МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення ефективності електроспоживання споживачів великої потужності

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1413-з
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Кольчак Ю. Л.
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф., Саблін О.І.
(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
2024

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., проф._____ В.Л. Коваленко
«__02___»_____12____2024__року

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

_____Кольчак Юлія Леонідівна_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи __Підвищення ефективності електроспоживання споживачів великої потужності___
_____
керівник роботи ___Саблін О.І., д.т.н., проф._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_28_»_02__2024__року №_361 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2024 р._____
3 Вихідні дані до роботи: Для приводу валків потужних прокатних станів ПрАТ «Запоріжсталь» застосовують електродвигуни постійного струму типу МП, П, ПС: МП600-300 (600 кВт, 300 об / хв); МП 1000-210 (1000 кВт, 210 об/хв)
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _1) Аналіз існуючого електрообладнання прокатних станів ПрАТ «Запоріжсталь» 2) Електропривід вертикальних валків «Слябинг 1150» ПрАТ «Запоріжсталь» 3) Підвищення енергоефективності електроприводів великої потужності в умовах ПрАТ «Запоріжсталь»
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _1) Кінематична схема прокатного стану 2) Схема електрична принципова 3) Схема силова прокатного стану 4) Діаграми лектроприводів великої

потужності в умовах ПрАТ «Запоріжсталь» 5) Методика розрахунку втрат потужності в частотно-регульованому електроприводі 6) Техніко - економічні показники

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Саблін О.І., д.т.н., професор		
Розділ 2	Саблін О.І., д.т.н., професор		
Розділ 3	Саблін О.І., д.т.н., професор		

7 Дата видачі завдання 01.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого електрообладнання прокатних станів ПрАТ «Запоріжсталь»	30.09.2024	
2	Електропривід вертикальних валків «Слябинг 1150» ПрАТ «Запоріжсталь»	15.10.2024	
3	Підвищення енергоефективності електроприводів великої потужності в умовах ПрАТ «Запоріжсталь»	25.11.2024	

Студент _____ Ю.Л. Кольчак
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ О.І. Саблін
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ І.І. Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Кольчак Ю.Л. Підвищення ефективності електроспоживання споживачів великої потужності. Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник О.І. Саблін. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2024.

Досліджено стан електроприводів великої потужності прокатних станів а також системи їх електропостачання. Розроблено метод розрахунку втрат електроенергії у частотно регульованому асинхронному електроприводі.

На прикладі ПрАТ «Запоріжсталь» підтверджено техніко-економічну доцільність запропонованих заходів.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПРИВІД ПРОКАТНОГО СТАНУ, СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

ABSTRACT

Kolchak Y.L. Increasing the efficiency of electricity consumption of large-capacity consumers. Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, supervisor O.I. Sablin. Zaporizhzhya National University, Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency, 2024.

The condition of high-capacity electric drives of rolling mills as well as their power supply systems has been studied. A method for calculating electricity losses in a frequency-controlled asynchronous electric drive has been developed.

The technical and economic feasibility of the proposed measures was confirmed on the example of PJSC "Zaporizhstal".

Keywords: ROLLING STATE ELECTRIC DRIVE, POWER SUPPLY SYSTEM, DC MOTOR, THYRISTORY CONVERTER, ASYNCHRATOR DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, ELECTRICITY LOSSES

ЗМІСТ

Вступ…….....7

1 Аналіз існуючого електрообладнання прокатних станів ПрАТ «Запоріжсталь».....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 Сучасний частотно регульований електропривід….....27

1.6 Високовольтні перетворювачі для частотно-регульованого електроприводу.....34

2 Електропривід вертикальних валків «Слябинг 1150» ПрАТ «Запоріжсталь»……...48

2.1 Об'єкти дослідження.....48

2.2 Розрахунок електромеханічних процесів в базовому варіанті електроприводу……..…….……...55

3 Підвищення енергоефективності електроприводів великої потужності в умовах ПрАТ «Запоріжсталь»……...63

3.1 Розрахунок втрат та параметрів „Т” – подібної схеми заміщення асинхронного двигуна виду АДО-2000-6000-12У1.....63

3.2 Економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів в обтискному цеху ПрАТ „Запоріжсталь”.....89

Висновки……..……..108

Перелік посилань……..…109

ВСТУП

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.

Електропривід - 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 стуму до регульованого електроприводу перемінного струму. Цей напрямок прийнято у світовій практиці і інтенсивно розвивається, тому що прогнозується гострий дефіцит невідновлюваних енергоресурсів, відчутне зростання їхньої вартості.

Об’єкт дослідження - електроприводи та системи електропостачання прокатних станів металургійного виробництва.

Предмет дослідження - втрати електроенергії в електроприводах та системах електропостачання прокатних станів металургійного виробництва.

Мета роботи - підвищити енергоефективність електроприводів великої потужності прокатних виробництв.

Проаналізовано стан електроприводів великої потужності, що використовуються у прокатних станах металургійного комплексу та систем їх електропостачання.

Виконано розрахунок електромеханічних процесів та втрат електричної енергії для високовольтного частотно регульованого асинхронного двигуна

вертикальних валків прокатного стану обтискного цеху та в системі його електропостачання. Для порівняння виконано розрахунок втрат електричної енергії в системі електропостачання для встановленого тиристорно-регульованого двигуна постійного струму, до якого підключено фільтрокомпенсуючий прилад.

Визначено техніко-економічні показники (втрати електричної енергії, річний економічний ефект та термін окупності) для запропонованих варіантів систем електроприводу та електропостачання.

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 електропривід 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 ПрАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

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, шлеппери, ножиці, пилки, моталки, насосні станції та ін.)

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

За характером продукції, що випускається розрізняють такі види станів:

1) обтискні (блюмінги, слябінг), 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 МБЛЗ, обладнані обтискними прокатними агрегатами;

2) заготівельні для додаткового обтиснення блюмів;

3) рейкобалковий 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 двувалкові, тривалкові, чотиривалкові. За розташуванням валків розрізняють кліті з горизонтальними, вертикальними і косими валками. За кількістю робочих клітей стани діляться на одноклітьові і багатоклітьові.

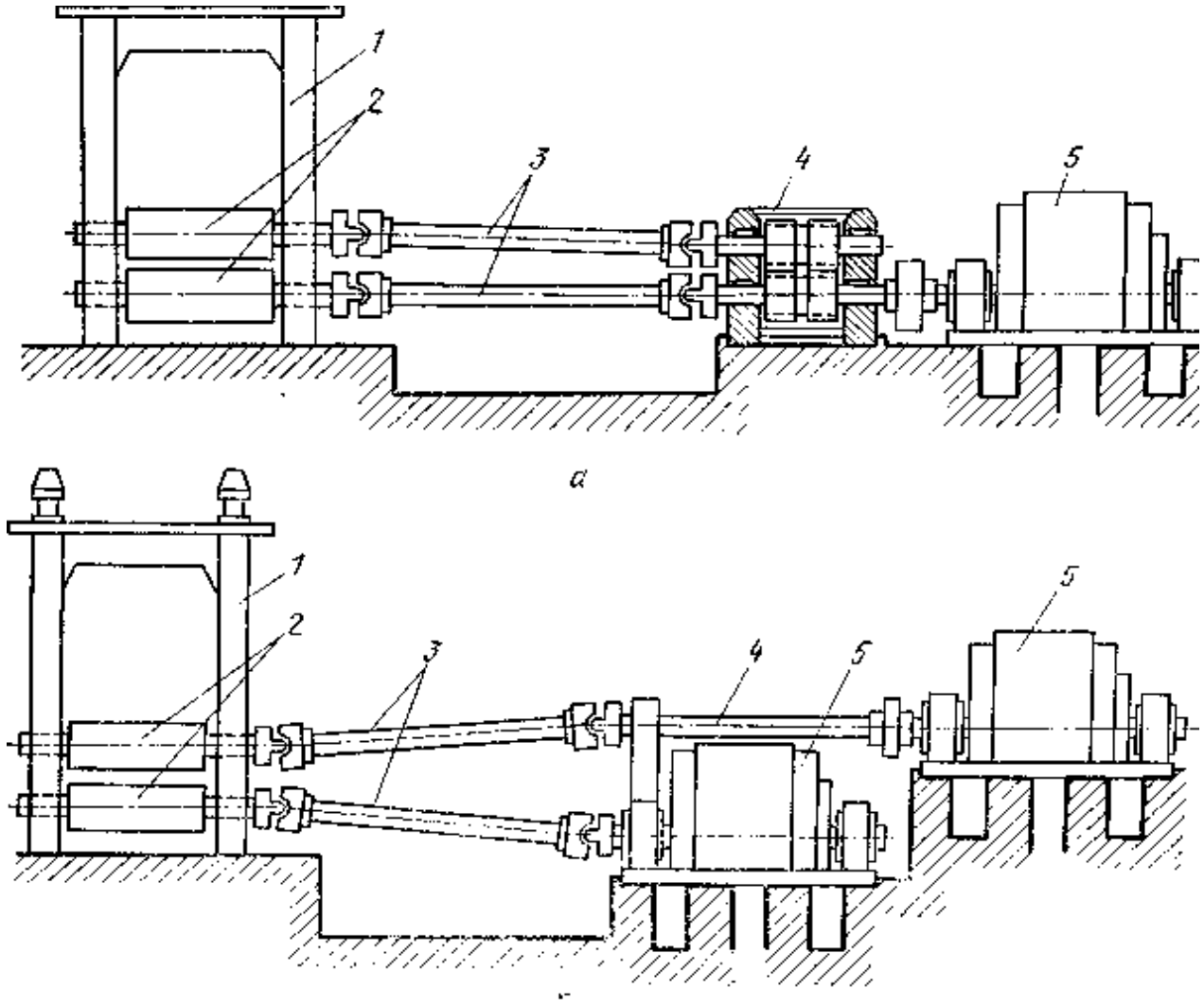
Для електроприводу клітей більшості прокатних станів можна виділити три види руху: реверсивний регульований, нереверсивний регульований і нереверсивний нерегульований. Реверсивний стан має одну кліть, прокатка в якій виробляється в обох напрямках. Нереверсивний (безперервний) стан має ряд робочих клітей, 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 одноклетьовиі 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 ходу 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.

До інших переваг індивідуального приводу валків перед груповим відносяться: зменшення сумарного моменту інерції, що припадає на одиницю потужності приводу; відсутність шестеренної кліті, 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.



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

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

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 рольганги. 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 кліті 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, рейкобалковий та ін) більш доцільним може виявитися застосування групового приводу. У порівнянні з індивідуальним груповий привід має менше електрообладнання, яке і менш складно.

У залежності від функціонального призначення, режиму прокатки та інших факторів режими роботи електроприводу будуть відрізнятися. Однак, як правило, режими ці є тяжкими. 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 :

$$\alpha = \frac{P_н \cdot M_н}{J}. \qquad (1.1)$$

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.

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 $P_н$, 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, $M_н$, кН·м	1180	1420	1750	1900
Момент інерції, т·м^2	75	75	125	125
Технічний показник, 103 кВт·кН·м / (т·м^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 магнітомяких 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 окаліноломателей таких станів застосовуються асинхронні електродвигуни.

Експлуатаційні характеристики двигунів. Для оцінки показників електродвигунів використовуються експлуатаційні характеристики, що представляють собою залежність моменту M, струму якоря $I_я$, напруги якоря двигуна U потужності P і потоку $Ф$ від швидкості.

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 двухзоннє 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 виключається 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 $I_н$. Такі характеристики наведені на рисунку 1.2.

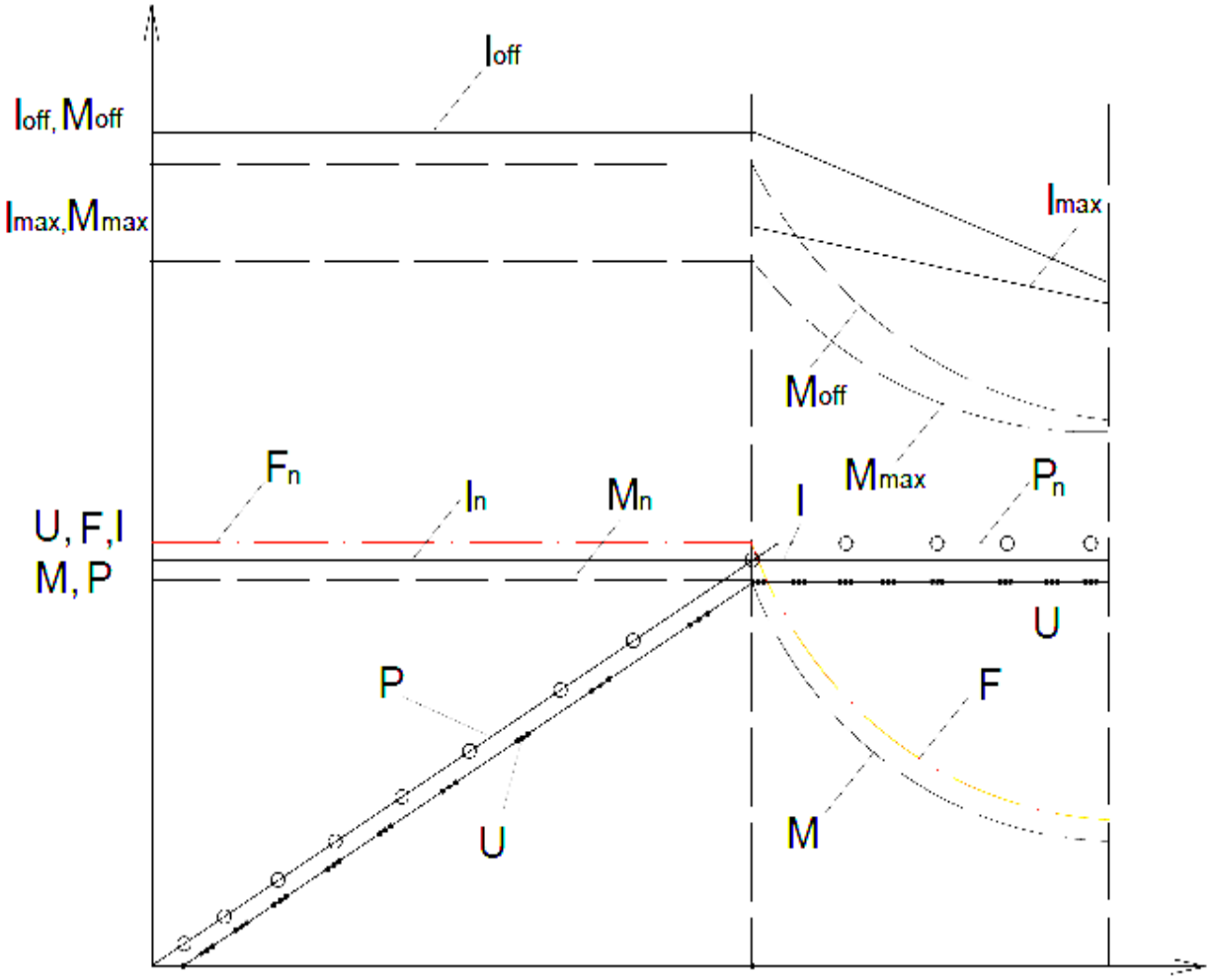


Рисунок 1.2 – Експлуатаційні характеристики прокатного електродвигуна

Регулювання швидкості від нуля до основної $\omega \le \omega_н$ здійснюється шляхом зміни напруги U, підводиться до якоря двигуна при номінальних значеннях струму $I_н$ і потоку двигуна $\Phi_н$, тобто при постійному моменті $M = k_м \cdot \Phi_н \cdot I_н$ та змінної потужності $P = M \cdot \omega$, пропорційної ω. При $\omega = \omega_н$ потужність $P = P_н$.

Регулювання швидкості вище номінальної виконується шляхом зменшення потоку двигуна $\Phi_н$ при постійній напрузі U,що підводиться до якоря, тобто при постійній потужності і змінному моменті $M = \frac{P}{\omega}$. При цьому зміна магнітного потоку визначається ставленням $\Phi = \frac{\Phi_н \cdot \omega_н}{\omega}$, а допустимий момент двигуна $M = \frac{M_н \cdot \omega_н}{\omega}$. Таким чином, допустимий момент двигуна і його магнітний потік при $\omega > \omega_н$ 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 $M_{\max} = \lambda \cdot M_н$, де λ - перевантажувальна здатність двигуна при $\omega \le \omega_н$.

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 $M_{\max} = \lambda \cdot M_н \omega_н / \omega$, де λ - допустиме перевантаження двигуна при $\omega > \omega_н$.

Під максимальними значеннями моменту вимкнення $M_{вим}$, 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 кутовий швидкості $\omega > \omega_н$ і на 25% – при кутовий швидкості $0 - \omega_н$.

1.3 Електропривід 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, блюмінги); четирехвалковие 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 прокочуються 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 канти і знову рольгангом направляється 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.

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 канти (повертається на 90 ° навколо своєї поздовжньої осі) з допомогою кантувача.

Захоплення і викид, смуги проводиться на знижених швидкостях. Швидкість захоплення $v_3 = 1{,}0 \div 1{,}75$ м/с ($n_3 = 15 \div 30$ об/хв); швидкість викиду

$v_B = 1{,}5 \div 2{,}0$ м/с ($n_з = 25 \div 40$ 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 *5-6* м/с *(100-120* об/хв*)*. Розгін і гальмування приводу здійснюються з металом у валках.

