

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до випускної роботи магістра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ТЕМА ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ГА-
ЗООЧИЩЕННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ЦЕХА №2 ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ
КРИВИЙ РІГ» В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ

Виконав: студент групи ЕМО-23м

Керівник випускної роботи

Нормоконтролер

Декан ЕТФ

Гарант освітньої програми

Дмитро УСТИК

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

д.т.н., проф. Станіслав ТОЛМАЧОВ

Кривий Ріг 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА
ВИПУСКНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Устику Дмитру Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Аналіз енергоспоживання електромеханічної системи газоочищення агломераційного цеха №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в пускових режимах»

2. Строк подання здобувачем роботи : 5 грудня 2024 р.

3. Мета та завдання випускної роботи:

Мета та завдання випускної роботи – обґрунтування техніко-економічної доцільності використання пристроїв керованого пуску асинхронного електроприводу ексгаустера, визначення залежності показників енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера при використанні пристроїв керованого пуску.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди презентації у кількості _____ штук _____

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали консультанта | Дата, підпис | |
|--------|---------------------------------|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| I | Титюк В.К. | 05.09.2024 | 10.10.2024 |
| II | Титюк В.К. | 05.09.2024 | 3.11.2024 |
| III | Титюк В.К. | 05.09.2024 | 25.11.2024 |

7. Календарний план виконання роботи та консультацій

| № | Назва етапів роботи | Дата виконання |
|---|---|----------------|
| 1 | Огляд науково-технічної літератури з питань керування пусковими режимами електромеханічних систем великої потужності. | 28.09.2024 |
| 2 | Формулювання об'єкта, предмета та мети дослідження | 3.10.2024 |
| 3 | Математичне моделювання керованого пуску асинхронних двигунів з використанням MATLAB/Simulink/ Specialized Power Systems. | 14.10.2024 |
| 4 | Ознайомлення зі схемою технологічного процесу, встановлення технічних характеристик технологічного обладнання | 24.10.2024 |
| 5 | Встановлення технічних характеристик електромеханічного обладнання агломераційного цеха №2. | 28.10.2024 |
| 6 | Вибір раціональної схеми пристрою для керування запуском асинхронного електроприводу ексгаустера агломераційного цеха №2. | 3.11.2024 |
| 7 | Загальні теоретичні уявлення про енергоспоживання електромеханічних систем в пускових режимах. | 10.11.2024 |
| 8 | Математичне моделювання керованого пуску асинхронного електроприводу ексгаустера агломераційного цеха №2, аналіз отриманих результатів. | 17.11.2024 |
| 9 | Оформлення пояснювальної записки та презентації випускної роботи | 05.12.2024 |

Дата видачі завдання 05.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Устик Д.Г. _____
(ПІБ)

Титюк В.К. _____
(ПІБ)

ЗМІСТ

| | |
|---|--|
| Реферат | |
| Вступ | |
| Розділ 1 Технологія виробництва агломерату та електромеханічне обладнання системи газоочищення агломераційного цеха №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» | |
| 1.1 Технологія виробництва агломерату | |
| 1.2 Напрямки удосконалення існуючої системи газоочищення | |
| 1.3 Основні технологічні параметри роботи ексгаустера | |
| 1.4 Технічні характеристики ексгаустера 9000-11-5 | |
| 1.5 Технічні характеристики приводного електродвигуна | |
| 1.6 Вплив процесів пуску потужних електроприводів на надійність електромеханічного та технологічного обладнання | |
| 1.7 Високовольтний пристрій плавного пуску HRVS-DN | |
| Висновки до розділу 1 | |
| Розділ 2 Розробка математичної моделі системи плавного пуску електропривода ексгаустера з тиристорним регулятором напруги | |
| 2.1 Розрахунок параметрів математичної моделі електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 | |
| 2.1.1 Розрахунок електромагнітних параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна типу 1RQ7 636-6JA80-0CG0-Z | |
| 2.1.2 Визначення параметрів вентиляторного моменту опору | |
| 2.1.3 Сумарний момент інерції електроприводу | |
| 2.2 Математичне моделювання асинхронного двигуна типу 1RQ7 636-6JA80-0CG0-Z | |
| 2.3 Розробка математичної моделі енергоспоживання в процесі керованого пуску електропривода ексгаустера | |

| | |
|---|--|
| 2.4 Математична модель електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 з пристроєм плавного пуску | |
| Висновки до розділу 2 | |
| Розділ 3 Дослідження енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 у керованому пусковому режимі | |
| 3.1 Синтез регресійної моделі енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 | |
| 3.2 Техніко-економічні показники використання систем керованого пуску потужних електроприводів | |
| 3.2.1 Числовий приклад розрахунку економічної ефективності використання пускового пристрою | |
| Висновки до розділу 3 | |
| Висновки по роботі | |
| Література | |

Реферат

__ сторінок, __ таблиць, __ рисунків, __ джерел літератури.

Тема випускної роботи: «Аналіз енергоспоживання електромеханічної системи газоочищення агломераційного цеха №2 ПАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг» в пускових режимах»

Метою роботи є дослідження показників енергоспоживання електромеханічної системи газоочищення агломераційного цеха №2 при впровадженні системи плавного запуску асинхронного електроприводу ексгаустера в залежності від тривалості пускового процесу.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є процеси енергоспоживання асинхронного електропривода ексгаустера при використанні пристроїв плавного запуску.

