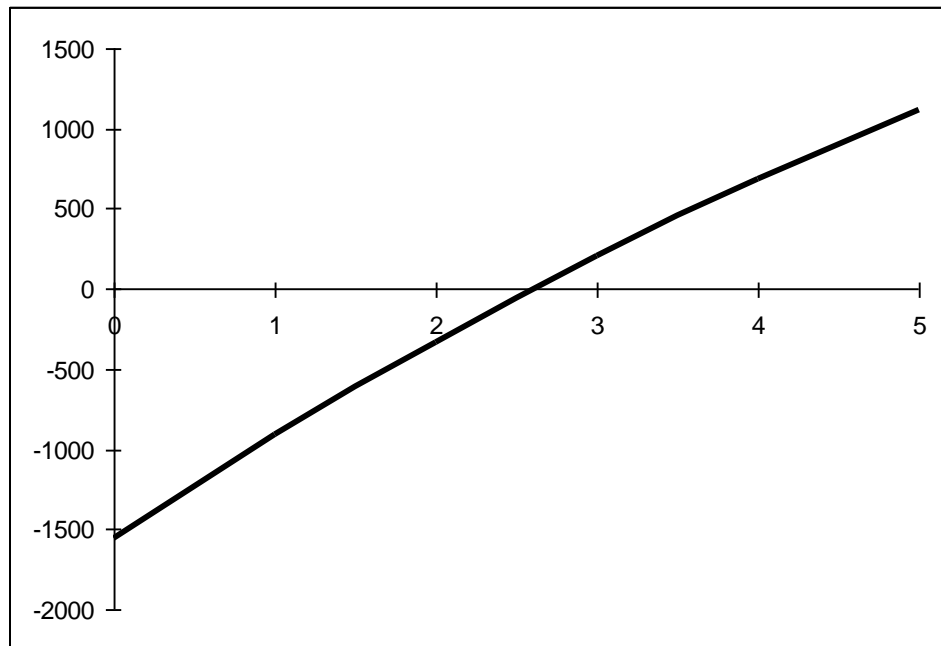


Рисунок 3.4 – Дисконтований термін окупності варіанту з ФКП

Виходячи з того, що на енергозберігаючі заходи витрачається 1555565 грн., а економія становить 878000 грн. Простий термін окупності для даного

проекту складе 1,7 роки. Дисконтований термін окупності для даного проекту складе 2,4 роки. Даний інвестиційний проєкт можна вважати прийнятним.

ВИСНОВКИ

Запропоновано спосіб модернізації потужних електроприводів прокатних станів трубопрокатного виробництва, що ґрунтується на використанні в них високовольтних частотно - регульованих асинхронних двигунів великої потужності. Для оцінки енергоефективності запропонованого способу модернізації електроприводу прокатних станів виконано порівняння з станом, що існує (базовий варіант) та з використанням в базовому варіанті фільтрокомпенсуючого приладу(ФКП).

Розроблено метод розрахунку втрат потужності для частотно-регульованого асинхронного двигуна великої потужності, що враховує втрати потужності в двигуні, частотному перетворювачі з АІН-ШІМ та в мережі.

Визначено техніко – економічні показники впровадження фільтрокомпенсуючого приладу та системи з частотним регулюванням асинхронного електродвигуна для прокатного стану, які характеризуються річною економією енергії:

- для фільтрокомпенсуючого приладу економія електроенергії за рік складає 1143800 кВт · год, дисконтований термін окупності – 2,4 роки;

- для системи з частотним регулюванням електроприводу економія електроенергії за рік складає 2038200 кВт · год, дисконтований термін окупності – 4,9 роки.

Використання фільтрокомпенсуючого приладу є більш доцільним, коли необхідна реконструкція системи, а використання системи частотно-регулювання асинхронного двигуна для створення нових систем - за рахунок одночасного зниження як загальних, так і експлуатаційних витрат та суттєвого зниження втрат електроенергії в двигуні та мережі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Електропостачання промислових підприємств: підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с
2. Бабюк С. М. Підвищення енергоефективності підприємств за рахунок контролю характеристик режимів електропостачання / С. М. Бабюк, М. Д. Приймак, Р. В. Паськів // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 90–91. — (Електротехніка та енергозбереження).
3. Енергозбереження промислових підприємств: методологія формування, механізм управління : монографія / В. В. Джеджула. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 346 с.
4. Толбатов В. А. Організація систем енергозбереження на промислових підприємствах : навч. пос. / В. А. Толбатов, І. Л. Лебединський, А. В. Толбатов – Суми : Вид-во СумДУ, 2009. – 195 с
5. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
6. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник, –К: Кондор, 2005. – 408 с.
7. Корольов А.А. Конструкція і розрахунок машин і механізмів прокатних станів: навчальний посібник для вузів. 2-е вид., Перероблене та доповнене - М.: Металургія, 1985. - 376с.

8. Корольов А.А. Механічне обладнання прокатних і трубних цехів: навчальний посібник для вузів. 4-е вид., Перероблене та доповнене - М.: Металургія, 1987. - 479с.
9. Жук А.Я. Желябіна Н.К. . Основи розрахунків приводів машин: Навчальний посібник / Запоріжжя: ЗДІА, 1996. - 145С.
10. Машини і агрегати металургійних заводів: Підручник для вузів :. У 3-х т / А.І. Ціликів, П.І. Полухін, В.Н. Гребенник. - М.: Металургія. Т. 3 Машини та агрегати для виробництва та обробки прокату, 1988. - 680с.
11. Правила технічної експлуатації механічного обладнання блюмінгів і безперервно - заготівельних станів / ВНПМехчермет. - М.: Металургія, 1979. - 192с.
12. Прітикін Д.П. Надійність, ремонт і монтаж металургійного устаткування: посібник для вузів. - М.: Металургія, 1985. - 368с.
13. Фотієва М.М. Електропривод і електрообладнання металургійних цехів: Підручник для вузів. - М.: Металургія, 1990. - 350С.
14. Економіка підприємства. / Під редакцією проф. Сафронова Н.А. М.: Юрист, 1998.
15. Економіка підприємства. / Під редакцією проф. Горфінкеля В.Я., проф. Купрякова Е.М. - М.: ЮНИТИ, 1996.
16. Лісіцин Н.А. та ін. Економіка, організація і планування промислового підприємства. - Мінськ :. Вища шк., 1990
17. Макаренко С.М. Підвищення конкурентоспроможності підприємства шляхом організації перманентних інноваційних процесів // Економічний простір, 2008, №19. – С. 296.