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

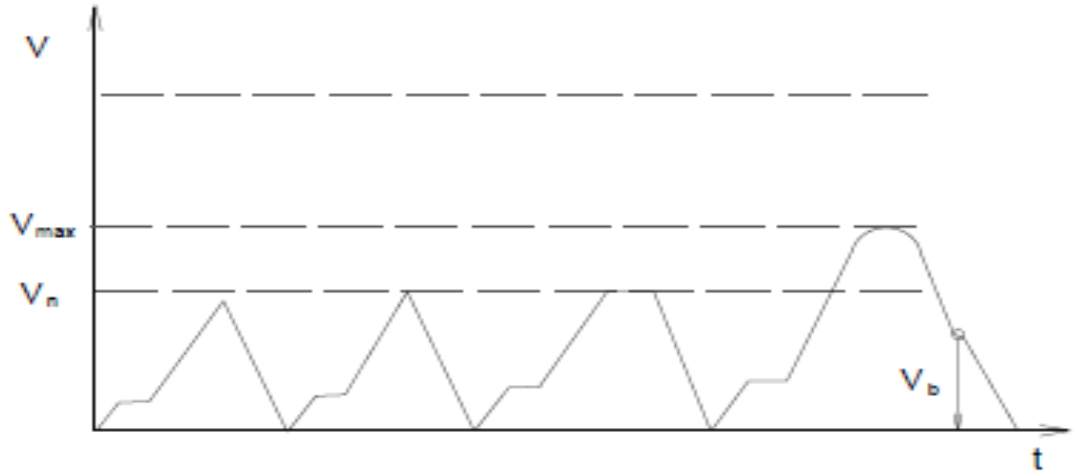


Рисунок 1.3 – Графіки швидкості прокату реверсивного стану

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 $V_н$. 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.

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:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2, \tag{1.2}$$

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:

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

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:

$$S_1 = \frac{v_1 - v_л}{v_л}. \tag{1.4}$$

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 шестеренної 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.

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.

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

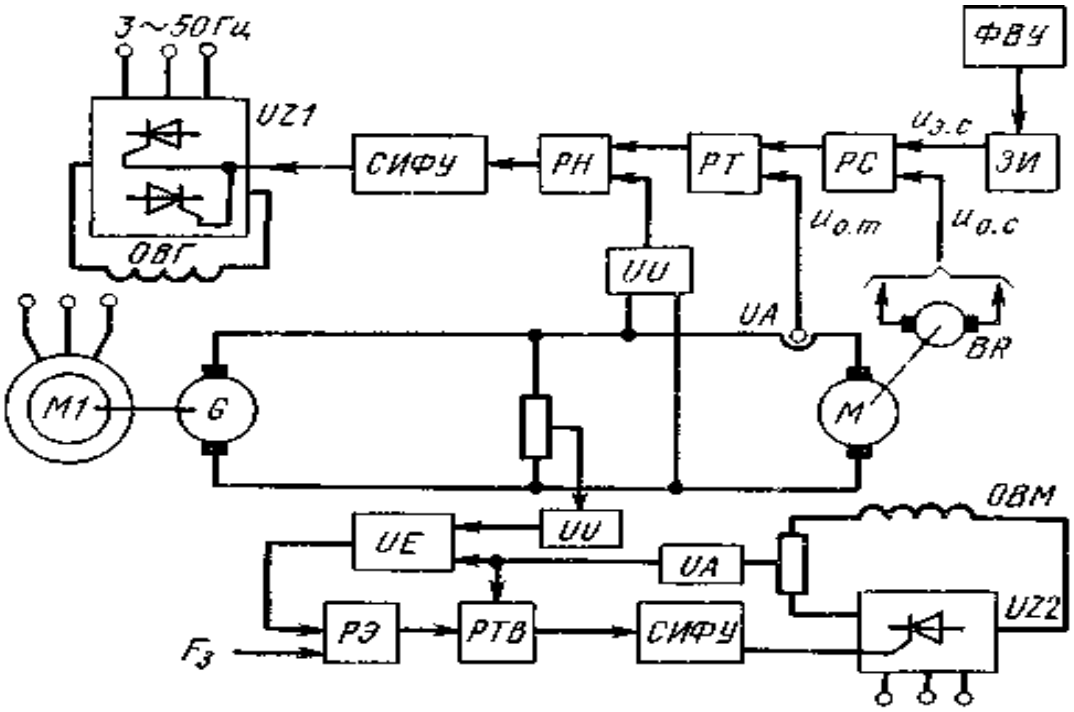


Рисунок 1.4 – Схема електроприводу реверсивного стану гарячої прокатки, виконаного за системою Г-Д

Двигун постійного струму М отримує живлення від електромашинного генератора С, який приводиться в обертання синхронним двигуном М1. Обмотка збудження ОВГ генератора підключена до реверсивному 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 двухзонне регулювання швидкості. Обмотка ОВМ отримує живлення від нереверсивного тиристорного перетворювача С/22. Як зазначалося, на сучасних реверсивних станах гарячої прокатки передбачається тиристорний електропривід 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 двухкомплектной 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 напряму обертання, виробляє оператор за допомогою педального сельсину командоаппарата 5,4. Темп розгону визначається задатчиком інтенсивності ЗИ, який ступінчастий сигнал, що надходить від 8А через фазовипрямляючий пристрій ФВУ, перетворює в лінійно 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 СО3 на вході регулятора швидкості РС порівнюється з сигналом з, пропорційним фактичної 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 значенням 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.

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 двоконтурної 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.

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.

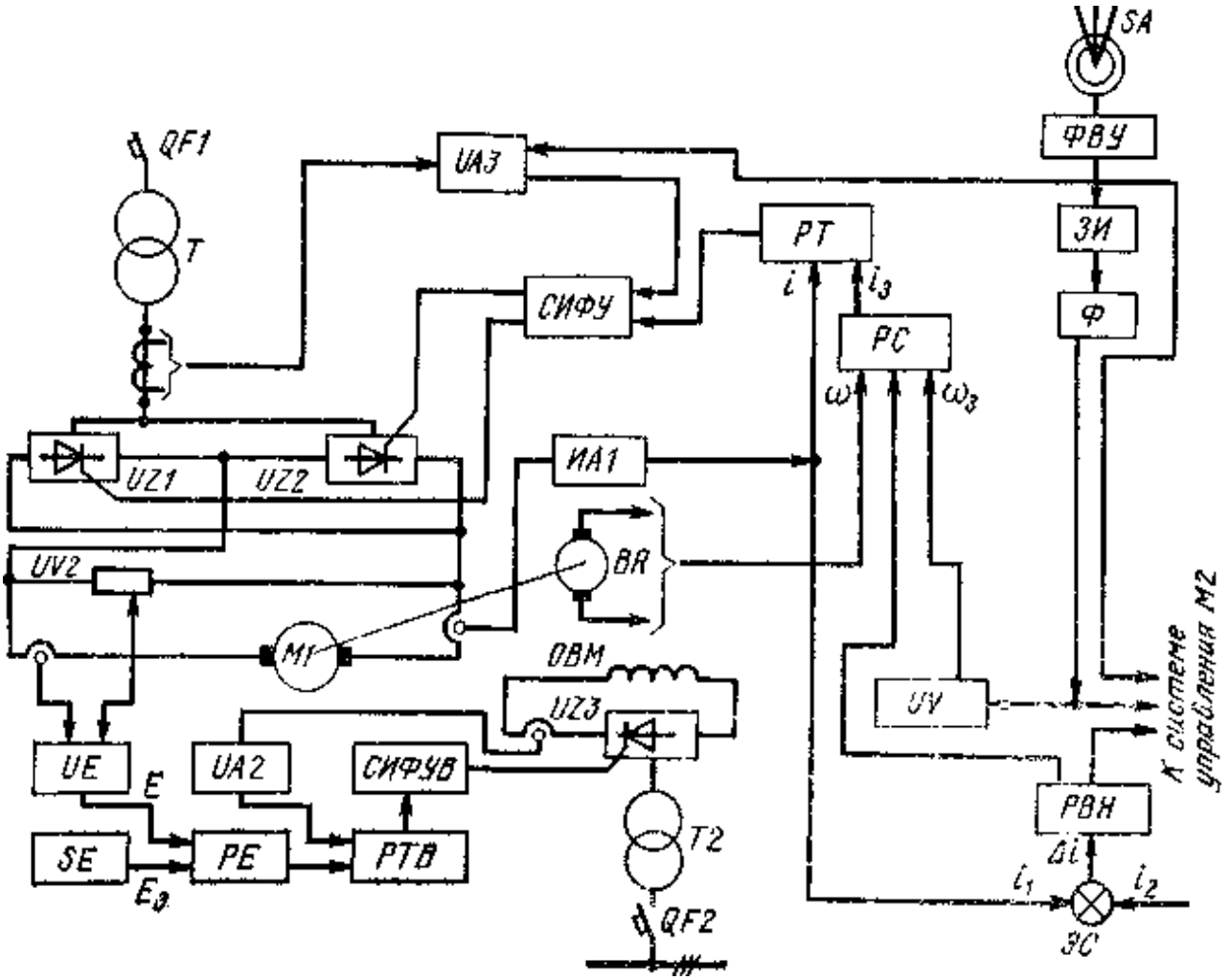


Рисунок 1.5 – Схема електроприводу реверсивного стану гарячої прокатки, виконана за системою ТП-Д

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

Ступінь ослаблення потоку двигуна буде визначатися величиною задає сигналу Е3. Зворотній зв'язок по ЕРС двигуна заснована 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.

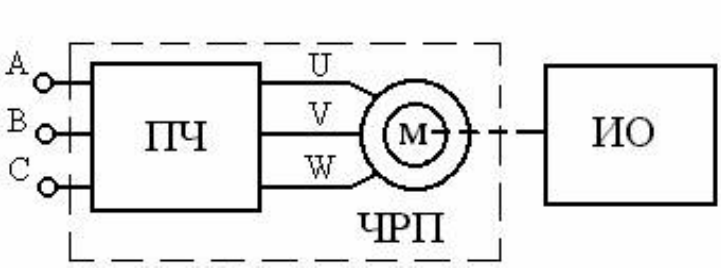
На вході регулятора РЕ порівнюються два сигнали: сигнал заданого значення протидії ЕРС Е3 і сигнал І; пропорційні і дійсного значення протидії ЕРС, що надходить від датчика НЕ. Вихідний сигнал РЕ є завданням для регулятора струму збудження. На вході РТВ він порівнюється з сигналом, пропорційним дійсного значення струму від датчика струму збудження 11А2. 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.

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 привід і включається аварійна сигналізація, показує, яка саме захист спрацював. Блокування забезпечують включення приводу тільки при зібраних ланцюгах захисту, потрібну послідовність включення приводу, а також різні технологічні блокування.

1.5 Сучасний частотно – регульований електропривід

Сучасний частотно-регульований електропривод складається з асинхронного або синхронного електричного двигуна та перетворювача частоти зображено на рисунку 1.6.



ПЧ – перетворювач частоти;

ИО – виконавчий орган;

ЧРП – частотно – регульваний привід

Рисунок 1.6 – Частотно регульований електропривід

Електричний двигун перетворює електричну енергію в механічну енергію і приводить у рух виконавчий орган технологічного механізму. Перетворювач частоти управляє електричним двигуном і являє собою

електронний статичний пристрій. На виході перетворювача формується електрична напруга зі змінними амплітудою і частотою. Назва «частотно регульований електропривід» обумовлено тим, що регулювання швидкості обертання двигуна здійснюється зміною частоти напруги живлення, що подається на двигун від перетворювача частоти.

Протягом останніх 10-15 років у світі спостерігається широке й успішне впровадження частотно регульованого електропривода для вирішення різних технологічних завдань в багато галузей економіки. Це пояснюється в першу чергу розробкою і створенням перетворювачів частоти на принципово новій елементній базі, головним чином на біполярних транзисторах з ізольованим затвором IGBT або запираючих тиристорах IGCT відповідно.

При подальших міркуваннях будемо говорити про трифазний частотно регульований електропривід, так як він має найбільше промислове застосування.

У асинхронному електричному двигуні частота обертання ротора n_2 в сталому режимі відрізняється від частоти обертання n_1 на величину ковзання S. Частота обертання магнітного поля n_1 залежить від частоти напруги живлення. При живленні обмотки статора електричного двигуна трифазною напругою із частотою f створюється обертове магнітне поле. Швидкість обертання цього поля визначається за відомою формулою:

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \tag{1.5}$$

де p - число пар полюсів статора.

Перехід від швидкості обертання поля ω_1, що вимірюється в радіанах, до частоти обертання n_1, вираженої в оборотах на хвилину, здійснюється за наступною формулою:

$$n_1 = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega, \tag{1.6}$$

де 60 - коефіцієнт перерахунку розмірності.

Підставивши в це рівняння швидкість обертання поля ω_1, отримаємо:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{\pi} \tag{1.7}$$

Таким чином, частота обертання ротора синхронного та асинхронного двигунів залежить від частоти напруги живлення.На цій залежності і заснований метод частотного регулювання. Змінюючи за допомогою перетворювача частоту на вході двигуна, ми регулюємо частоту обертання ротора. У найбільш поширеному частотно регульованому приводі на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором застосовуються скалярний і векторний частотне управління.

При скалярному управлінні з певним законом змінюють амплітуду і частоту прикладеної до двигуна напруги. Зміна частоти живлячої напруги призводить до відхилення від розрахункових значень максимального і пускового моментів двигуна, коефіцієнта корисної дії (ККД), коефіцієнта потужності. Тому для підтримки необхідних робочих характеристик двигуна необхідно зі зміною частоти одночасно відповідно змінювати і амплітуду напруги.

В частотно-регульованих асинхронних електроприводах с моментом навантаження при скалярному керуванні частіше всього підтримується постійним відношення максимального моменту двигуна до моменту опору на валу. Тобто при зміні частоти амплітуда напруги змінюється таким чином, що відношення максимального моменту двигуна до поточного моменту навантаження залишається незмінним. Це відношення називається перевантажувальна здатність двигуна. При постійної перевантажувальної здатності номінальні коефіцієнт потужності і ККД двигуна на всьому діапазоні регулювання частоти обертання практично не змінюються.

Максимальний момент, що розвивається двигуном, визначається такою залежністю:

$$M_{макс} = k\frac{U^2}{f^2}, \tag{1.8}$$

де k -постійний коефіцієнт.

Тому залежність напруги живлення від частоти визначається характером навантаження на валу електричного двигуна.

Для частотно-регульованих асинхронних електроприводів з постійним моментом навантаження підтримується відношення $\frac{U}{f} = const$, і, по суті, забезпечується сталість максимального моменту двигуна. Характер залежності напруги живлення від частоти для випадку з постійним моментом навантаження зображений на рисунку 1.7. Кут нахилу прямої на графіку залежить від величин моменту опору і максимального обертального моменту двигуна. Разом з тим на малих частотах, починаючи з деякого значення частоти, максимальний момент двигуна починає падати. Для компенсації цього і для збільшення пускового моменту використовується підвищення рівня напруги живлення.

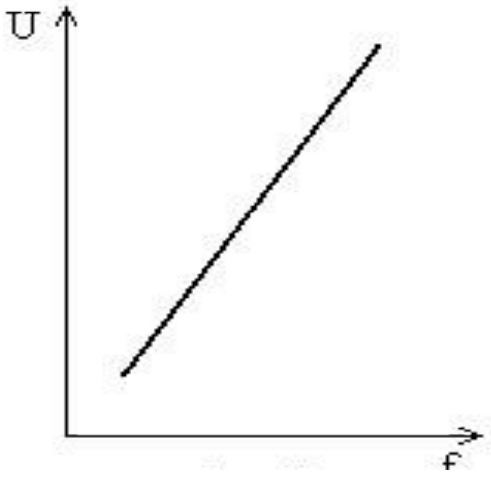


Рисунок 1.7 – Залежність $U(f)$ для динамічних частотно-регульованих електроприводів

Характер залежності напруги живлення від частоти для цього випадку показаний на рисунку 1.8. При регулюванні у сфері малих частот максимальний момент також зменшується, але для даного типу навантаження це некритично.

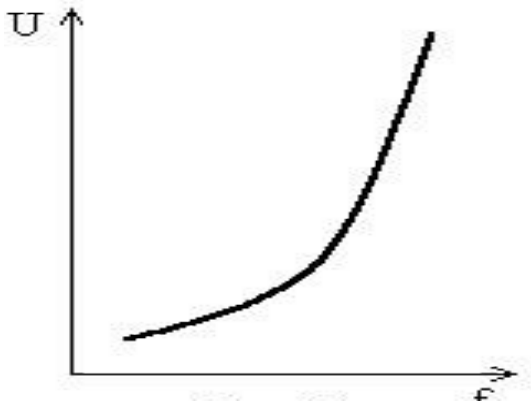


Рисунок 1.8 – Характер залежності напруги живлення від частоти, при вентиляторному моменті навантаження

Разом з тим на малих частотах, починаючи з деякого значення частоти, максимальний момент двигуна починає падати. Для компенсації цього і для збільшення пускового моменту використовується підвищення рівня напруги живлення.

Використовуючи залежність максимального обертового моменту від напруги і частоти, можна побудувати графік $f = U(f)$ для будь-якого типу навантаження.

Важливою перевагою скалярного методу є можливість одночасного управління групою електродвигунів. Скалярного управління досить для більшості практичних випадків застосування частотно-регульованого електроприводу з діапазоном регулювання частоти обертання двигуна до 1:40. Векторне управління дозволяє істотно збільшити діапазон управління, точність регулювання, підвищити швидкодію електроприводу. Цей метод забезпечує безпосереднє управління обертаючим моментом двигуна.

Обертаючий момент визначається струмом статора, який створює збудливу магнітне поле. При безпосередньому управлінні моментом необхідно змінювати, крім амплітуди і фазу статорної струму, тобто – вектор струму. Цим і обумовлений термін «векторне управління».