Предметом дослідження магістерської роботи є залежність енергоспоживання від показників керування плавним пуском електропривода ексгаустера.

Випускна робота присвячена дослідженню енергоспоживання електромеханічного обладнання системи газоочищення агломераційного цеха №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» після впровадження системи полегшеного запуску електроприводу ексгаустера Н-9000-11-5. Приводяться основні відомості про технологічний процес, виконано розрахунок потужності електропривода ексгаустера. Обрано технічний варіант системи плавного запуску синхронного електроприводу ексгаустера на базі тиристорного регулятора напруги. Розраховані і побудовані динамічні характеристики запропонованого технічного рішення за допомогою пакету Matlab/Simulink.

У значному обсязі використані різноманітні методи дослідження, такі як математичні розрахунки, графічні побудови, математичні залежності та теоретичні положення з курсів «Теорія електропривода», «Електричні машини»,

«Теоретичні основи електротехніки», «Сучасні методи ідентифікації, моніторингу та діагностики електромеханічного обладнання».

Ключові слова: ЕКСГАУСТЕР, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПЛАВНИЙ ПУСК, ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРУТИ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.

Вступ

«АрселорМіттал Кривий Ріг» (до 1991 р. — Криворізький металургійний завод ім. Леніна, до 2005 р. — «Криворіжсталь», у 2005–2007 рр. — «Міттал Стіл Кривий Ріг») — металургійний комбінат; публічне акціонерне товариство; найбільше підприємство гірничо-металургійного комплексу України (частка на ринку металопродукції — 20 %). Працює у складі міжнародної корпорації АрселорМіттал — найбільшого іноземного інвестора в Україні.

Діяльність підприємства охоплює весь виробничий ланцюжок від видобутку залізної руди та виробництва коксу до виготовлення готової металопродукції. «АрселорМіттал Кривий Ріг» спеціалізується на виробництві довгомірного прокату, зокрема, арматури й катанки, сортового прокату, кутиків, смуги та заготовки. Виробничі потужності комбінату, що має повний виробничий цикл, розраховані на щорічний випуск понад 6 млн тон сталі, більше 5 млн тон прокату й понад 5,5 млн тон чавуну.

«АрселорМіттал Кривий Ріг» це унікальне у своєму роді і масштабах підприємство з повним металургійним циклом, що дозволяє мінімізувати купівлю сировини у сторонніх партнерів. До складу підприємства входять:

- шахтоуправління гірничого департаменту з підземного видобутку руди;
- гірничо-збагачувальний комплекс гірничого департаменту (раніше — Ново-криворізький ГЗК), до складу якого входять два кар'єри (№ 3 та № 2-біс), дві рудозбагачувальні фабрики (РОФ-1, РОФ-2), чотири дробильні фабрики (ДФ-1, ДФ-2, ДФ-3, ДФ-4);
- три агломераційних цехи;
- коксохімічне виробництво;
- металургійне виробництво: два доменні цехи, конвертерний цех, блюмінг, три прокатні цехи.

Виробництво офлюсованого агломерату для доменних цехів комбінату пов'язане з необхідністю удосконалення усіх виробничих процесів агломераційних цехів. Одним з найбільш енергоємних механізмів агломераційного цеху є ексгаустер, який є невід'ємною частиною системи газоочищення.

Доцільність розробки міроприємств, направлених на покращення робочих показників ексгаустерів агломераційного цеху підтверджується виконанням на вимогу замовника проєкту "Реконструкція будівель і споруд комплексу агломашин №1-3 агломераційного цеху №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Пускові процеси потужних електроприводів створюють значний вплив на техніко-економічні показники підприємства, який тим відчутніший, чим більша встановлена потужність електроприводу. Це пов'язано зі значним зростанням ресурсних витрат у пускових режимах. Складний, багатовекторний характер впливу, що чиниться пусковими процесами потужних електроприводів, зумовив відсутність теоретичних розробок, присвячених керуванню пусковими процесами і апаратної реалізації пускових пристроїв, які оптимізують пускові процеси потужних електроприводів.

Універсальним технічним рішенням, що дозволяє впливати на ресурсні витрати пускових процесів, є використання пускових пристроїв електроприводів, параметри і режим роботи яких впливають на технічний ресурс обладнання всіх видів, на періодичність планових ремонтів, виключає нераціональне енергоспоживання.

**Розділ 1 Технологія виробництва агломерату та електроме-
нічне обладнання системи газоочищення агломераційного цеха №2
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»**

1.1 Технологія виробництва агломерату

Технологічний процес виробництва агломерату включає такі операції:

- доставка вихідних сировинних матеріалів залізничним і автомобільним транспортом на станцію розвантаження;
- приймання і дозування сировинних матеріалів у корпусі шихтових бункерів;
- змішування дозованих сировинних матеріалів у корпусі первинного змішування;
- огрудкування шихти в корпусі агломерації №2;
- укладання шихти на агломашини;
- спікання агломерату на агломашинах;
- дроблення спеченого агломерату в щоківій дробарці;
- виділення гарячого повернення і сортового агломерату на грохоті;
- охолодження агломерату на лінійному охолоджувачі;
- виділення холодного повернення і сортового агломерату на грохоті;
- транспортування агломерату в бункери навантаження агломерату і в залізничні вагони;
- доставка агломерату в доменний цех заводу.