Для управління вектором струму, потрібно знати точне положення ротора двигуна в будь-який момент часу. Завдання вирішується або за допомогою виносного датчика положення ротора, або визначенням положення ротора шляхом обчислень за іншими параметрами двигуна. В якості цих параметрів використовуються струми і напруги статорних обмоток.

Менш дорогим є частотно регульований електропривод з векторним керуванням без датчика зворотного зв'язку швидкості, проте векторне управління при цьому вимагає великого об'єму і високій швидкості обчислень від перетворювача частоти. Крім того, для безпосереднього керування моментом при малих, близьких до нульових швидкостях обертання, робота частотно-регульованого електропривода без зворотного зв'язку по швидкості неможлива. Векторне управління з датчиком зворотного зв'язку швидкості забезпечує діапазон регулювання до 1:1000 і вище, точність регулювання за швидкістю – соті частки відсотка, точність по моменту – одиниці відсотків.

У синхронному частотно регульованому приводі застосовуються ті ж методи управління, що і в асинхронному. Однак у чистому вигляді частотне регулювання частоти обертання синхронних двигунів застосовується тільки при малих потужностях, коли навантажувальні моменти невеликі, і мала інерція приводного механізму.При великих потужностях цим умовам повністю відповідає лише привід з вентиляторної навантаженням. У випадках з іншими типами навантаження двигун може випасти з синхронізму.

Для синхронних електроприводів великої потужності застосовується метод частотного управління з самосинхронізації, який виключає випадання двигуна із синхронізму. Особливість методу полягає в тому, що управління перетворювачем частоти здійснюється в суворій відповідності з положенням ротора двигуна.

Можливості, що відкриваються при використанні перетворювача частоти в якості регулюючого пристрою для електроприводу, виконаного на асинхронному електродвигуні, безмежні. Однією з головних тенденцій розвитку сучасного електроприводу є використання його з метою заощадження енергетичних ресурсів та екології. Слід зазначити, що використання перетворювачів частоти для регульованого електроприводу створює свої переваги за рахунок автоматичної зміни параметрів системи в залежності від умови роботи часто змінюються, а межі змін достатньо широкі. Система регульованого електроприводу управляється мікроконтролером з досить солідним програмним забезпеченням, що дозволяє задавати параметри регулювання в залежності від необхідних умов роботи механізму. У зв'язку з цим розширюється область застосування регульованого електроприводу не тільки в сферах високих технологій, але й там, де до цього часу традиційно використовувався простий нерегульований електропривод з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. При цьому важливим стає підвищення енергетичної ефективності існуючих електроприводів, що дозволяють вирішувати технологічні завдання при мінімальних витратах.

Найбільш простий варіант використання ПЧ, коли одним перетворювачем управляється один електродвигун(наприклад електродвигун ліфта, верстата-качалки, димососа котла і т.д.). У даному випадку перетворювач підключається безпосередньо до одного електродвигуна і керує його роботою в залежності від заданих параметрів і одержуваної від датчиків інформації. При цьому ефект від роботи електроприводу визначається зниженням витрат електроенергії та підвищенням якості регульованого технологічного параметра, який частіше за все і визначає якість продукції. При такому варіанті використання ПЧ питома вартість перетворювача на 1 кВт потужності максимальна і рішення про встановлення ПЧ, як правило, приймається за необхідності регулювання технологічних параметрів, хоча розрахунки показують, що складова економії електроенергії часто дозволяє окупити витрати на установку ПЧ менш ніж за один рік і далі приносити

чистий економію. Якщо на об'єкті розташовано кілька електроприводів, що працюють у взаємопов'язаному режимі, то доцільно розглянути установку перетворювача в комплексі з системою управління електроприводів - так звану станцію управління електроприводами. Типова станція управління (СУ) включає в себе:

- шафа управління, в якому розміщуються комутаційна апаратура, частотний перетворювач, додатковий програмований логічний контролер (при необхідності вирішувати складні завдання управління), апаратура захистів та сигналізації;

- датчики контрольованих параметрів і виконавчі механізми системи управління.

Типовим прикладом такого варіанту використання ПЧ є станція управління групою насосів, коли діапазон регулювання по витраті змінюється в широких межах. В залежності від витрати, працює один, два або три насоси, які забезпечують заданий рівень тиску. Використовуючи наявні резервні потужності вбудованого в перетворювач частоти мікроконтролера засобами програмного забезпечення в станціях управління реалізована можливість управління групою електродвигунів на два або три насоси.

1.6 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), в 2009 році 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 силової 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 від 250 до 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 у період з 1999 по 2008 рік введені більше 300 частотно-регульованих асинхронних електроприводів потужністю від 630 до 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 ВПЛ. 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 вихідний 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 ВПЛ. 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 ВПЛ 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 ВПЛ 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 російським споживачам ВПЛ і прагнуть забезпечити свою присутність на українському ринку, визначають доцільність проведення аналізу їх продукції і в першу чергу застосовуються автономних інверторів. Адже в переважній більшості випадків вони повинні сполучатися з серійними асинхронними двигунами російського або 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 важливим, і його потрібно враховувати при виборі типу інвертора і відповідно ВПЛ для стандартних високовольтних асинхронних двигунів, які мають обмежені запаси за ізоляційної міцності. У системі «ВПЛ-асинхронний двигун» можна використовувати будь-який стандартний двигун, але необхідно враховувати зниження допустимого моменту внаслідок додаткових втрат через вищих гармонік в струмі автономного інвертора і погіршення умов охолодження самовентильованих двигунів при роботі в діапазоні регулювання частоти обертання.

Це обмеження не настільки критично для частотно-регульованих електроприводів турбомеханизмов 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 квазисинусоидальної форми струму в асинхронному двигуні з сумарними нелінійними спотвореннями (total harmonic distortion)менше $5-6\%$. Хоча коло раціональних технічних рішень і схем ВПЛ 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 надає поява на ринку нових компонентів. 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 ВПЛ 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 ВПЛ можна звести до наступних принциповим рішенням:

- виконання АІН з трьома рівнями напруги (3-level) та комутацією в «зірку» (з фіксованою нульовою точкою або фіксованого 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 ВПЛ, 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 1.9 розроблена під ВНІІЕ більше 20 років тому і є базовою для ВПЛ серії ЕТВА, застосовуваних у частотно-регульованих електроприводах потужністю 630-5000 кВт, напругою 6000 і 10000 В. Промислове виробництво таких перетворювачів було освоєно Таллінським електротехнічним заводом (нині фірма ESTEL).Основне обмеження цього інвертора - комутаційні піки в вихідній напрузі і щодо великий вміст вищих гармонік в інвертованих струмі й напрузі.

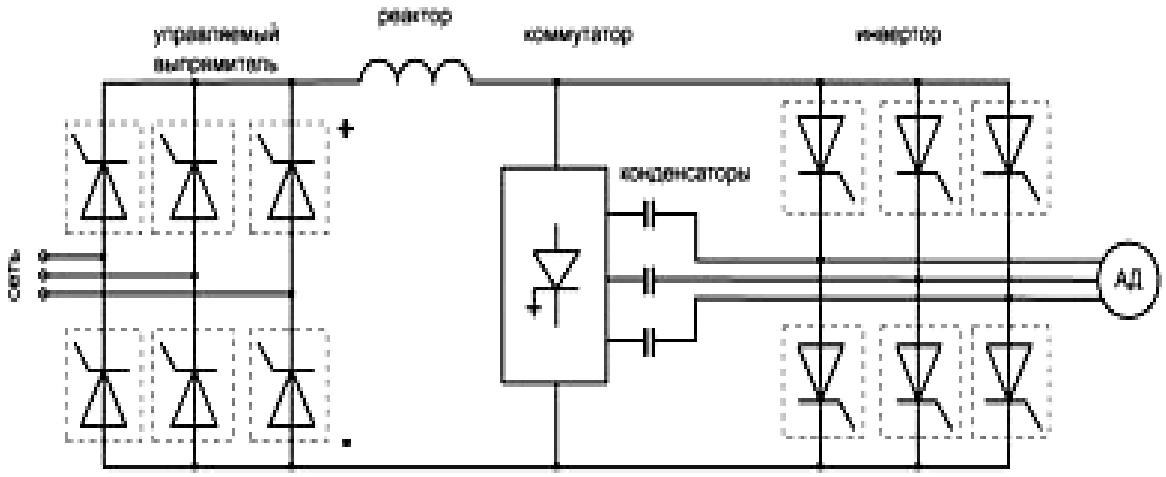


Рисунок 1.9 – Схема ВПЛ на основі автономного інвертора струму

Осцилограма на рисунку 1.10,що знята на електроприводі ЕТВА живильного насоса ТЕС, ілюструє форми струму в фазі і лінійної напруги статора асинхронного двигуна при частоті порядку 32 Гц. 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 $U_{ном}$.

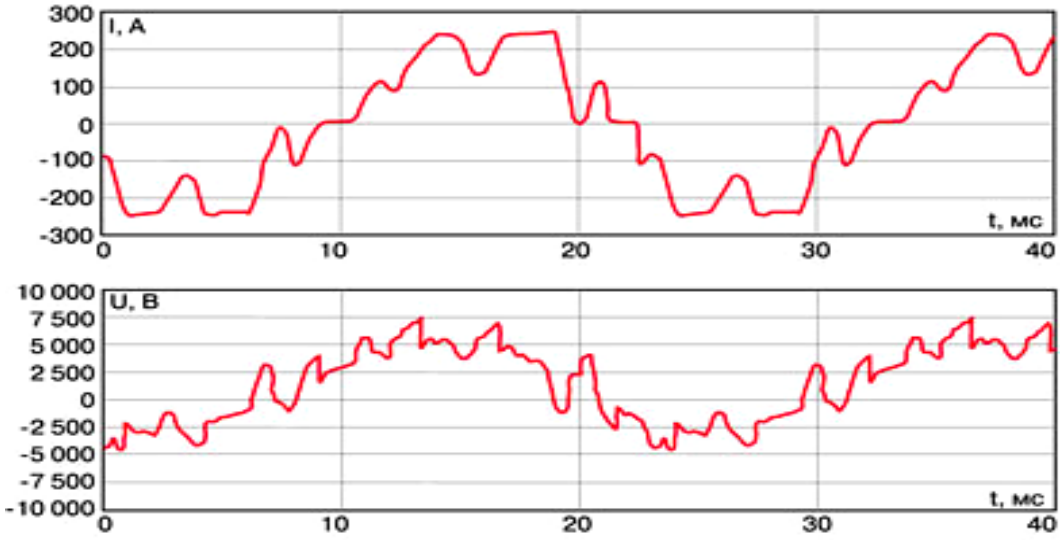


Рисунок 1.10 – Форми статорного струму та напруги двигуна при живленні АІС

Таблиця 1.2 – Гармонічний склад інвертуемого струму і напруги для електроприводу з АІС з 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 1.11 була запропонована фірмою Ross Hill (США). Такі перетворювачі випускалися також компаніями „Hill Gracham”, Англія (типу „Imvar”) і „Ansaldo”, Італія (типу „Silcovert H”). 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 1.12 знята при номінальному навантаженні електроприводу 1570 кВт, 3300 В).

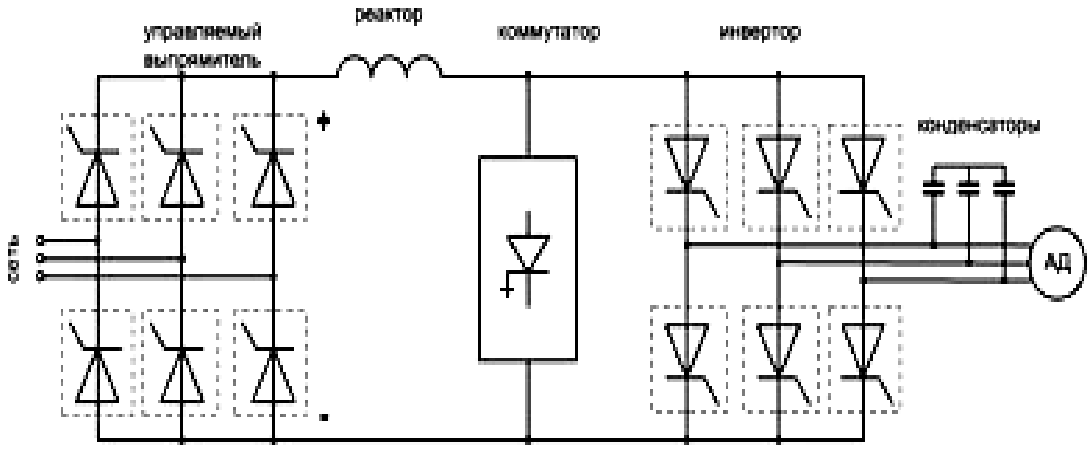


Рисунок 1.11 – Силова схема ЧП на основі АІС фірми Ross Hill(США)

Гармонійний склад струму і напруги для зазначених вище умов наведено в таблиця 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.

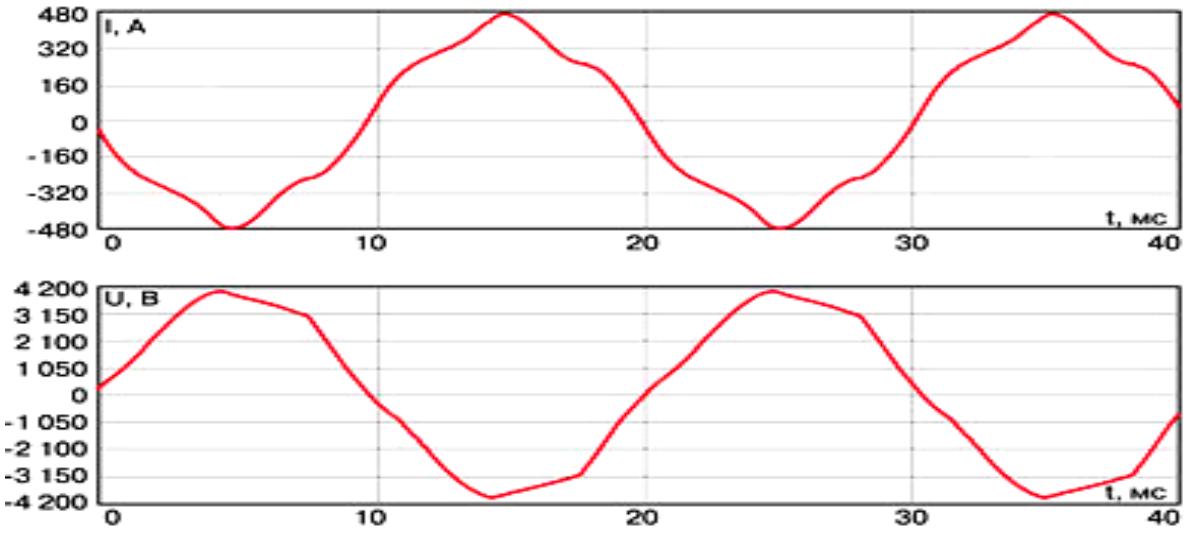


Рисунок 1.12 – Форми статорного струму та напруги двигуна в електроприводі фірми Ross Hill

Таблиця 1.3 – Гармонічний 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).

Комутатор забезпечує режим «Multi-swith» (переривання струму) від пускових частот аж до частоти 20-25 Гц, закороруючи 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-swith» 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 ВПЛ 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 (Ю. Корея).

На рисунку 1.13 наведена типова схема ВПЛ на основі АІТ з ШІМ. Інші схеми відрізняються тільки схемою керованого випрямляча.

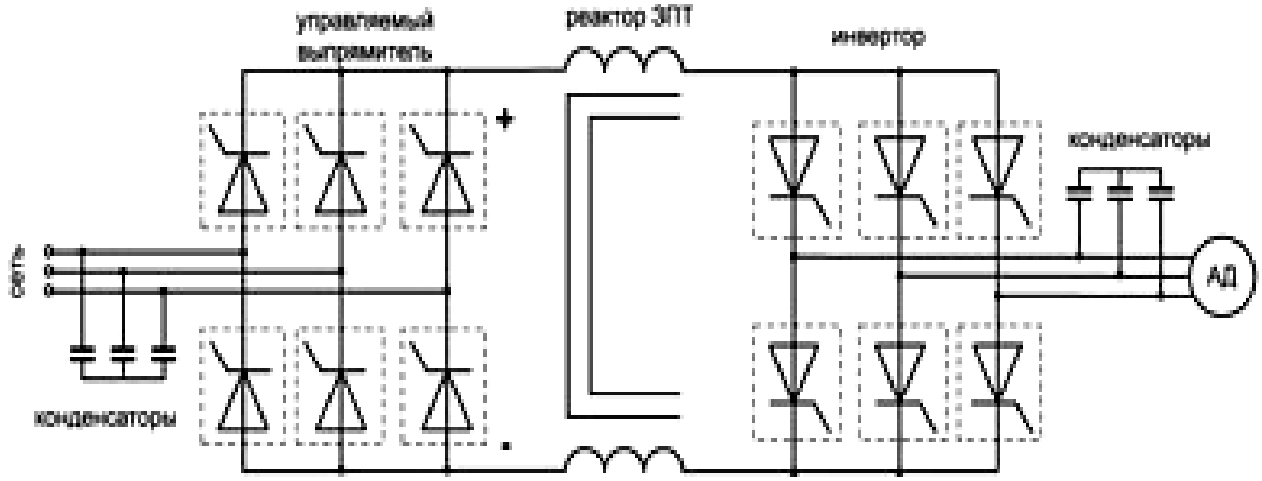


Рисунок 1.13 – Силова схема ЧП на основі АІС з ШІМ

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 квазисинусоидального 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 інвертіртуючих струму і напруги двигуна до синусоїдальної і добитися значення THD менше $5-6\%$.