Очищення газоповітряних викидів в атмосферу здійснюється апаратами різної конструкції, що використовують "мокрі" методи очищення. Уловлений очисними системами пил у вигляді шламів надходить у відстійники, звідти згущений шлам повертається в процес.

Загальна кількість викидів від джерел агломераційного цеху № 2 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", за наявним станом, пов'язана з експлуатацією застарілого та фізично зношеного устаткування, з веденням технологічних процесів за старою технологією, що не відповідає екологічним нормам.

Для забезпечення захисту довкілля від викидів шкідливих речовин проєктними рішеннями передбачено реконструкцію будівель і споруд комплексу агломашин №1-3 агломераційного цеху № 2 з метою збільшення продуктивності кожної з машин 0,85 млн. тон агломерату на рік.

1.2 Напрямки удосконалення існуючої системи газоочищення

За час, що минув з моменту останньої реконструкції цеху, змінилися екологічні вимоги до викидів забруднювальних речовин в атмосферу та умов праці на робочих місцях, устаткування цеху фізично зносилось і морально застаріло.

Технологічне газоочищення пилогазового потоку агломашин у теперішній час здійснюється наступним чином:

- очищення від великих фракцій у вакуум-колекторі, з поверненням уловленого пилу в технологічний процес стрічковими конвеєрами;
- наступний ступінь очищення великої та середньої фракцій відбувається в групі одиночних циклонів (10 шт.);
- очищення дисперсного пилу, що залишився, відбувається в трубах Вентурі і скруберах - краплеловлювачах.

Уловлений пил видаляється гідрозмивом, шламовими лотками і шламопроводами, у шламовідстійник.

Реконструкцією технологічного газоочищення агломашин № 1, № 2 і № 3 передбачається застосування апаратів сухого газоочищення - електростатичних фільтрів.

Проектована система газоочищення містить у собі:

1. Газоходи "брудного" газу, що прокладаються від нових колекторів агломашин до електростатичних фільтрів. Газоходи мають умовний діаметр від 3000 до 3800 мм. На газоходах встановлюються компенсатори та опори. Газоходи теплоізолюються по всій довжині.

2. Електростатичні фільтри компанії "FLS" (Данія), продуктивністю 12000 м³/хв.

3. Газоходи чистого газу, що прокладаються від електростатичних фільтрів до ексгаустерів. На газоходах встановлюються нові дросель-клапани, для можливості запуску ексгаустерів і регулювання продуктивності системи газоочищення. На газоходах встановлюються компенсатори та опори. Газоходи теплоізолюються по всій довжині.

4. Ексгаутери 9000-11-5. Зношені наявні ексгаутери, в рамках виконаної реконструкції, замінюються новими. Ексгаустер забезпечує розрідження у вакуум-камерах агломашини і долає аеродинамічний опір газового тракту, включаючи електростатичний фільтр.

5. Наявні борови за ексгаустерами і викидні труби, висотою 120 м, зберігаються і використовуються для викиду газів від роботи шести агломашин.

Таким чином, у технологічному процесі виробництва агломерату важливі функції виконує ексгаустер, який впливає не тільки безпосередньо на процеси спікання агломерату, а й задіяний у схемі технологічного газоочищення.

1.3 Основні технологічні параметри роботи ексгаустера

Агломераційні установки складаються з двох основних елементів: агломераційних машин і ексгаустерів, що забезпечують засмоктування в шар, що

спікається, потрібної кількості повітря та відсмоктування продуктів хімічних реакцій, у результаті чого створюються сприятливі умови для нормального перебігу процесу агломерації.

Експаустер належить до типу відцентрових вентиляторів, що мають гідравлічний опір на всмоктувальному тракті. Він складається з двох основних частин: корпусу і обертового колеса - ротора. Корпус експаустера має три патрубки (два всмоктувальних і вихлопний), розташовані по дотичній до кола ротора. Робоче колесо складається з центрального диска і двох бічних покриттів, між якими розташовані лопатки.

Газ, що потрапляє в осьову частину ротора, потрапляє в міжлопаткові канали і рухається в них за траєкторією, що нагадує спіраль, яка розкручується.

У результаті збільшення швидкості руху газу в міру переміщення його до зовнішнього діаметра ротора кінетична енергія газу зростає. Різниця кількостей енергії газу на вході в експаустер і на виході з нього являє собою напір, що розвивається експаустером.

Рівняння, що дає змогу визначати напір, який розвиває відцентровий вентилятор (експаустер), називається основним рівнянням відцентрового вентилятора. Під час виведення рівняння, зробленого відомим російським математиком Л. Ейлером, зроблено припущення, що втрати на тертя усередині потоку і під час його зіткнення з робочим колесом відсутні, а робоче колесо має нескінченно велике число лопаток із нескінченно малим кроком:

$$H_T = \psi \rho \left(\frac{\pi D n}{60} \right)^2 \quad (1.1)$$

де ψ - коефіцієнт форми лопаток ротора.

З рівняння (1.1) випливає, що величина теоретичного напору відцентрового вентилятора (експаустера) пропорційна густині газу в першому ступені, зовнішньому діаметру ротора та швидкості його обертання в другому.

1.4 Технічні характеристики ексгаустера 9000-11-5

Ексгаустер відцентровий типу 9000-11-5 призначений для просочування повітря через шар шихти, що спікається на агломашині, і видалення агломераційних газів, що утворюються, під час сухого газоочищення. Основні параметри ексгаустера наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 Технічні характеристики ексгаустера 9000-11-5.

| Найменування параметра | Значення |
|--|----------|
| 1. Продуктивність об'ємна (по вологому газу) віднесена до початкових умов, м ³ /с | 200 |
| 2. Продуктивність вагова, кг/с | 157,5 |
| 3. Підвищення тиску (різниця між абсолютними статичними початковим та кінцевим тиском), МПа | 0,01324 |
| 4. Потужність ексгаустера, кВт | 3250 |
| 5. Політропний ККД % | 81,5 |
| 6. Тиск газу, початковий абсолютний, при вході у всмоктуючий патрубок ексгаустера, МПа | 0,09316 |
| 7. Температура газу початкова при вході у всмоктуючий патрубок ексгаустера, °С | 150 |
| 8. Щільність сухого газу при 20 °С та тиску 0,1013 МПа, кг/м ³ . | 1,24 |
| 9. Частота обертання ротора ексгаустера, 1/с | 21 |

На рис. 1.1 наведено напірну характеристику ексгаустера 9000-11-5.

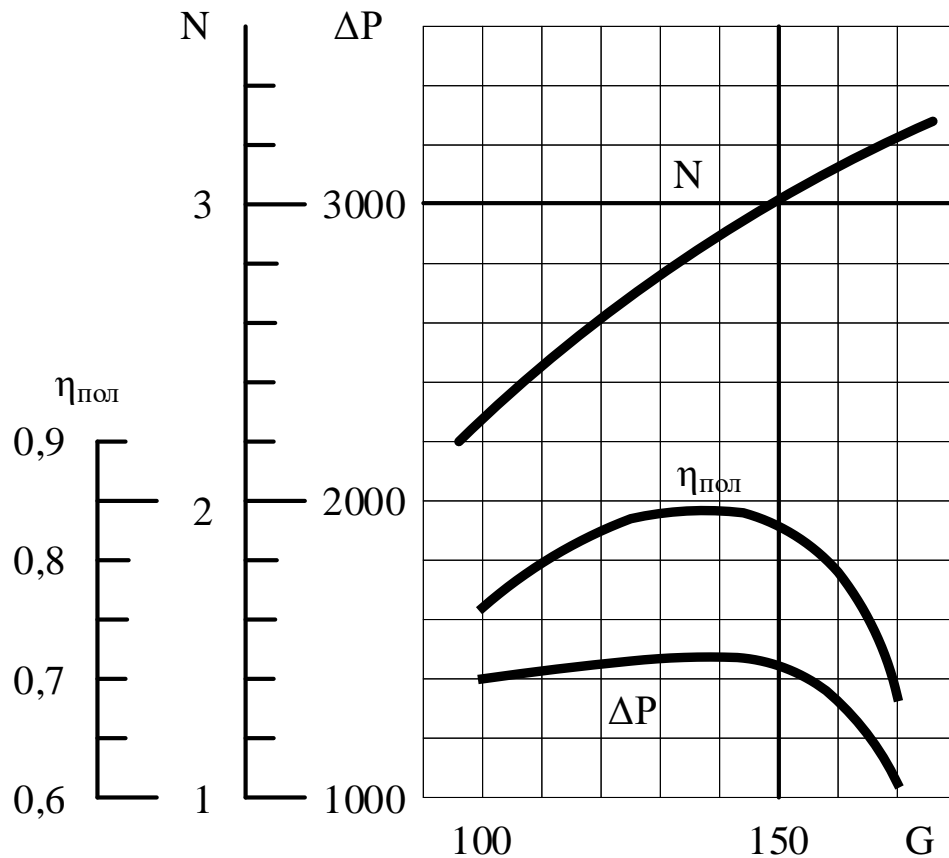


Рисунок 1.1 – Напірна характеристика ексгаустера 9000-11-5.

На рис.1.1 прийнято такі позначення: G - продуктивність вагова сухого газу, кг/с; ΔP – підвищення тиску, мм.вод.ст.; $\eta_{\text{пол}}$ – ККД політропний; N – споживана потужність, кВт.

Нормальні умови роботи ексгаустера наведено у табл.1.1.

1.5 Технічні характеристики приводного електродвигуна

У якості приводного двигуна обрано асинхронний електродвигун типу 1RQ76366JA800 CGO-Z SIMOTICS HV M, виробництва SIEMENS, з наступними технічними характеристиками, табл.1.2.