Осцилограма на рисунку 1.14 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”.

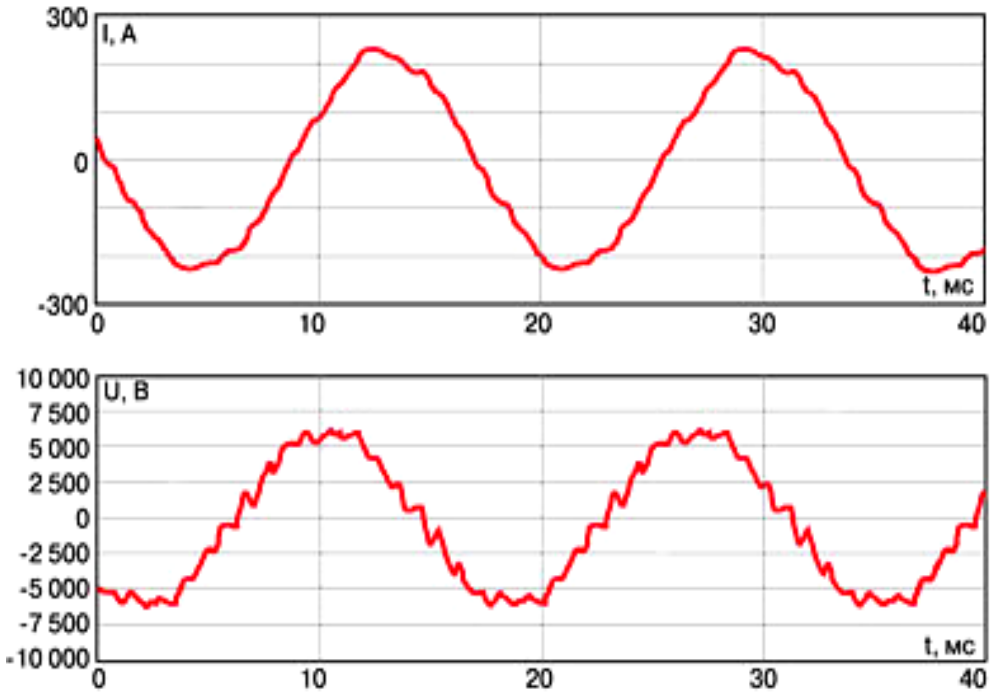


Рисунок 1.14 – Форми статорного струму та напруги двигуна в електроприводі фірми “Allen-Bradley”

Номенклатура силових повністю керованих напівпровідникових приладів, що застосовуються в автономних інверторах напруги сучасних ВПЛ, 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 „Simovert 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 ВПЛ 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 1.15.

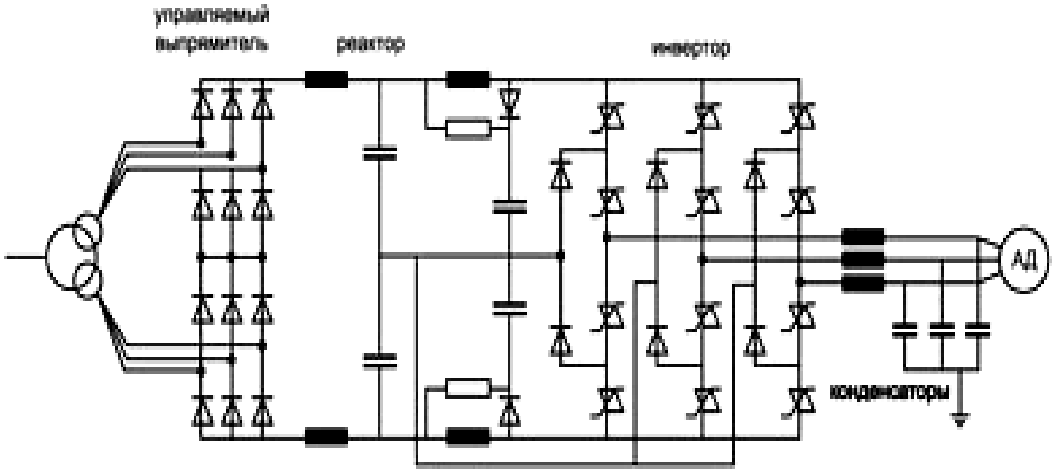


Рисунок 1.15 – Силова схема трирівневого АІН (по топології NPC) з ШІМ на IGCT

На рисунку 1.16 показані осцилограми напруги і струму такого АІН при навантаженні на асинхронний двигун потужністю 800 кВт, 3300 В. На виході АІН встановлений синусоїдальний (LC) фільтр.

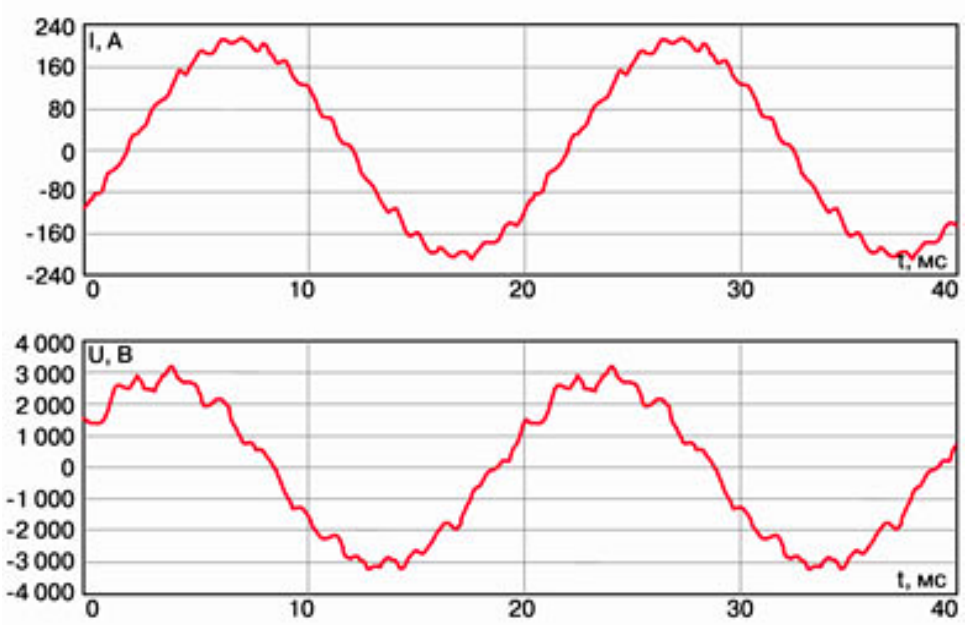


Рисунок 1.16 – Форми статорного струму та напруги в трирівневим АІН з ШІМ

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 напрузі 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).

Цікаве рішення для створення ВПЛ 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 1.17. Інвертори ВПЛ типу „ALSPAVDM 6000" фірми „Alstom" виконані на IGBT, а інвертори ВПЛ фірми „Innovation Medium GE" виконані на IGCT.

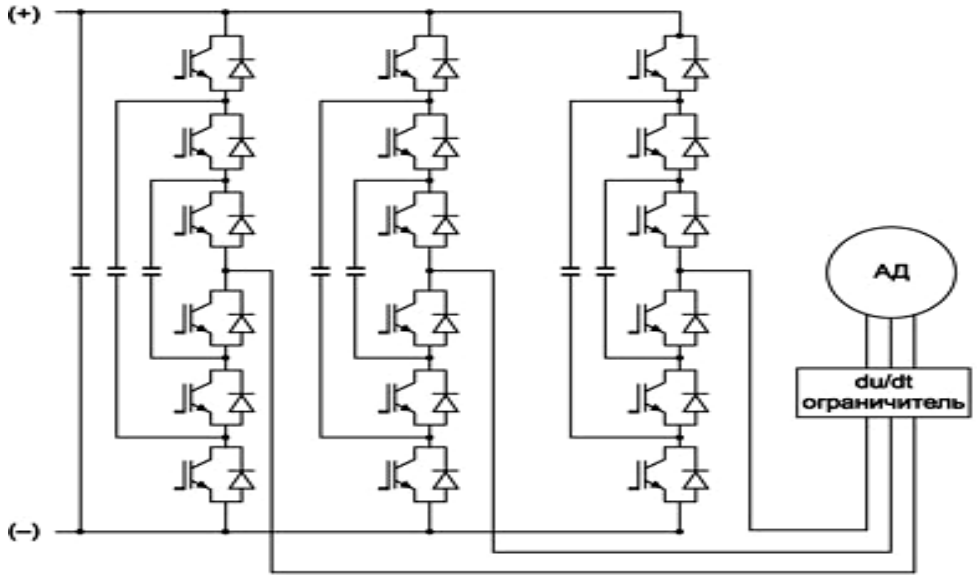


Рисунок 1.17 – Силова схема чьотирирівневого АІН

Як видно з осцилограм на рисунку 1.18, форма вихідного струму чотирирівневого ШІМ-інвертора практично синусоїдальна, а вихідна напруга за рахунок більшої кількості сходинок має огибаючу, близьку до синусоїди форму. Однак, як правило, і в цьому випадку бажана установка (правда, кілька полегшеного) LC-фільтра.

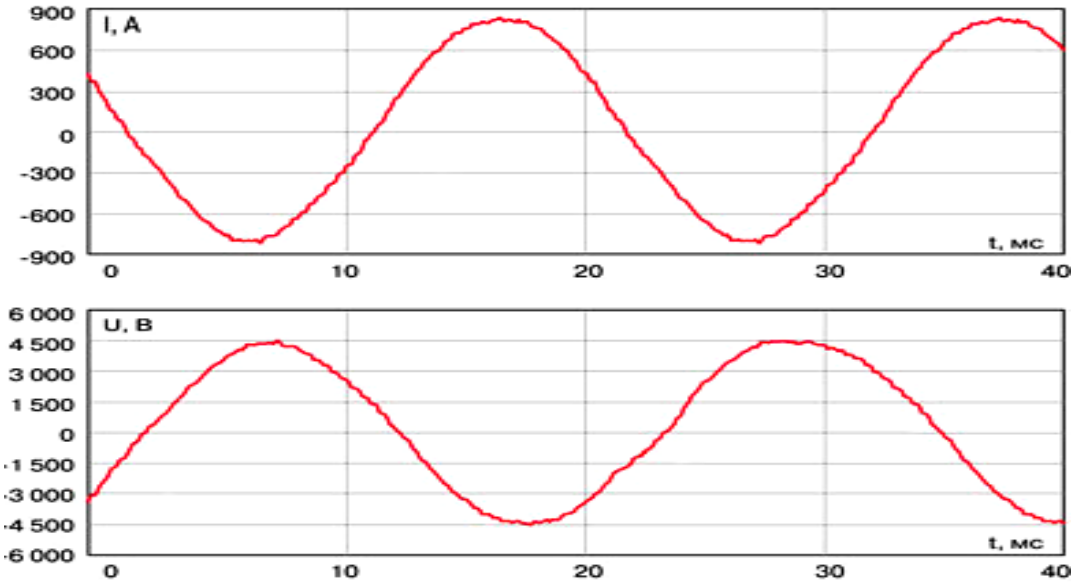


Рисунок 1.18 – Форми статорного струму та напруги двигуна при живленні від чотирирівневого АІН

Наступним кроком у поліпшенні форми вихідної напруги АІН, а отже, і умов електромагнітної сумісності з асинхронними двигунами, є виконання їх багаторівневими (multi-level). ВПЛ з такими АІН в різних модифікаціях випускають фірми „Robicon”, „Toshiba”, „Mitsubishi Electric”, „GE”. На рисунку 1.19 наведена принципова схема перетворювача частоти з багаторівневим АІН. Завдяки практично синусоїдальної формі вихідного напруги, що зображена на на рисунку 1.20, такі ВПЛ поєднуються зі стандартними загальнопромисловим асинхронними двигунами без установки спеціальних фільтрів на виході, що дозволяє використовувати двигуни практично без розвантаження. Найбільш складним елементом ВПЛ 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 шостий обмотками групи - 50 ел. градусів.

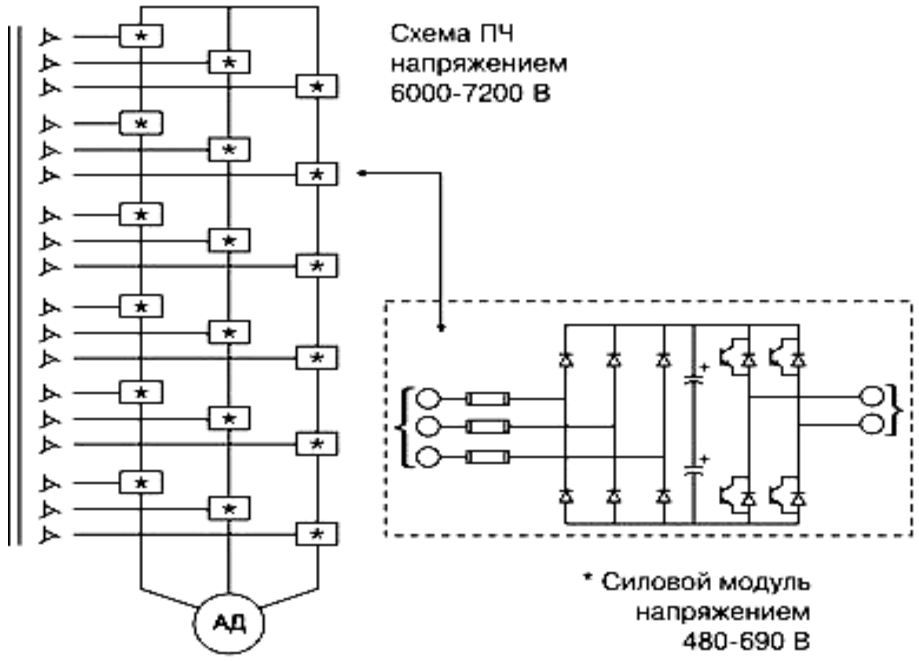


Рисунок 1.19 – Силова схема перетворювача частоти з багаторівневим АІН

Кожна обмотка трансформатора підключена до силового модулю - осередку Power-Cell, що складається, як показано на рисунку 1.19, з діодного випрямляча та однофазного IGBT-АІН з ШІМ.

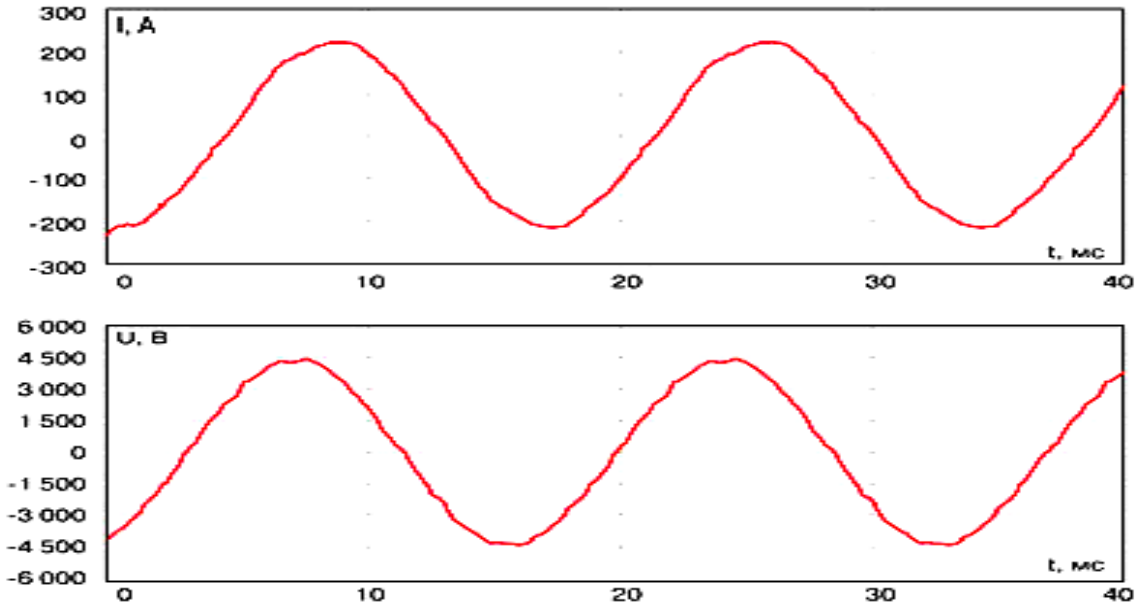


Рисунок 1.20 – Форми статорного струму та напруги двигуна в електроприводі з багаторівневим АІН

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

Конструктивна особливість ВПЛ з багаторівневою вихідною напругою - нероз'ємність конструкції, тобто відокремити перетворювальну частину від трансформатора неможливо. Друга особливість таких ВПЛ - 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" на потужністю 2400-3600 кВА ,напругою 6,6 кВ має габарити 7800х2400х1000 мм, а масу – 13400 кг. Для порівняння: перетворювач типу „Power Flex 7000" на потужністю 2750 кВА має розміри 3300х2643х1000 мм, а масу – близько 11000 кг. Габарити вхідного четириобмоточного трансформатора для 18-фазного випрямляча перетворювача Power Flex 7000 – 3048х3048х1829 мм.

2 ЕЛЕКТРОПРИВІД ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКІВ «СЛЯБИНГ 1150» ПРАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

2.1 Об’єкт дослідження

Слябінг встановлений в 1937 р., відновлений у 1947 р. Стан призначений для прокатки перероблених та товарних слябів. Обладнання стана розташоване в семи прольотах, що зображено на рисунку 2.1.