Таблиця 1.2 Технічні характеристики електродвигуна
1RQ76366JA800CGO-Z SIMOTICS HV M

| I. Загальні відомості. | | |
|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. | Виробник та його місцезнаходження | SIEMENS, м. Драсов, країна Чехія |

| | | |
|----|---|---|
| 2. | Найменування, модель та тип виробу | ДВИГУН ЗМІННОГО СТРУМУ 1RQ76366JA800CGO-Z SIMOTICS HV M |
| 3. | Заводський номер | DVY/15656681301 |
| 4. | Технологічний номер | 6 |
| 5. | Рік виготовлення | 2019 |
| 6. | Призначення | Двигун приводу ексгаустера |
| 7. | Відповідність виробу загальним вимогам нормативних документів | IEC 60034-1 |

II. Технічні дані.

| 1. | Найменування показників | Одиниці вимірювання | Значення |
|-----|--|----------------------------|----------------------|
| 2. | Потужність | кВт | 3 500 |
| 3. | Напруга живлення | В | 10 000 |
| 4. | Частота мережі | Гц | 50 |
| 6. | Номінальний струм | А | 245 |
| 7. | Швидкість обертання валу | об/хв | 994 |
| 8. | Напрямок обертання | Проти годинникової стрілки | |
| 9. | Коефіцієнт потужності | cos φ | 0,85 |
| 10. | Коефіцієнт корисної дії | ККД, % | 96,9 |
| 11. | Тип | - | МOT |
| 12. | Ступінь захисту обладнання | IP | 55 |
| 13. | Схема з'єднання обмоток статор/ротор | | Y/Y |
| 14. | Режим тривалості роботи | - | S1 |
| 15. | Клас допустимої стійкості ізоляції | - | F (155° C) |
| 16. | Клас тривалої стійкості ізоляції | - | B (130° C) |
| 17. | Середовище охолодження | вид | Повітряне, примусове |
| 18. | Вимоги конструктивного виконання | - | IM B3/IM 1001 |
| 19. | Висота встановлення над рівнем моря, м | | До 1 000 |
| 20. | Вага ротора | кг | 4 292 |
| 21. | Момент інерції ротора | кг·м ² | 248,1 |
| 22. | Загальна вага | кг | 14700 |



Рисунок 1.2 - Загальний вигляд двигуна
1RQ7 636-6JA80-0CG0-Z SIMOTICS HVM

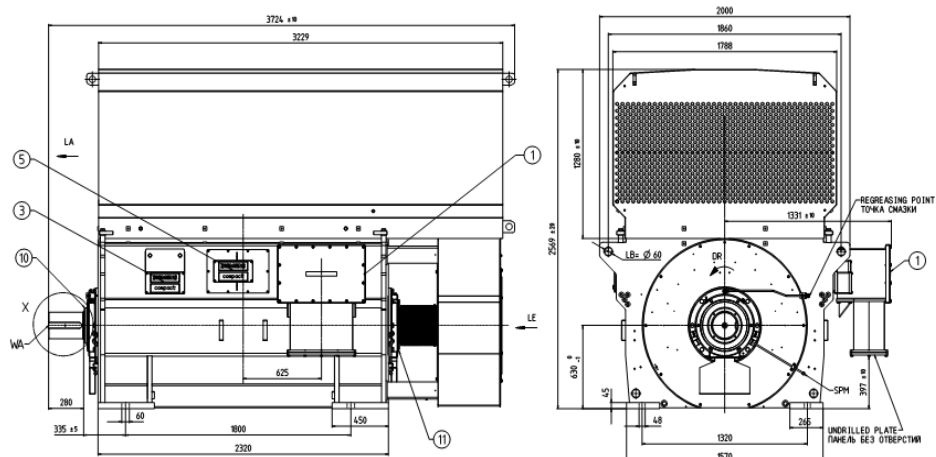


Рисунок 1.3 – Креслення двигуна 1RQ7 636-6JA80-0CG0-Z SIMOTICS HVM

1 – розподільча коробка, 3 - розподільча коробка моніторингу, 5 - розподільча коробка мережі підігріву, 10, 11 - підшипники.

Розміщення коробки місця виводів обмоток статора, розташованої на правій стороні двигуна, відносно зі сторони робочого кінця валу.

1.6 Вплив процесів пуску потужних електроприводів на надійність електромеханічного та технологічного обладнання

Періодичні пускові процеси потужних електроприводів створюють значний вплив на різноманітні аспекти функціонування технологічного та електромеханічного обладнання. Процеси пуску електроприводів зумовлюють збільшений рівень енергоспоживання, зменшують надійність і технічний ресурс обладнання, призводять до підвищення аварійності електромеханічного обладнання та технологічного обладнання, збільшують витрати на обслуговування устаткування.

Наведемо грубу оцінку впливу пускових процесів на надійність обладнання. Згідно з [1], кількість прямих асинхронних пусків СД до його повного виходу з ладу складає $N = 450 - 550$. Виходячи з початкової вартості СД (прийнято дані для нового СД потужністю 3,5 МВт), отримуємо такий результат:

$$\text{Вартість пуску} \approx (25\,000\,000 \text{ грн}) / (500 \text{ пусків}) \approx 50\,000 \text{ грн}$$

Аналіз аварійних ситуацій на підприємствах гірничорудного та хімічного виробництв, виконаний у роботах [1-6], дозволяє констатувати негативний вплив прямих пусків нерегульованих електроприводів на працездатність електромеханічного обладнання та технологічних механізмів.

На гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького залізорудного басейну 70 % від загальної кількості виходів з ладу СД відбувається внаслідок руйнування пускової обмотки в процесі асинхронного пуску і коротких замикань у статорі [7].

Аналіз аварійності електромеханічного та технологічного обладнання насосних станцій системи оборотного водопостачання Полтавського ГЗК

показує [6], що майже половина аварійних ситуацій відбувається через часті пуски і зупинки насосного обладнання.

Основною причиною відмов АД і СД є пошкодження обмотки статора унаслідок пробоя ізоляції обмотки [8, 9]. Процес руйнування ізоляції суттєво прискорюється з концентрацією навантажень під час пускових процесів: підвищенні механічних зусиль, значного термічного впливу пускових струмів, підвищенні рівня вібрації та ін.

Другою за важливістю причиною аварійності потужних електроприводів є механічні ушкодження підшипникових вузлів [9, 10]. Вихід з ладу підшипникових вузлів безпосередньо пов'язаний з дією знакозмінних складових рушійного моменту, що виникає під час пуску електроприводу.

Інтенсивне зношування вузлів і елементів електроприводу відбувається саме під час пуску електроприводу. Процеси вібраційного і теплового старіння найбільше проявляються в умовах важкого пуску.

Неідеальність мереж електропостачання, а саме – відхилення фактичних параметрів напруги живлення від номінальних значень, наявність несиметрії фазних напруг, складний гармонійний склад напруги – усе це різною мірою знижує створюваний електродвигуном рушійний момент, збільшує тривалість процесу пуску, погіршує умови роботи ізоляційної конструкції електродвигуна, а, отже, впливає на його надійність і технічний ресурс.

Як відомо, зменшення напруги живлення супроводжується квадратичним (для АД) або лінійним (для СД і ДПТ) зменшенням рушійного моменту, що розвивається електроприводом.

Режим роботи електроприводу в умовах несиметричного живлення якісно відрізняється від режиму симетричного живлення, оскільки електромагнітний момент, який створюється струмами зворотної послідовності, є гальмівним. Отже, несиметрія напруг джерела живлення призводитиме до збільшення часу процесу пуску, додаткового нагрівання електродвигуна [11].

Несиметрія напруги живлення не тільки погіршує пускові характеристики електроприводу, а й суттєво впливає на його надійність і технічний ресурс. Так, термін служби повністю завантаженого асинхронного двигуна, що працює з несиметрією напруги 4%, скорочується в 2 рази [12].

Аналіз науково-технічної літератури показує, що процеси пуску технологічного обладнання також призводять до зменшення його надійності.

Так, спостереження за роботою електроприводів землесосів НП–800 на Полтавському ГЗК показали, що під час важких пусків інтенсивному зношуванню піддається не тільки електропривод, але і сам технологічний механізм [13].

Отже, аналіз сучасної науково-технічної літератури дозволяє констатувати висновок, що процеси пуску значно впливають на надійність і залишковий технічний ресурс електромеханічного та технологічного обладнання. Причому незначні за своєю тривалістю пускові процеси супроводжуються непропорційно значним впливом на надійність і технічний ресурс обладнання.

Виконаний аналіз наукової літератури показав, що процеси пуску потужних електроприводів створюють суттєвий негативний вплив на технічний стан електромеханічного й технологічного обладнання та його залишковий технічний ресурс, пов'язаний як з особливими тепловими режимами роботи ізоляційних конструкцій електродвигуна, так і з механічним впливом змінних складових пускового моменту на елементи механічної трансмісії.

1.7 Високовольтний пристрій плавного пуску HRVS-DN

Для зменшення впливу пускових процесів на технічний стан електромеханічного обладнання ексгаустера 9000-1 1-5 було прийнято рішення про використання високовольтного пристрою плавного пуску типу HRVS-DN.

HRVS-DN являє собою складний і високонадійний пристрій плавного пуску (ППП), розроблений для використання зі стандартними трифазними

асинхронними електродвигунами високої напруги з короткозамкненим ротором.

ППП забезпечує оптимальний спосіб зниження струму та моменту під час пуску двигуна. HRVS-DN запускає двигун шляхом подання на нього повільно наростаючої напруги, забезпечуючи м'який пуск і плавний розгін за допомогою мінімального струму, необхідного для запуску двигуна.

Друге покоління цифрової мікропроцесорної техніки надає унікальні можливості з управління насосом, надійного захисту двигуна і отримання інформації з аналогового виходу (опція).

Плата послідовного зв'язку RS485 (опція) з протоколом MODBUS забезпечує повне керування (пуск, зупинка, альтернативне налаштування, команди тощо) і отримання інформації. т.д.) і отримання інформації. До керуючого комп'ютера можна підключити до 32 пускачів за допомогою екранованої крученої пари дротів.

Виберіть пускач відповідно до номінального струму двигуна І_{дн} (FLA), зазначеним на його заводській табличці (навіть якщо двигун не буде повністю завантажений).