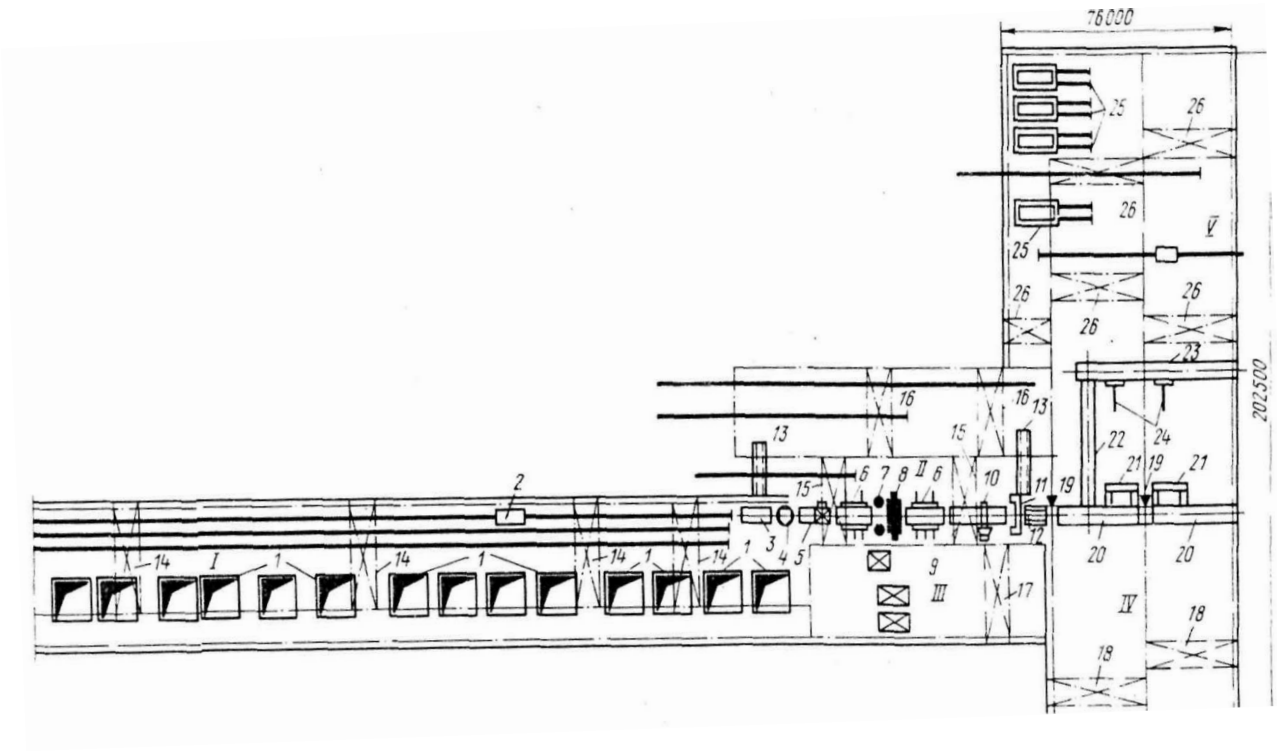


Рисунок 2.1 – Кінематична схема стану Слябінг-1150

У проліт нагрівальних колодязів злитки надходять безпосередньо з мартенівського цеху, зі складу злитків мартенівського цеху, зі складу злитків обтискного цеху і заводу «Дніпроспецсталь». Злитки подаються в основному в гарячому стані і поплавочно. Середня температура злитків 900 ° С.

Холодні злитки зі складів мартенівського і обтискового цехів подаються на візках. Склад для холодних зливків відкритого типу обслуговують два мостових 30/5-т крана.

Злитки з нержавіючих і спеціальних сталей перед нагріванням піддаються вогневої зачистки (крім зливків з усіх сталей ЕШП).

Проліт нагрівальних колодязів обслуговують чотири кліщових мостових 20/15-т крана і слітковоз. Вантажопідйомність злитковоза 20 т, швидкість руху 3-6 м / с. У цеху 14 груп регенеративних нагрівальних колодязів. Групи 1-11, 13 і 14 складаються з чотирьох комірок.

Для зручності розміщення плавок і видалення рідкого шлаку осередку зблоковані за схемою 2-2 або 3-1, вони працюють за єдиним тепловим і тяговим режимом і призначені для нагріву вуглецевих і низьколегованих сталей.

Група 12 з сухим шлаковидаленням складається з шести автономних осередків і призначена для нагріву зливків з нержавіючих і спеціальних сталей.

Кожна група колодязів має індивідуальні газо-і повітропроводи. Їх харчування здійснюється від одного газового і трьох повітряних колекторів. Колодязі опалюються доменним газом, збагаченим природним газом з теплотою згоряння 3770-3980 кДж/м^3. Кожна комірка обладнана системою теплового контролю і автоматичного регулювання. За режимом нагрівання марки стали діляться на сім груп.

Нагріті злитки подаються злитковозом на приймальний рольганг.

Стан двоклітьовий : кліть з вертикальними валками розташована перед кліттю з горизонтальними валками. Відстань між осями горизонтальних і вертикальних валків – 2250 мм. Станини клітей закритого типу.

Кліть горизонтальних валків реверсивна. Діаметр валків 1150 - 1100 мм, довжина бочки 2000 мм. Привід індивідуальний від 7,2 МВт електродвигуна через шпиндель без шестеренної кліті. Розчин валків 80-900 мм, швидкість підйому валків 150 мм / с. Швидкість обертання валків регулюється в межах ± 0,53-80 об/хв.. Валки встановлені в підшипниках ковзання.

Довжина бочки вертикальних валків 1150 мм, діаметр – 700-680 мм. Привід від загального 2,2 МВт реверсивного електродвигуна через конічно-циліндричний редуктор з передаточним числом 1,52. Розчин валків 1800 - 720

мм, швидкість переміщення валків 64,8 мм/с. Швидкість обертання валків регулюється в межах ± 0-66,0-132,0 об/хв., підшипники кочення.

Матеріал всіх валків – сталь 50 або сталь 55. Матеріал всіх підшипників – текстоліт. Стан обладнаний маніпулятором і кантувателем. Максимальний розчин лінійок 1800 мм, робочий хід 1500 мм, довжина лінійок перед і за станом по 8 м. Швидкість підйому гаків кантувача 1,05 м /с. У головній частині стану встановлені приймальний рольганг зі стаціонарним перекидачем і поворотним столом. Окружна швидкість роликів рольганга 1,5 м/с. Час перекидання 5-6 с. Число оборотів поворотного столу 2-6 об/хв..

Перевалка кліті здійснюється після прокатки 300-350 тис. Т металу за всадив. Валки в процесі роботи охолоджуються водою під тиском ≥ 0,2 Мпа. Розподіл обтиснень здійснюється окремо для кожного типу злитку певної групи стали. Для виробництва слябів розроблено 50 режимів обтиснень: 25 для вуглецевих і нестаріючих сталей і 25 – для спеціальних.

Зачищений сляб таврується на спеціальній машині і подається 1-м транспортним рольгангом зі швидкістю 1,75 м/с до ножиць гарячого різання кривошипно-шатунним закритого типу з верхнім резом. Хід ножа 340 мм, максимальне зусилля різу 20 МН. Максимальний перетин розрізаючої смуги 200Х1500 мм. Обрізані кінці прибираються конвеєром.

Розрізані сляби подаються відводить рольгангом до штабелювальні пристроїв і прибираються шістьма 20/5-т мостовими кранами.

Оздоблення слябів з усіх передільних нержавіючих сталей полягає в правці, строжці, абразивної зачистки і частково термічній обробці. Сляби з вуглецевої, трансформаторній і високоміцної легованої сталей правлять на гідравлічному 12-МН пресі, встановленому у відділенні зачистки слябів. Для зачищення й строжки передільних нержавіючих слябів є п’ять ручних наждакових точив і 28 поздовжньо-стругальних верстатів. Проліт зачистки слябів обслуговують три 15/3-т мостових крана.

У таблиці 2.1 наведено приблизний режим обтиснень при прокатці на стані.

Таблиця 2.1 – Режим обтиснень прокатки сляба перетину 200 х (950 ÷ 1050) мм із злитка типу Х вуглецевої спокійної сталі перетином 640х1100 мм

Прохід	Горизонтальна кліть			Вертикальна кліть	
	ΔH, мм	H	ΔB, мм	ΔH, мм	B, мм
1	120	520	15	60	1040
2	50	470	10	25	1040
3	55	415	49	25	1015
4	50	365	12	61	1015
5	55	310	50	25	990
6	50	260	12	62	990
7	50	210	50	30	960
8	5	205	1	52	960
9	0	205	0	0	960

Термічну обробку слябів ведуть в чотирьох термічних печах довжиною 10 м, шириною 4 м з висувним подом; маса садки 100-200 т.

Робоча кліть – служить для прокатки зливків в гуркіт.

Робоча кліть складається з наступних механізмів і систем:

- кліть горизонтальних валків;
- натискне влаштування горизонтальних валків;
- врівноваження верхнього горизонтального валка;
- кліть вертикальних валків;
- шпиндельні пристрою горизонтальних і вертикальних валків;
- натискний пристрій вертикальних валків;
- гідравлічна система врівноваження;
- швидкість прокатки 2,59 м/с;

Кліть горизонтальних валків складається з двох вертикальних станин, з’єдніаних між собою траверзу;над верхньою траверсою на станинах варто привід натискного пристрою горизонтальних валків;кліть реверсивна з

діаметром валків 1150 - 1100 мм, довжина бочки валка 2000 мм, діаметр шийок валка 720 мм, валки виготовлені із сталі 55 з подальшою наплавленням бочки валка порошковим дротом.

Привід кожного горизонтального валка здійснюється двигунами типу МП-9000 $P_н$ = 7200 кВт, n = 0÷50 об/хв.; розчин валків 80-900 мм, швидкість підйому верхнього горизонтального валка 150.

Наживний прилад влаштування горизонтальних валів (НПГВ) – служить для регулювання розчину горизонтальних валків; зовнішній діаметр натискного гвинта 480 мм, крок 48 мм, кількість гвинтів – 2 шт., Гайки бронзові в металевому корпусі для охолодження водою.

Привід натискних гвинтів здійснюється від двох електродвигунів типу ПВ 129 – 8К, $P_н$ = 360 кВт, n = 920 об/хв. через циліндричний редуктор. Передбачена роздільна робота електродвигунів для усунення перекосу верхнього горизонтального валка, для цього служить обтискна шестерня, яка синхронізує роботу обох натискних гвинтів, шестерня виводиться і вводиться в зачеплення за допомогою циліндра.

Зрівноважування верхнього горизонтального валка – гідравлічне – служить для постійного притиснення подушок верхнього валка до п’яти натискних гвинтів, а гвинтів до гайок, діаметр циліндра 410 мм, кількість –

1 шт. Підшипники горизонтальних валків текстолітові, мастило підшипників вода ; витрата води 100 - 120 м^3, тиск 2 - 3 атм., вода фільтрована.

Для вказівки розчину між валками служить механізм аретира. Величина розчину між валками через кінематичну ланцюжок редукторів вказується на циферблаті, який розбитий на 10 великих і 10 дрібних поділок, ціна одного ділення 1 мм. Один оборот великої стрілки дорівнює 100 мм, малої стрілки 1000 мм розчину валків. Для приведення стрілок циферблату у відповідність з істинним розчином валків служить планетарний механізм з електродвигуном ПН – 2,5, $P_н$ = 0,7 кВт, n = 2870 об/хв.

Кліть вертикальних валків – складається з двох вертикальних станин, з’єднаних між собою траверзу і траверзу зі станиною горизонтальних валків, а

також редуктором приводу вертикальних валків;привід вертикальних валків має електродвигун $P_н$ = 2200 кВт, редуктор з конічною-циліндричними передачами перший швидкості, другій скорості і вузлів з лопатами.

Шпиндельні пристрою горизонтальних валків служать для передачі обертового моменту від електродвигуна до горизонтальних валянням і має верхній і нижній шпинделя. Нижній шпиндель встановлений на пружинних стійках. Обидва шпинделя спираються на підшипники ковзання з бабітовою заливкою. Шпиндельні пристрої мають габаритні розміри: довжина 10600 мм, ширина 3700 мм, висота 4920 мм, загальна вага 152631 кг, вага одного шпинделя 39230 кг, вага стійки 22470 кг, довжина шпинделів по осях шарнірів 9700 мм, шарніри бронзові, диметр шийок про опорах – 620 мм, швидкість підйому 150 мм/хв, тиск у гідросистемі 75 кг/см^2, максимальний хід циліндра плунжера врівноваження верхнього шпинделя 310, діаметр плунжера 250 мм.

Шпиндельні влаштування вертикальних валків служать для передачі обертового моменту від валів з лопастями до вертикальних валянням; дозволений кут нахилу до 7º10´.

Вертикальні валки мають діаметр 700 - 800 мм, довжину бочки 1150 мм, розчин валків 720 - 1800 мм.

Нажимное пристрій вертикальних валків служить для переміщення вертикальних валків; мають на кожен валок за два гвинти, діаметр гвинтів

320 мм, крок гвинта 24 мм, максимальна швидкість переміщення гвинта 64,8 мм/с, врівноваження вертикальних валків для притиснення їх до гвинтів – гідравлічне, діаметр циліндра 200 мм – 2 шт., Діаметр плунжера для підвішування вертикальних шпинделів 190 мм, гвинти наводяться у обертання редуктором на кожен валок; відстань між валками контролюється механізмом покажчика розчину валків.

На рисунку 2.2. зображено часові діаграми роботи електроприводу вертикальних валків прокатного стану обтискного цеху ВАТ «Запоріжсталь» за один цикл роботи,що триває 10 с.

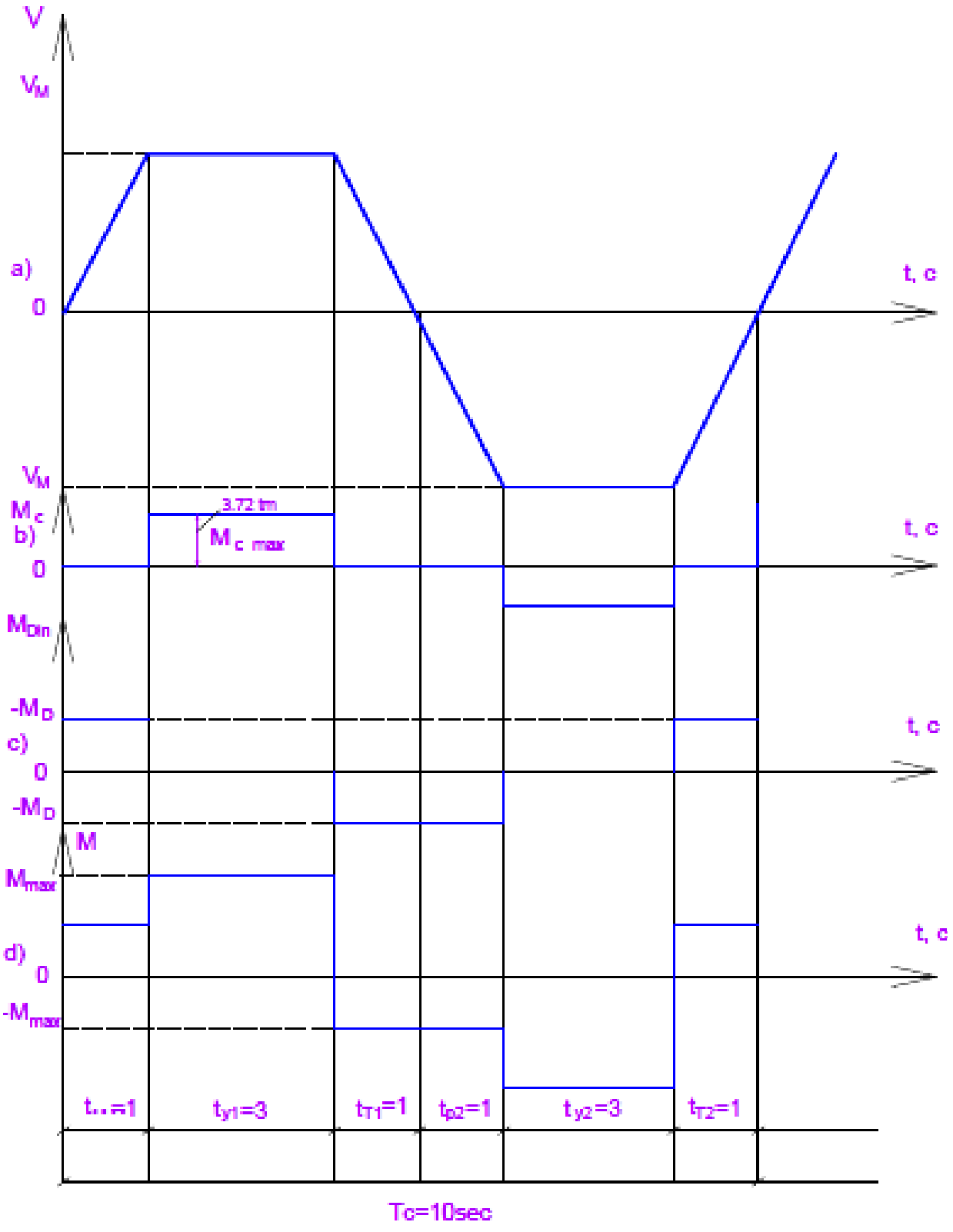


Рисунок 2.2 – Часові діаграми роботи електроприводу вертикальних валків прокатного стану обтискного цеху ВАТ «Запоріжсталь»

2.2 Розрахунок електромеханічних процесів в базовому варіанті електроприводу

В основі розрахунку використовується найбільш напружений режим роботи електропривода вертикальних валків обжимного стану, що проілюстрований діаграмамми зміни швидкості і моменту опору, які представлені на рисунку 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні данні одного з чотирьох двигунів

Назва величини	Фізична величина	Розмірність
Номінальна корисна 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 данні:

- $V_т = 2{,}59$ м/с.
- $M_с =$ 3,72 т·м або 36,7 кН·м.
- $t_{р.г} = 1$ с .
- $t_{ст} = 3$ с.
- $M_{ном} = 3{,}86 \cdot 9{,}8 = 37{,}8$ кН·м.
- $\omega_м = \dfrac{2 \cdot V_{см} \cdot t_р}{D_{см}} = \dfrac{2 \cdot 2{,}59 \cdot 3{,}75}{0{,}7} = 27{,}75$ рад/с.
- $n_м = \omega_м \cdot 9{,}55 = 265$ об/хв.
- $M_д = j_\Sigma \cdot \dfrac{d\omega}{dt} = 1110 \cdot \dfrac{27{,}75}{1c} = 30{,}8$ кН·м.