Пускач HRVS-DN розрахований на роботу за таких умов

- Максимальна навколишня температура: 50°C
- Максимальний пусковий струм: 400% від І_{дн}
- Максимальний час пуску: 30 с. (при 400% І_{дн})
- Максимальна кількість пусків на годину: 2 пуски на годину за макси-

мальних умов.

Режими перевірки:

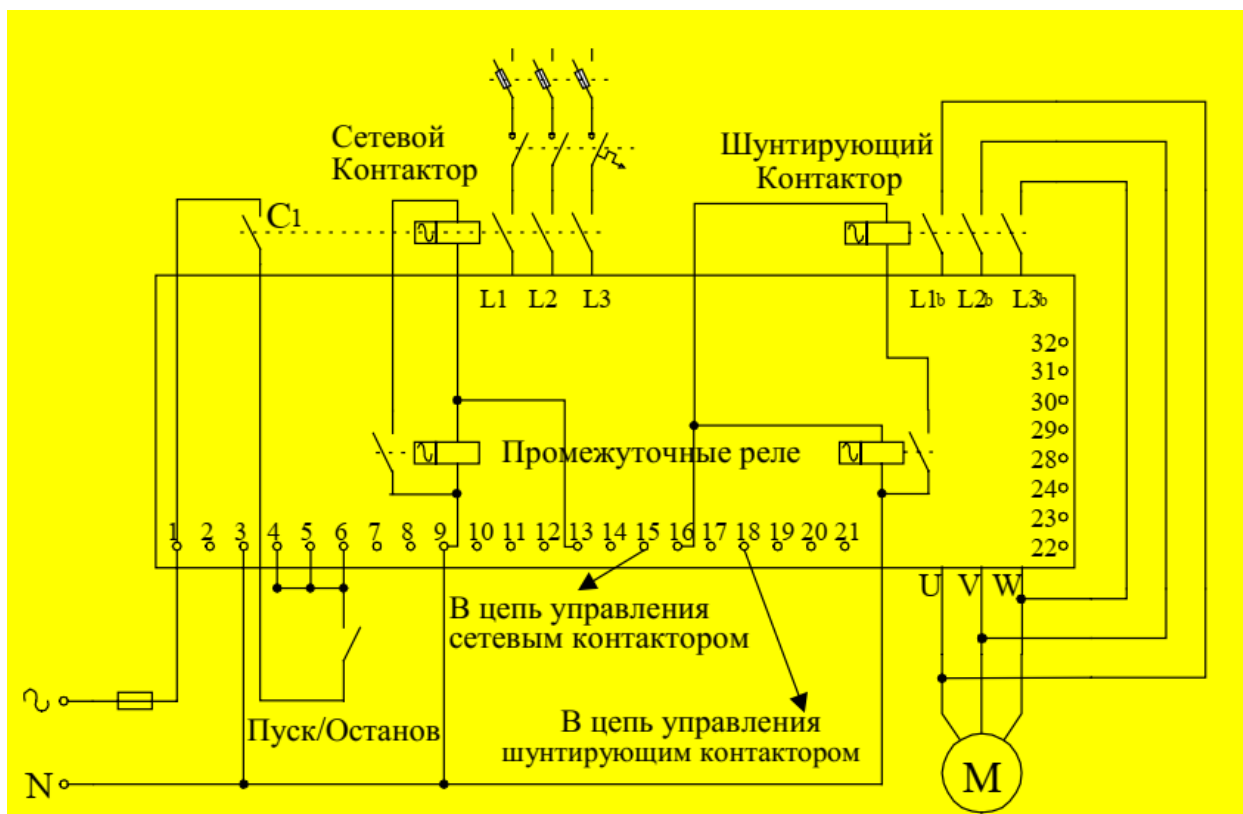
Є три режими перевірки пристрою плавного пуску:

1. Перевірка м'якого пускача на коректність логічних операцій без підключення високої напруги.

2. Тестування ППП з низьковольтним двигуном 400В. (Для цього необхідний тестувальний шнур і зміна масштабу вхідного струму за допомогою спеціальних мікроперемикачів)