- $M = M_c + M_д$.

Перевірка за моментом:

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

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

$$36{,}4 \le 2 \cdot 37{,}8 \cdot 2{,}24,$$

$$36{,}4 \le 169{,}344.$$

Розрахунок втрат потужності

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

$$\Delta P_{дв.ст.} = \Delta P_{я.ст} + \Delta P_{об.зб.}, \tag{2.1}$$

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

$$\Delta P_{я.ст} = R_я \cdot I_{ст}^2, \tag{2.2}$$

де $R_я = 0{,}01743$ Ом – опір обмотки якорю двигуна;

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

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

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

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

$$\Delta P_{дв.р.г.} = \Delta P_{я.р.г..} + \Delta P_{об.зб.}, \quad (2.3)$$

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

$$\Delta P_{я.р.г.} = R_{я} \cdot I^2_{р.г}, \quad (2.4)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\Delta P_{ТПст} = R_d \cdot I^2_{я.ст}, \quad (2.6)$$

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

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

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

$$\Delta P_{ТПр.г} = R_d \cdot I^2_{я.р.г} \ , \tag{2.7}$$

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

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

$$\Delta P_{мереж.ст} = \frac{3 \cdot R_ф \cdot \left(0{,}817 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{я.вст}\right)^2}{K^2_{тр}} \ , \tag{2.8}$$

де $R_ф$ – опір мережі, що обчислюється за формулою:

$$R_Ф = R_{тр} + R_{каб}, \tag{2.9}$$

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

$$R_{тр} = R_{к.з}, \tag{2.10}$$

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

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

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

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

$$R_{Ф} = 0{,}1788 + 0{,}0042 = 0{,}1830 \text{ Ом.}$$

$K_{тр}$ – . коефіцієнт трансформатора:

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

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

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

$$\Delta P_{мереж.р.г.} = \frac{3 \cdot R_{ф} \cdot \left(0{,}817 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{я.р.г.}\right)^2}{K_{тр}^2}, \qquad (2.11)$$

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

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

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

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

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

$$\Delta W_{р.г.} = 4 \cdot \Delta P_{ДПС.р.г.} \cdot \left(t_{р1} + t_{р2} + t_{г1} + t_{г2}\right), \quad (2.13)$$

$$\Delta W_{р.г.} = 4 \cdot 47{,}4 \cdot \left(1+1+1+1\right) = 758{,}4 \text{ кДж.}$$

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

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

$$\Delta W_{ТПвст} = 2 \cdot \Delta P_{ТП.вст.} \cdot \left(t_{вст1} + t_{вст2}\right), \quad (2.14)$$

$$\Delta W_{ТПвст} = 2 \cdot 7{,}88 \cdot \left(3+3\right) = 94{,}65 \text{ кДж.}$$

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

$$\Delta W_{ТПр.г.} = 2 \cdot \Delta P_{ТП.р.г.} \cdot \left(t_{р1} + t_{р2} + t_{г1} + t_{г2}\right), \quad (2.15)$$

$$\Delta W_{ТПр.г.} = 2 \cdot 5{,}64 \cdot \left(1+1+1+1\right) = 45{,}16 \text{ кДж.}$$

$$\Delta W_{ТП} = 94{,}65 + 45{,}16 = 140 \text{ кДж.}$$

Втрати енергії у мережі розраховуємо за формулою:

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

Втрати енергії у мережі в сталому режимі розраховуємо за формулою:

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

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

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

$$\Delta W_{мереж.р.г.} = \Delta P_{мереж.р.г.} \cdot \left(t_{р1} + t_{р2} + t_{г1} + t_{г2}\right), \quad (2.18)$$

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

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

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

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

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

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

Сумарні втрати енергії у мережі розраховуємо за формулою:

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

Величину номінальної втрати потужності двигуна постійного струму розраховуємо за формулою:

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

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

Величину номінальної втрати енергії двигуна постійного струму розраховуємо за формулою:

$$\Delta W_н = 4 \cdot \Delta P_н \cdot T_ц , \tag{2.21}$$

$$\Delta W_н = 4 \cdot 102{,}81 \cdot 10 = 4112 \text{ кДж.}$$

Сумарні втрати:

$$\Delta W_\Sigma = \left[\Delta W_{ДПС} + \Delta W_{ТП} + \Delta W_{мереж.}\right] \cdot K_ц , \tag{2.22}$$

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

Перевірка двигуна на нагрівання:

$$\Delta W_{ДПС} \le \Delta W_Н ,$$

$$2241{,}6 \le 4112 .$$

3 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ В УМОВАХ ПРАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

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

Паспортні дані двигуна АДО-2000-6000-12У1, занесено в таблицю 3.1.

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

Назва величини	Фізична величина	Розмірність
Номінальна корисна потужність двигуна	кВт	2000
Номінальна напруга	В	6000
Номінальний струм статору	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	$кг \cdot м^2$	786
Число пар полюсів	-	6

Вхідні дані асинхронного двигуна типу АДО-2000-6000-12У1:

Таблиця 3.2 – Вхідні данні для розрахунку

Назва величини	Позначення	Фізична величина	Розмірність
Фазна напруга	$U_{н.ф.}$	В	3468,208
Номінальна корисна потужність двигуна	$P_Н$	кВт	2000
Частота обертання	n	об/хв	497,5
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_н$	-	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.

Величину електричної потужності $P_{1н}$,що підводиться до статора двигуна в номінальному режимі можна розраховувати за формулою:

$$P_{1н} = 3 \cdot U_{1нф} \cdot I_{1н.ф} \cdot \cos\phi_н, \qquad (3.1)$$

де $U_{1н.ф}$ - номінальна напруга, В;

$I_{1нф.}$ - номінальний струм, А;

$\cos\varphi_н$ - номінальний коефіцієнт потужності;

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

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

$$\Delta P_{дод} = 0{,}005 \cdot P_{1н}, \tag{3.2}$$

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

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

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

де n- частота обертання, об/хв;

$D_{н1}$- діаметр зовнішньої розточки статора.

$$\Delta P_{мех} = \left(\frac{497.5}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{130}{10}\right)^4 \cdot 10^{-3} = 7{,}112 \text{ кВт.}$$

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

$$\Delta P_{х,х} = \Delta P_{доб} + \Delta P_{мех}, \tag{3.4}$$

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

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

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

де $P_н$ - номінальна потужність.

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

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

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

де $\omega_{2н}$ - частота обертання,що обчислюється за формулою:

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

$$\omega_{2н} = \frac{497{,}5}{9{,}55} = 52{,}09 \text{ рад/хв.}$$

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

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

$$P_{емн} = P_б = M_н \cdot \omega_1, \quad (3.8)$$

де $\omega_{1н}$ - асинхронна частота,що обчислюється за формулою:

$$\omega_{1н} = \frac{n_0}{9{,}55} = \frac{500}{9{,}55} = 52{,}3 \text{ рад/хв.} \quad (3.9)$$

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

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

$$\Delta P_{E2} = P_{EM} - P_{мех}, \tag{3.10}$$

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

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

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

де $r_1 = 0{,}120\,(\text{Ом})$ – питомий опір міді статора.

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

Величину номінальних електричних втрат у сталі $\Delta P_{ст}$, розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{ст} = P_{1н} - P_{EM} - \Delta P_{E1}, \tag{3.12}$$

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

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:

$$S_k = S_н \cdot \left(\lambda_м + \sqrt{\lambda_м^2 - 1}\right), \tag{3.13}$$

де $S_н$ - номінальне ковзання, що складає 0,5%;

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

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

Визначимо індуктивний опір короткого замикання:

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

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:

$$r_2 = S_k \cdot x_k, \tag{3.15}$$

$$r_2 = 0{,}023 \cdot 3{,}56 = 0{,}0817 \text{ Ом}.$$

Величину активного опору статора r_1, розраховуємо за формулою:

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

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

$$r_1 = 1{,}05 \cdot 0{,}120 = 0{,}126\,\text{Ом}.$$

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

$$tg\varphi_н = \frac{x_к(x_k + x_\mu) + (r_1 + \frac{r_2}{S_н})^2}{(r_1 + \frac{r_2}{S_н})x_\mu}, \qquad (3.17)$$

$$\frac{r_2}{S_н} = \frac{0{,}0817}{0{,}005} = 16{,}34.$$

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

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

Після підстановки в попередній вираз (3.17.) відомих параметрів отримаємо вираз з одним невідомим x_μ(Ом):

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

$$x_\mu = 27{,}74\,\text{Ом}.$$

Приймемо наближено:

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

Параметри „Т”-подібної схеми заміщення:

$$r_1 = 0{,}120 \text{ Ом}$$

$$r_2 = \frac{r_{2"Г"}}{\sigma^2} = \frac{0{,}0817}{(1{,}05)^2} = 0{,}074 \text{ Ом}$$

$$x_1 = \frac{x_{1"Г"}}{\sigma} = \frac{1{,}777}{1{,}05} = 1{,}69 \text{ Ом}$$

$$x_2 = \frac{x_{2"Г"}}{\sigma^2} = \frac{1{,}777}{(1{,}05)^2} = 1{,}611 \text{ Ом}$$

$$x_\mu = x_{\mu"Г"} - x_1 = 27{,}5 - 1{,}69 = 25{,}81 \text{ Ом}$$

Розрахунки відносних параметрів схеми заміщення АД.

Базові параметри:

$$x_б = z_б = \frac{U_{фазн}}{I_{ф,дн}},$$

$$x_б = z_б = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 259{,}5} = 13{,}36 \text{ Ом}.$$

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

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

$$\omega_б = 2 \cdot \pi \cdot f_{1н}, \tag{3.18}$$

$$\omega_б = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}.$$

Величину базової потужності розраховуємо за формулою:

$$P_б = \sqrt{3} \cdot U_{фдн} \cdot I_{фдн}, \tag{3.19}$$

$$P_б = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 259{,}5 = 2696803 \text{ кВт}.$$

Величину базового моменту розраховуємо за формулою:

$$M_б = \frac{P_б}{\omega_б / z}, \tag{3.20}$$

$$M_б = \frac{2696803 \cdot 6}{314} = 51531 \text{Н·м}.$$

Величину базового магнітного потоку розраховуємо за формулою:

$$\psi_б = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{фдн}}{\omega_б}, \tag{3.21}$$

$$\psi_б = \frac{\sqrt{2} \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot 314} = 15{,}602 \text{ Вб}.$$

Далі розрахунки проводимо у відносних параметрах.

Величину відносного номінального моменту розраховуємо за формулою:

$$M'_н = \frac{M_н}{M_б}, \tag{3.22}$$

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

Величину відносного опору розраховуємо за формулою:

$$R'_2 = \frac{R_2}{R_б}, \tag{3.23}$$

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

Величину відносної номінальної зміни потоку ротору розраховуємо за формулою:

$$\psi'_{гн} = \sqrt{\frac{M'_н \cdot R'_2}{\beta_н}}, \tag{3.24}$$

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

Величину абсолютної номінальної зміни потоку ротору розраховуємо за формулою:

$$\psi_{гн} = \psi'_{гн} \cdot \psi_{б}, \tag{3.25}$$

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

Величину відносної номінальної зміни потоку ротору розраховуємо за формулою:

$$L'_{m} = \frac{x_{м}}{x_{б}}, \tag{3.26}$$

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

Величину коефіцієнт приведення розраховуємо за формулою:

$$K = \frac{x_{\mu}}{x_{\mu} + x_{2}}, \tag{3.27}$$

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

Величину відносного струму розраховуємо за формулою:

$$I'_{1x} = \frac{\psi'_{гн}}{L'_{m}}, \tag{3.28}$$

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

Абсолютну величину намагнічуваної складової струму розраховуємо за формулою:

$$I_{1x} = I'_{1x} \cdot I_{б}, \tag{3.29}$$

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

Величину відносного значення магнітного потоку зазору розраховуємо за формулою:

$$\psi'_{мн} = \sqrt{\left(\psi'_{гн}\right)^2 + \left[\frac{x_2 \cdot M'_н}{x_\mu \cdot I'_{1x}}\right]^2}\ , \tag{3.30}$$

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

Величину відносного струму в сталому режимі розраховуємо за формулою:

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

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

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

$$I'_{1(р,г)} = \sqrt{\left(I'_{1x}\right)^2 + \left(\frac{M'_{р.г}}{K \cdot \psi'_{гн}}\right)^2}\ , \tag{3.32}$$

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

$$\psi'_{тх} = \psi'_{гн} = 0{,}913\,\text{в.о.}$$

$$\psi'_{т.ст} = \frac{x_2 \cdot M'_{уст}}{x_\mu \cdot I'_{1x}}, \tag{3.33}$$

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

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

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

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

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

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

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

Величину відносного моменту розраховуємо за формулою:

$$M' = M'_{cm} + M'_{p.г}, \tag{3.37}$$

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

$$M'_{cm} = \frac{M_c}{M_б} = \frac{36{,}45}{51{,}531} = 0{,}707 \text{ в.о}\,, \tag{3.38}$$

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

$$M'_{р,г} = \frac{M_c + M_{х.х}}{M_б} = \frac{30{,}8 + 0{,}1 \cdot 9{,}8}{51{,}531} = 0{,}617 \text{ в.о.} \qquad (3.39)$$

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

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

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

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

$$\sin\varphi_{р.т} = \frac{M'_{р.т}}{K \cdot L'_m \cdot I'_{1x}}, \qquad (3.41)$$

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

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

Величину фазного струму в сталому режимі розраховуємо за формулою:

$$I_{ф(ст)} = \frac{P_{ст}}{\sqrt{3} \cdot U_{лд} \cdot K_м}, \qquad (3.43)$$

де $P_{дв.ст}$ – потужність двигуна в сталому режимі:

$$P_{дв.ст} = M_{ст} \cdot \omega_{ст} + \Delta P_{дв.ст}, \qquad (3.44)$$

$$P_{дв.ст} = 36{,}4 \cdot 32{,}9 + 41{,}134 = 1238 \text{ кВт.}$$

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

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

$$I_{ПЧф(р.т)} = \frac{P_{р.т}}{\sqrt{3} \cdot U_{лд} \cdot K_{м}}, \tag{3.45}$$

де $P_{дв.р.т}$ – потужність двигуна в режимі „розгін-гальмування” :

$$P_{дв.р.т} = M_{р.т} \cdot \omega_{р.т} + \Delta P_{дв.р.т}, \tag{3.46}$$

$$P_{дв.уст} = 31{,}7 \cdot 32{,}9 + 32{,}387 = 1075 \text{ кВт.}$$

$$I_{ПЧ(р.т)} = \frac{1075}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0{,}98} = 106 \text{ А.}$$

Величину робочої частоти двигуна розраховуємо за формулою:

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

де p -число пар полюсів двигуна;

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

Величину втрат потужності двигуна в сталому режимі розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{дв.ст} = 3 \cdot \lambda_1 \cdot I_{уст}^2 \left(R_1 + K^2 \cdot R_2 \cdot \sin \varphi_{уст}\right), \tag{3.47}$$

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

$$I_{1ст} = I'_{1ст} \cdot I_{б}, \tag{3.48}$$

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

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

$$\Delta P_{дв.р.т} = 3 \cdot \lambda_1 \cdot I^2_{р.т} \left(R_1 + K^2 \cdot R_2 \cdot \sin \varphi_{р.т}\right), \tag{3.48}$$

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

$$I_{1р.г.} = I'_{1р.г.} \cdot I_{б}, \tag{3.49}$$

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

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

$$\Delta P_{ПЧ.ст} = \Delta P_{ПЧ,Н} (K_1 \cdot {I'_{1уст}}^2 + K_2 \cdot I'_{1уст} + K_3), \tag{3.50}$$

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

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

$$\Delta P_{ПЧ.р.т} = \Delta P_{ПЧ,Н} (K_1 \cdot {I'_{1р.т}}^2 + K_2 \cdot I'_{1р.т} + K_3), \tag{3.51}$$

$$\Delta P_{ПЧ.р.т} = 28{,}4(0{,}4 \cdot (0{,}8598)^2 + 0{,}4 \cdot 0{,}8598 + 0{,}2) = 23{,}832 \text{ кВт}.$$

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

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

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

Величину втрат потужності мережі в сталому режимі розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{мереж.вст.} = 3 \cdot R_{ф} \cdot \left(2 \cdot I_{ф.ст}\right)^2, \qquad (3.53)$$

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

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

$$\Delta P_{мереж.р.г.} = 3 \cdot R_{ф} \cdot \left(2 \cdot I_{ф.р.г}\right)^2, \qquad (3.54)$$

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

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

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

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

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

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

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

кВт.

Величину додаткових втрат потужності в сталому режимі розраховуємо за формулою:

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

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

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

$$\Delta P_{доб.р.г} = \Delta P_{доб.н}\left(\frac{I_{1р.г}}{I_{1н}}\right)^2, \tag{3.58}$$

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

Величину втрат електромагнітної енергії розраховуємо за формулою:

$$\begin{aligned}&\Delta W_{E1} = 3\cdot I_{уст}^2\left(R_1 + K^2\cdot R_2\cdot\sin\varphi_{уст}\right)\cdot\left(t_{уст1}+t_{уст2}\right)+\\&3\cdot I_{р.т}^2\left(R_1+K^2\cdot R_2\cdot\sin\varphi_{р.т}\right)\cdot\left(t_{р1}+t_{р2}+t_{т1}+t_{т2}\right)\end{aligned}, \tag{3.59}$$

$$\begin{aligned}&\Delta W_{E1} = 3\cdot(246,26)^2\left(0,12+(0,941)^2\cdot0,074\cdot0,8229\right)\cdot\left(3+3\ \right)+\\&3\cdot(223)^2\left(0,12+(0,41)^2\cdot0,074\cdot0,718\right)\cdot(1+1+1+1) = 289,535\end{aligned}\ \text{кДж.}$$

Величину втрат енергії (кДж) в сталі розраховуємо за формулою:

$$\Delta W_{M1} = \frac{\Delta P}{2\left(\psi'_{тн}\right)^2}\left[\begin{aligned}&\left[\left(L'_m\right)^2\left(\cos^2\varphi_{ст}\right)+\left(K^2\cdot L'_{or}\right)^2\left(\sin^2\varphi_{ст}\right)\right]\left(I'_{ст}\right)^2\left(t_{ст1}+t_{ст2}\right)+\\&\left[\left(L'_m\right)^2\left(\cos^2\varphi_{р.}\right)+\left(K^2\cdot L'_{or}\right)^2\left(\sin^2\varphi_{р.г}\right)\right]\frac{\left(I'_{1р.г}\right)^2}{2,3}\left(t_{р1}+t_{р2}+t_{г1}+t_{г2}\right)\end{aligned}\right] \tag{3.60}$$

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

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

$$\begin{array}{l}\Delta W_{ПЧ} = \Delta P_{П.Ч.}((K_1\cdot {I'_{1уст}}^{\,2}+K_2\cdot I'_{1уст}+K_3)\cdot(t_{уст1}+t_{уст2})+\\ (K_1\cdot {I'_{1р.т}}^{\,2}+K_2\cdot I'_{1р.т}+K_3)\cdot(t_{р1}+t_{р2}+t_{т1}+t_{т2}))\end{array}, \qquad (3.61)$$

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

Величину втрат додаткової енергії можна розраховувати за формулою:

$$\Delta W_{доб} = \Delta P_{доб.н}\left(\left(\frac{I_{1уст}}{I_{1н}}\right)^2\cdot\left(t_{уст1}+t_{уст2}\right)+\left(\frac{I_{1р.т}}{I_{1н}}\right)^2\cdot\left(t_{р1}+t_{р2}+t_{т1}+t_{т2}\right)\right), \qquad (3.62)$$

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

Величину втрат енергії (кДж)в мережі розраховуємо за формулою:

$$\Delta W_{мереж} = \Delta P_{мереж.ст}\cdot\left(t_{ст1}+t_{ст2}\right)+\frac{\Delta P_{мереж.р.г}\cdot\left(t_{р1}+t_{р2}+t_{г1}+t_{г2}\right)}{3},$$

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

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 :

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

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

Величину втрат енергії в номінальному режимі розраховуємо за формулою:

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

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

Перевірка:

$$\Delta W_E + \Delta W_{СТ} + \Delta W_{доб} \le \Delta W_{дв.н} , \tag{3.64}$$

$$376{,}39 + 147{,}945 + 86{,}866 \le 780 ,$$

$$610{,}811 \le 780 .$$

Сумарні втрати:

$$\Delta W_\Sigma = \left[\Delta W_{АД} + \Delta W_{ПЧ} + \Delta W_{мереж.} \right] \cdot K_ц , \tag{3.65}$$

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

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 аналогічний системі „ТП-ДПС”, змінюються втрати в мережі.

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

$$\Delta P_{мереж.ст} = 3 \cdot R_ф \cdot \left(I_{ф.ст} \right)^2 , \tag{3.66}$$

де $R_ф$ – опір мережі, що обчислюється за формулою:

$$R_Ф = R_{тр} + R_{каб}, \tag{3.67}$$

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

$$R_{тр} = R_{к.з},$$

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

$$R_{тр} = 0{,}0085\,\text{Ом}.$$

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

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

$$R_Ф = 0{,}00085 + 0{,}0042 = 0{,}00505\,\text{Ом}.$$

$I_{ф.вст}$ – фазний струм сталого режиму двигуна, що обчислюється за формулою:

$$I_{ф.вст} = \frac{P_{\Sigma вст}}{\sqrt{3} \cdot U_{1д} \cdot K_м}, \tag{3.69}$$

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

$$P_{\Sigma вст} = 2 \cdot M_{вст} \cdot \omega_{вст} + 4 \cdot \Delta P_{ДПССт} + \Delta P_{ТПст}, \tag{3.70}$$

$$P_{\Sigma вст} = 2 \cdot 36{,}4 \cdot 32{,}9 + 247{,}2 + 225{,}4 = 2867\,\text{кВт}.$$

$$I_{ф.вст} = \frac{2867}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0{,}98} = 281{,}9 \text{ А}.$$

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

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

$$\Delta P_{мереж.р.г.} = 3 \cdot R_ф \cdot \left(I_{ф.р.г.}\right)^2, \quad (3.71)$$

де $I_{ф.р.г}$ – фазний струм режиму „розгін-гальмування” двигуна, що обчислюється за формулою:

$$I_{ф.р.г} = \frac{P_{\Sigma р.г.}}{\sqrt{3} \cdot U_{1д} \cdot K_м}, \quad (3.72)$$

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

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

$$P_{\Sigma р.г.} = 2 \cdot 31{,}8 \cdot 32{,}9 + 189{,}2 + 161{,}4 = 2443 \text{ кВт}.$$

$$I_{ф.р.г.} = \frac{2443}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0{,}98} = 252{,}7 \text{ А}.$$

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

Втрати енергії у мережі можна розрахувати за формулою:

$$\Delta W_{мереж.} = \Delta W_{мереж.вст} + \Delta W_{мереж.р.г.} + \Delta W_{мереж.х.х.} \quad (3.74)$$

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

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

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

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

$$\Delta W_{мереж.р.г.} = \Delta P_{мереж.р.г.} \cdot \left(t_{р1} + t_{р2} + t_{г1} + t_{г2}\right) , \quad (3.76)$$

$$\Delta W_{мереж.р.г.} = 35 \cdot \left(1+1+1+1\right) = 140{,}2 \text{ кДж·с.}$$

Втрати енергії у мережі в режимі „холостого ходу”: можна розрахувати за формулою:

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

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

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

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

Сумарні втрати енергії у мережі $\left(кДж \cdot с\right)$ можна розрахувати за формулою:

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

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

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

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

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

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

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

Сумарні втрати:

$$\Delta W_{\Sigma} = \left[\Delta W_{ДПС} + \Delta W_{ТП} + \Delta W_{мереж.} \right] \cdot K_{ц}, \tag{3.80}$$

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

Перевірка двигуна на нагрівання:

$$\Delta W_{ДПС} \le \Delta W_{Н} \quad , \tag{3.81}$$

$$2241{,}6 \le 4112 .$$

3.2 Економічне обґрунтування впровадження енергозберігаючих заходів в обтискному цеху ПрАТ „Запоріжсталь”

Система „тиристорний перетворювач – двигун постійного струму”– морально застаріла й має невелику надійність через значний знос деталей. Попередні розрахунки та проведений аналіз вказують на необхідність 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 вертикальних валків „Слябінг 1150” однакові та складаються з витрат на електропривод, вартості монтажних робіт, зарплати за монтажні роботи, вартості устаткування, вартості займаної площі, транспортних витрат, заготівельно–складських витрат.

Витрати на транспортні й заготівельно–складські витрати приймаємо 5% і 1,2% відповідно від вартості встаткування.

Вартість монтажних робіт – 10% від вартості встаткування, а заробітна плата за монтажні роботи становить 5%.

Вартість площі(C), займаної системами, розраховується за формулою:

$$C = S \cdot C_m,$$

де S - площа займана системою, м^2;

Cm - вартість одного квадратного метра, грн.

$$C_{площ.ТП-Д} = 40 \cdot 467{,}2 = 18688 \text{ грн.}$$

$$C_{площ.ЧП-АД} = 36 \cdot 467{,}2 = 16819 \text{ грн.}$$

Зарплата ($З$) за монтажні роботи розраховується за формулою:

$$З = 0{,}05 \cdot К \ , \qquad (3.80.)$$

де $К$ - вартість електропривода, грн.:

$$К_{ТП-Д} = 10020517 \text{ грн.}$$

$$К_{ЧП-АД} = 8109060 \text{ грн.}$$

$$З_{ТП-Д} = 0{,}05 \cdot 10020517 = 501025 \text{ грн.}$$

$$З_{ТП-Д} = 0{,}05 \cdot 8109060 = 405453 \text{ грн.}$$

Вартість самих монтажних робіт розраховується за формулою:

$$С_{м.р.} = 0{,}1 \cdot К \, , \qquad (3.81.)$$

$$С_{м.р.ТП-Д} = 0{,}1 \cdot 10020517 = 1002051 \text{ грн.}$$

$$С_{м.р.ЧП-АД} = 0{,}1 \cdot 8109060 = 810906 \text{ грн.}$$

Вартість устаткування розраховується за формулою:

$$С_{устат..} = З + К + С_{м.р.} \ , \qquad (3.82.)$$

$$С_{устат.ТП-Д} = 501025 + 10020517 + 1002051 = 11523594 \text{ грн.}$$

$$С_{устат.ЧП-АД} = 405453 + 8109060 + 810906 = 9325419 \text{ грн.}$$

Транспортні витрати (5%) розраховуються за формулою:

$$С_{трансп.} = 0{,}05 \cdot К \, , \qquad (3.83.)$$

$$С_{транспТП-Д.} = 0{,}05 \cdot 10020517 = 501025 \text{ грн.}$$

$$C_{транспЧП-АД.} = 0{,}05 \cdot 8109060 = 405453 \text{ грн.}$$

Заготівельно-складські витрати(1,2%) розраховуються за формулою:

$$C_{склад.} = 0{,}012 \cdot K \ , \tag{3.84}$$

$$C_{склад.ТП-Д} = 0{,}012 \cdot 10020517 = 120246 \text{ грн.}$$

$$C_{склад.ЧП-АД} = 0{,}012 \cdot 8109060 = 97308 \text{ грн.}$$

Загальна сума капітальних вкладень для обох систем становить:

$$C_{кап.вклад.} = C_{устат.} + C_{площ.} + C_{трансп.} + C_{склад.} \tag{3.85}$$

$$C_{кап.вклад.ТП-Д} = 11523594 + 18688 + 501025 + 120246 = 12163554 \text{ грн.}$$

$$C_{кап.вклад.ЧП-АД} = 9325419 + 16819 + 405453 + 97308 = 9845000 \text{ грн.}$$

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

Таблиця 3.1 - Капітальні вкладення, грн

Найменування	Усього грн.	
	СистемаТП-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.

Річні амортизаційні відрахування розраховуються для кожного варіанта устаткування агрегату.

Амортизаційні відрахування на устаткування розраховуються за формулою:

$$C_{ав.уст.} = \frac{H_a \cdot C_{бал}}{100}, \quad (3.86)$$

де H_a - норма амортизаційних відрахувань на устаткування, %; H_a = 15;

$C_{бал}$ - балансова вартість, грн.

$$C_{бал} = C_{трансп.} + C_{склад.} + C_{уст.}, \quad (3.87)$$

$$C_{балТП-Д} = 501025 + 120246 + 11523594 = 12144866 \text{ грн.}$$

$$C_{балЧП-АД} = 405453 + 97308 + 9325419 = 9828181 \text{ грн.}$$

$$C_{ав.устТП-Д.} = \frac{20 \cdot 12144866}{100} = 2428973 \text{ грн.}$$

$$C_{ав.устЧП-АД.} = \frac{20 \cdot 9828181}{100} = 1965636 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування на займану площу розраховуються за формулою:

$$C_{ав.площ..} = \frac{5 \cdot C_{площ.}}{100}, \quad (3.88)$$

$$C_{ав.площТП-Д.} = \frac{5 \cdot 18688}{100} = 934 \text{ грн.}$$

$$C_{ав.площАД-ЧП.} = \frac{5 \cdot 16819}{100} = 841 \text{ грн.}$$

Загальні амортизаційні відрахування розраховуються за формулою:

$$C_a = C_{ав.уст.} + C_{ав.площ.} \quad , \tag{3.89}$$

$$C_{аТП-Д} = 2428973 + 934 = 2429907 \text{ грн.}$$

$$C_{аЧП-АД} = 1965636 + 841 = 1966477 \text{ грн.}$$

Витрата на електроенергію за системою ТП–ДПС:

$$\Delta W = 411 \cdot 8600 \cdot 0{,}74 = 2615604 \text{ грн.}$$

$$\Delta W = 174 \cdot 8600 \cdot 0{,}74 = 1107336 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт складаються з:

- основної й додаткової заробітної плати робітників з нарахуваннями;
- вартості матеріалів і комплектних виробів;
- загальновиробничих і загальногосподарських витрат.

Для визначення заробітної плати робітників необхідно визначити число робітників.

Обслуговування 1 двигуна постійного струму в системі „ТП-ДПС”складається з:

технічного обслуговування-85,8 люд/год,технічного ремонту-342,2 люд/год,капітального ремонту-858 люд/год.

$$C_{ЗАР.ПЛ.ТП-Д-ДПС} = 4 \cdot (85{,}8 \cdot 8 + 343{,}2 \cdot 4 + 71{,}5) \cdot 13{,}87 = 118211 \text{ грн/рік}$$

$$C_{ЗАР.ПЛ.ТП-Д-ТП} = 2 \cdot (20{,}8 \cdot 8 + 80{,}2 \cdot 4 + 15) = 1004 \text{ грн.}$$

$$C_{ЗАР.ПЛ.ТП-Д-Т} = 1000 \text{ грн.}$$

Загальна заробітна плата за обслуговування комплекту ТП-Д:

$$C_{ЗАР.ПЛ.ТП-Д} = 118211 + 1004 + 1000 = 120215 \text{ грн.}$$

Загальна заробітна плата за обслуговування комплекту ЧП-АД:

$$C_{ЗАР.ПЛ.ЧП-АД-АД} = 1000 \text{ грн.}$$

$$C_{ЗАР.ПЛ.ЧП-АД-ЧП} = 1000 \text{ грн.}$$

$$C_{ЗАР.ПЛ.ЧП-АД} = 2000 \text{ грн.}$$

У повну заробітну плату, крім тарифної, входять:

– премія (14% від тарифної заробітної плати для робітників, 25% для І.Т.Р.);

– додаткова заробітна плата (30% від тарифної заробітної плати);

– соціальне страхування (36,5% від тарифної заробітної плати).

Повна заробітна плата для обох варіантів систем:

$$C_{повн.ТП-Д} = (0{,}14 \cdot 120215 + 0{,}30 \cdot 120215 + 0{,}365 \cdot 120215) + 120215 = 216867 \text{ грн.}$$

$$C_{повн.ЧП-АД} = (0{,}14 \cdot 2000 + 0{,}30 \cdot 2000 + 0{,}365 \cdot 2000) + 2000 = 3608 \text{ грн.}$$

Загальновиробничі й загальногосподарські витрати за обома варіантами:

$$C_{ЗВтаЗГ.} = 0{,}8 \cdot C_{ЗПТзаг} \qquad (3.90)$$

$$C_{ЗВтаЗГ.ТП-Д} = 0{,}8 \cdot 1202215 = 96126 \text{ грн.}$$

$$C_{ЗВтаЗГ.ТП-Д} = 0{,}8 \cdot 2000 = 1600 \text{ грн.}$$

Розрахунки показали, що система ЧП-АД значно ощадливіше системи ТП-Д: найбільш повно використовується електроенергія, обслуговуючий персонал. Отже модернізація системи ТП-Д шляхом заміни на систему ЧП-АД економічно обґрунтована. Отримані результати розрахунку витрат для обох варіантів приведені в таблиці 3.2.

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

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.

Проводимо економічну оцінку для системи ЧП-АД.

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

$$ЧПВ = \sum_{t=0}^{T} \frac{Rt - It}{(1+\alpha)^{t}}, \qquad (3.91))$$

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:

$$\sum_{t=0}^{T} \frac{Rt - It}{(1+\alpha)^{t}} \quad . \qquad (3.92)$$

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.

$$T_{ок} = \frac{КВ}{\sum Є} \quad , \qquad (3.93)$$

де $КВ$ – капітальні витрати, що з урахуванням ліквідаційної вартості існуючого обладнання на комбінаті складають:

$$КВ = КВ_{ЧП-АД} - КВ_{ликв},$$

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

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

$$T_{ок} = \frac{7450000}{2187222} = 3{,}4 \,. \tag{3.94}$$

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	7450000	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

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:

$$k = (1+\alpha)^t, \tag{3.95}$$

де α=10%.

Щорічний дисконтований грошовий потік, тис. грн.:

$$ДГП = \frac{ЧГП}{k}. \tag{3.96}$$

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

Таблиця 3.5 – Знаходження ЧПВ при α = 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 α = 20%, дані заносимо до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Знаходження ЧПВ при α = 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 знаходимо ВНР, (рисунок 3.1).

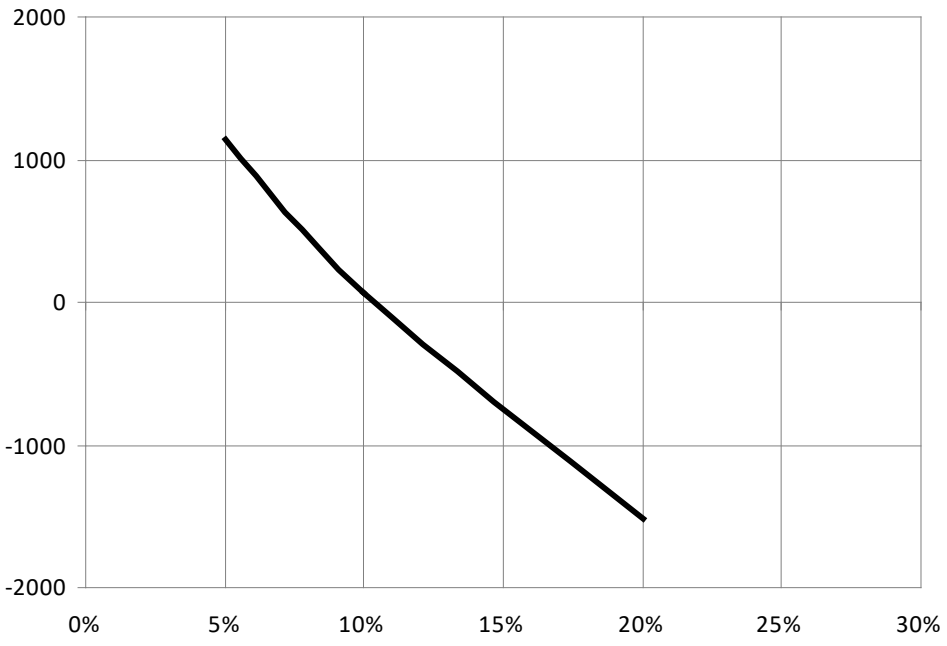


Рисунок 3.1 – Внутрішня норма рентабельності варіанту ЧП-АД

Цей результат показу, що при ставці дисконту, яка буде менше ніж 12%, проект буде вигідним.

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

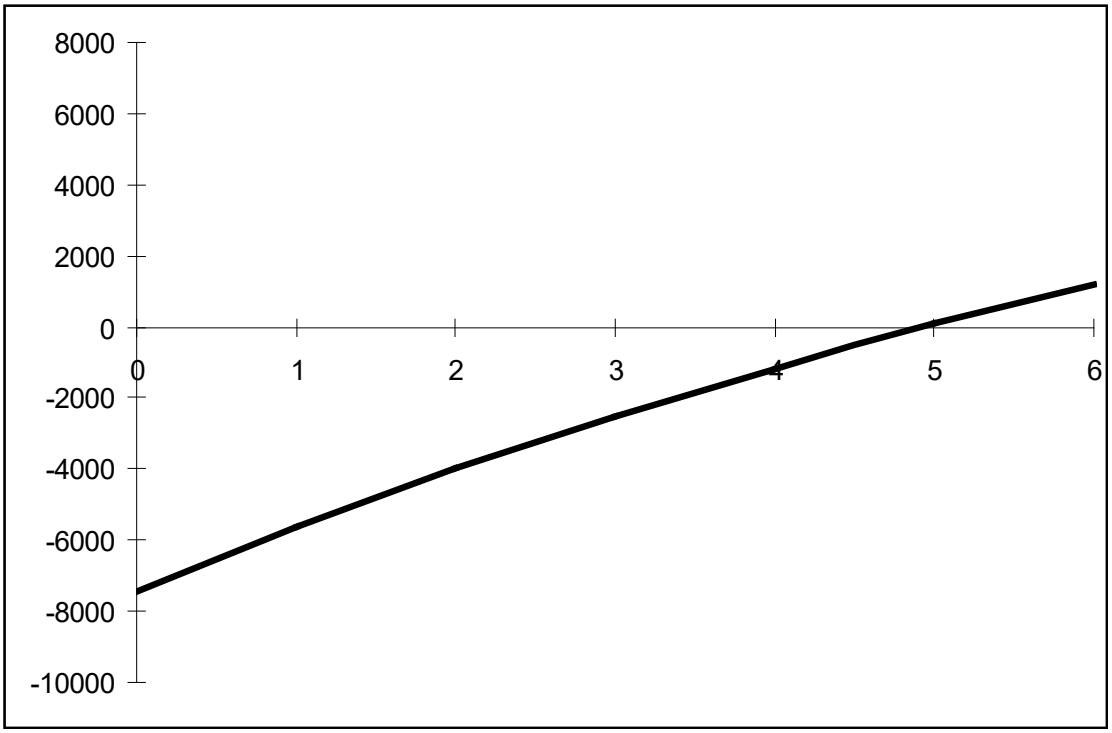


Рисунок 3.2 – Дисконтований термін окупності варіанту ЧП-АД

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.

Для розрахунку витрат використовуємо аналогічні формули, що використовувалися для обчислення витрат за системою ТП–ДПС та ЧП – АД.

Вартість площі(*С*), займаною системою ТП–ДПС–ФКУ, розраховуємо за формулою:

$$C_{площ.ТП-Д-ФКУ} = 9 \cdot 467{,}2 = 4204{,}8 \text{ грн.}$$

Зарплата (*З*) за монтажні роботи розраховується за формулою:

$$K_{ТП-Д-ФКУ} = 1280000 \text{ грн.}$$

$$З_{ТП-Д-ФКУ} = 0{,}05 \cdot 1280000 = 64000 \text{ грн.}$$

Вартість самих монтажних робіт розраховується за формулою:

$$C_{м.р.ТП-Д-ФКУ} = 0{,}1 \cdot 1280000 = 128000 \text{ грн.}$$

Вартість устаткування розраховується за формулою:

$$C_{устат.ТП-Д-ФКУ} = 4204{,}8 + 1280000 + 128000 = 1472000 \text{ грн.}$$

Транспортні витрати (5%) розраховуються за формулою:

$$C_{трансп ТП-Д-ФКУ.} = 0{,}05 \cdot 1280000 = 64000 \text{ грн.}$$

Заготівельно-складські витрати(1,2%) розраховуються за формулою:

$$C_{склад.ТП-Д-ФКУ} = 0{,}012 \cdot 1280000 = 15360$$

Загальна сума капітальних вкладень для обох систем становить:

$$C_{кап.вклад.ТП-Д-ФКУ} = 14720000 + 64000 + 15360 + 4204,8 = 1555565 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування на устаткування розраховуються за формулою.

$$C_{балТП-Д-ФКУ} = 15360 + 6400 + 1472000 = 1551360 \text{ грн.}$$

$$C_{ав.устТП-Д-ФКУ.} = \frac{20 \cdot 1551360}{100} = 310272 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування на займану площу розраховуються за формулою:

$$C_{ав.площ.ТП-Д-ФКУ} = \frac{5 \cdot 4204,8}{100} = 210,24 \text{ грн.}$$

Загальні амортизаційні відрахування розраховуються за формулою:

$$C_{аТП-Д-ФКУ} = 310272 + 210,24 = 310482 \text{ грн.}$$

Витрата на електроенергію за системою ТП-Д:

$$\Delta W = 278 \cdot 8600 \cdot 0.74 = 1769382 \text{ грн.}$$

Поточний ремонт устаткування робиться на місці його установки, з його відключенням, силами змінного ремонтного персоналу, що обслуговує даний агрегат. Витрати на поточний ремонт складаються з:

- основної й додаткової заробітної плати робітників з нарахуваннями;
- вартості матеріалів і комплектних виробів;

– загальновиробничих і загальногосподарських витрат.

Для визначення заробітної плати робітників необхідно визначити число робітників.

Варіант по системі ТП-Д обслуговують.

Обслуговування 2 ФКУ за рік:

$$C_{ЗАР.ПЛ.ТП-Д-ТП-ФКУ} = 1000 \text{ грн.}$$

У повну заробітну плату, крім тарифної, входять:

– премія (14% від тарифної заробітної плати для робітників, 25% для І.Т.Р.);

– додаткова заробітна плата (30% від тарифної заробітної плати);

– соціальне страхування (36,5% від тарифної заробітної плати).

Повна заробітна плата для обох варіантів систем:

$$C_{повн.ТП-Д-ФКУ} = (0{,}14 \cdot 1000 + 0{,}30 \cdot 1000 + 0{,}365 \cdot 1000) + 1000 = 1804 \text{ грн.}$$

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

Загальновиробничі й загальногосподарські витрати за обома варіантами:

$$C_{ЗВтаЗГ.} = 0{,}8 \cdot C_{ЗПТзаг},$$

$$C_{ЗВтаЗГ.ТП-Д-ФКУ} = 0{,}8 \cdot 1000 = 800 \text{ грн.}$$

Проводимо економічну оцінку для системи ТП–ДПС–ФКУ.

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

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

$$T_{ок} = \frac{КВ}{\sum Є} \quad , \qquad (3.93)$$

де $КВ$ – капітальні витрати складають1555565 грн,

Є-економія енергоресурсів від впровадження проекту.

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

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

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

Таблиця 3.9 – Знаходження ЧПВ при α = 10%, грн.

Роки	ЧГП	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

Коефіцієнт дисконтування розраховується за наступною формулою:

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

Щорічний дисконтований грошовий потік, тис. грн.:

$$ДГП = \frac{ЧГП}{k}.$$

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

Таблиця 3.10 – Знаходження ЧПВ при α = 40%, грн

Роки	ЧГП	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).

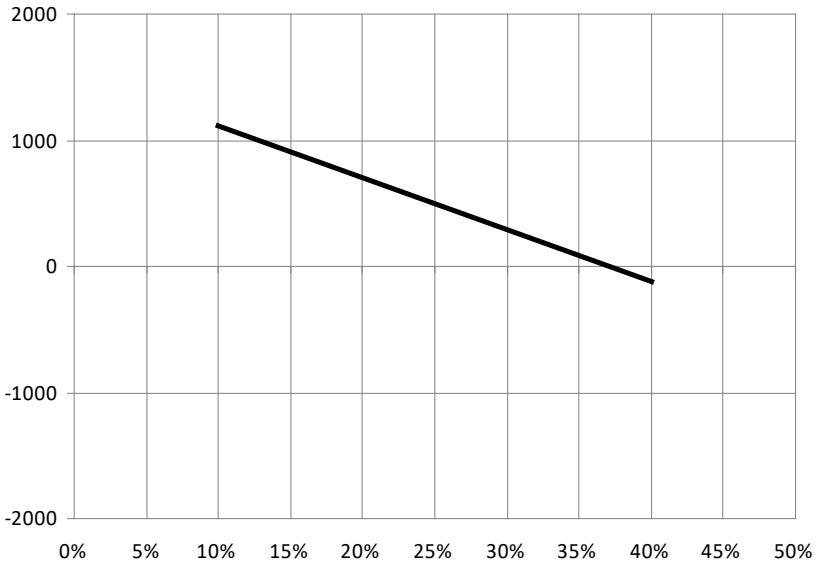


Рисунок 3.3 – Внутрішня норма рентабельності варіанту з ФКП

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

На рисунку 3.2 визначаємо дисконтований термін окупності.

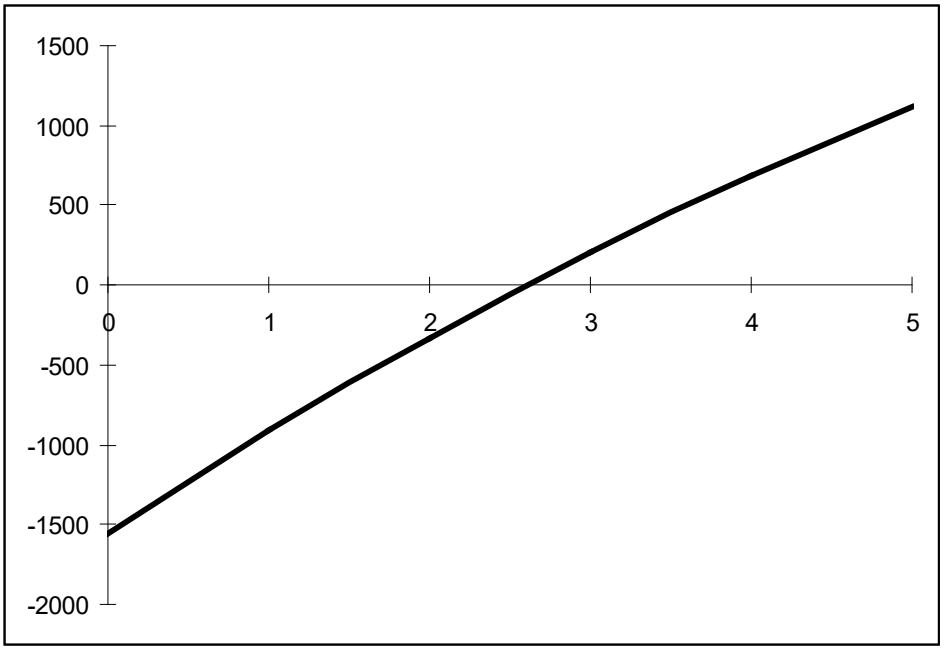


Рисунок 3.4 – Дисконтований термін окупності варіанту з ФКП

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 проект можна вважати прийнятним.

ВИСНОВКИ

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

2. Для оцінки енергоефективності запропонованого способу побудування електроприводу прокатних станів (на прикладі приводу вертикальних валків прокатного стану обтискного цеху ПрАТ «Запоріжсталь»), виконано порівняння з станом, що існує (базовий варіант) та з використанням в базовому варіанті фільтрокомпенсуючого приладу(ФКП).

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

4. 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 скаладає 1143800 кВт ·год, дисконтований термін окупності – 2,4 роки;

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

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ковальчук Ю.О., Дмитрук П.П. Частотно-регульовані асинхронні електроприводи. — Київ: НТУУ «КПІ», 2010. — 320 с.

2. Шуляренко М.В., Кришталь О.П. Електричні машини: навчальний посібник. — Львів: ЛНУ, 2009. — 380 с.

3. Гуменюк Ю.В. Оптимізація роботи асинхронних двигунів у частотно-регульованих системах. — Київ: ІЕЕ, 2012. — 150 с.

4. Мельничук А.М., Олійник В.П. Моделювання втрат потужності в електроприводах. — Львів: Політехніка, 2015. — 220 с.

5. Кравченко О.О. Енергозбереження в електроприводах із ШІМ-регуляторами. — Харків: НТУ «ХПІ», 2014. — 250 с.

6. Василенко І.П., Коцюбинський М.В. Основи теорії електропривода. — Одеса: ОНПУ, 2008. — 276 с.

7. Галкін О.О. Електропривод з вентильними двигунами: підручник. — Київ: Наук. думка, 2011. — 330 с.

8. Дмитрієв С.В., Козлов Ю.С. Реверсивний електропривод постійного струму. — Львів: Видавництво ЛНУ, 2010. — 300 с.

9. Олійник В.М., Піщанський О.В. Автоматизація систем управління електроприводами. — Київ: КНЕУ, 2007. — 260 с.

10. Петров В.С., Мусієнко Т.О. Електрообладнання металургійних підприємств. — Запоріжжя: ЗДІА, 2012. — 320 с.

11. Бондаренко П.П., Степаненко Л.М. Тенденції розвитку частотно-регульованих електроприводів. — Дніпро: ДНУ, 2018. — 290 с.

12. Савченко О.В., Ткаченко М.С. Адаптивне управління асинхронними двигунами. — Київ: Політехніка, 2013. — 210 с.

13. Ковтун В.П., Савчук В.І. Математичне моделювання електричних машин. — Харків: НТУ, 2009. — 280 с.

14. Зінченко П.О., Городенко Ю.В. Адаптивні системи прямого управління електроприводами. — Дніпро: НГУ, 2016. — 230 с.

15. Турянський І.Г., Соломко А.П. Основи електропривода. — Львів: Політехніка, 2010. — 290 с.

16. Волков І.П., Клоков Б.К. Довідник з електричних машин. — Київ: НТУ, 2008. — 320 с.

17. Шевченко І.В. Simulink: прикладне моделювання для інженерів. — Київ: Вид-во КНУ, 2014. — 450 с.

18. Соколов М.М., Масанділов Л.Б. Перехідні процеси в асинхронних двигунах. — Київ: ІЕЕ, 2005. — 220 с.

19. Єлісєєв В.А. Довідник з автоматизованого електропривода. — Львів: Політехніка, 2007. — 500 с.

20. Гуревич А.Є., Макєєв І.М. Електрообладнання підприємств чорної металургії. — Запоріжжя: ЗДІА, 2006. — 300 с.

21. Іванов Н.І., Парсункін Б.М. Автоматизація процесів у металургії. — Київ: ІЕЕ, 2009. — 310 с.

22. Пільгаєв В.М., Белобров Ю.М. Реконструкція МНЛЗ підприємств. — Дніпро: НГУ, 2015. — 200 с.

23. Банников Ю.Г., Паламарчук М.І. Енергозбереження в сучасних металургійних комбінатах. — Харків: НТУ, 2018. — 150 с.

24. Ткаченко О.В. Екологічні аспекти роботи промислових підприємств. — Київ: Екомет, 2013. — 180 с.

25. Романюк С.П., Ткаченко Ю.В. Ефективність автоматизованих електроприводів. — Київ: Вид-во КПІ, 2011. — 270 с.