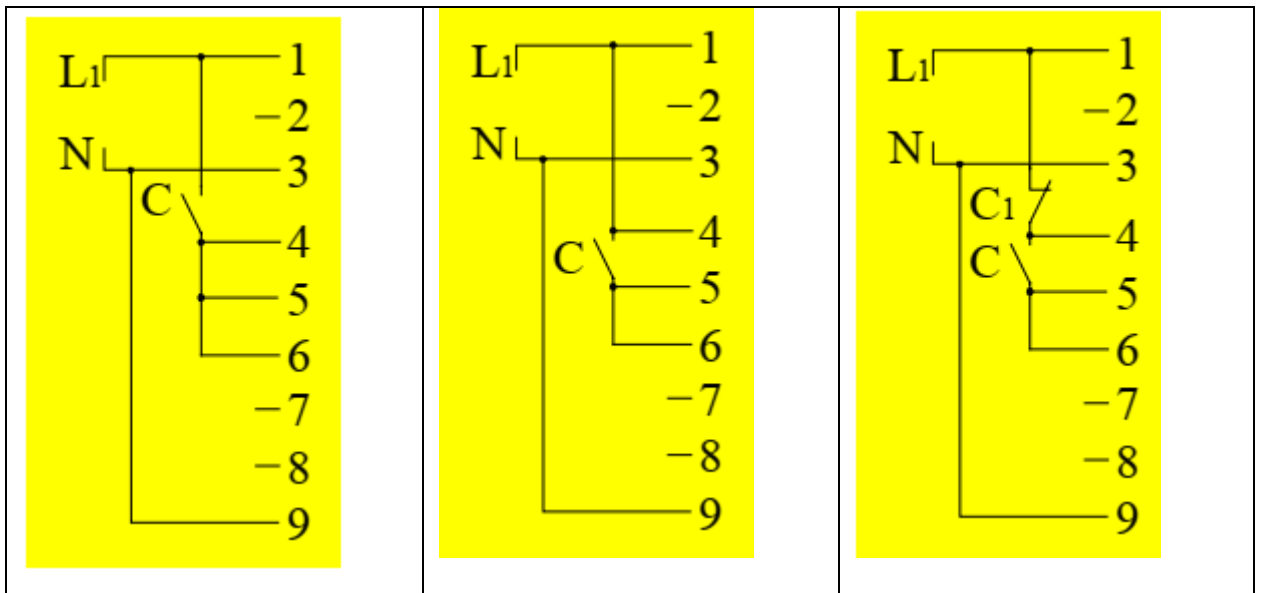
3. Тестування системи керування тиристорами (необхідна тільки напруга живлення для системи керування)

Схеми підключення.



Підключення кіл керування.

| | | |
|--|--|---|
| <p>1. Двигун плавно запускається в разі замикання С і відразу зупиняється в разі розмикання С.</p> | <p>2. Двигун плавно запускається і плавно зупиняється за допомоги С.</p> | <p>3. Двигун плавно запускається і плавно зупиняється за допомоги С. С1 використовується як аварійна зупинка.</p> |
|--|--|---|



Параметри пуску і зупинки

HRVS-DN дає змогу реалізувати 5 різних пускових характеристик:

Крива пуску 0 - основна крива

Крива пуску 1 - Стандартна (за замовчуванням)

Найбільш стабільна і відповідна крива, що запобігає затягнутому пуску і перегріванню двигуна.

Криві пуску 2, 3, 4 - під час розгону, перед досягненням пікового моменту, програма керування насосом автоматично знижує напругу для зменшення кидка моменту.

Крива пуску 5 - Забезпечує лінійне наростання моменту.

За деяких типів навантажень це може спричинити лінійне прискорення.

Імпульсний пуск.

Використовується для пуску навантаження з високим пусковим моментом, що вимагає високий пусковий момент протягом короткого часу.

Імпульс досягає приблизно 80% $U_{ном}$, без обмеження струму для початку руху механізму.

Тривалість імпульсу налаштовується в діапазоні 0.1 - 2 с. Після цього імпульсу напруга знижується до початкової, а потім плавно підвищується до номінальної відповідно до заданих параметрів.

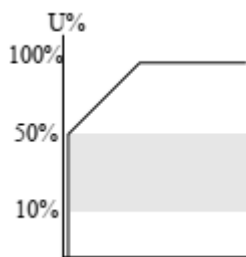
Початкова напруга

Визначає початковий пусковий момент (момент прямо пропорційний квадрату напруги).

Діапазон: 10-50% $U_{ном}$ (зв'яжіться з виробником за необхідності розширення цього діапазону).

Це налаштування визначає кидок струму та механічний удар. Занадто високе налаштування може призвести до сильних механічних ударів і кидків струму (навіть при низькій установці обмеження струму, тому що установка початкової напруги має вищий пріоритет порівняно з установкою обмеження струму).

Занадто низька початкова напруга може призвести до затримки початку обертання двигуна. Як правило, цю напругу встановлюється так, щоб двигун почав обертатися відразу після подачі команди пуску.



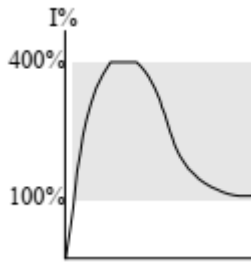
Обмеження струму

Визначає максимальний струм двигуна під час пуску.

Діапазон 100-400% від струму повного навантаження FLA (зв'яжіться з виробником у разі необхідності розширення цього діапазону). Занадто висока установка призведе до споживання більшого струму від мережі та швидшого розгону.

Занадто низьке встановлення не дозволить завершити процес пуску і досягти повної швидкості. Як правило, ця установка вибирається так, щоб запобігти зависанню двигуна під час пуску.

Увага: Обмеження струму не діє під час роботи на повній напрузі та плавному зупиненні.



Час розгону

Визначає час наростання напруги до номінальної.

Діапазон 1-30 с. (зв'яжіться з виробником у разі необхідності розширення цього діапазону).

Рекомендується встановлювати час розгону на мінімально прийнятне значення (приблизно 5 с).

Увага:

1. Якщо в процесі пуску буде досягнуто встановлене обмеження моменту, час пуску може виявитися більшим за встановлений.

2. Якщо двигун досягне повної швидкості до досягнення напругою номінального значення, час розгону буде скорочено і напруга буде швидко доведено до номінального.

Максимальний час пуску.

Максимально допустимий час від сигналу пуску до закінчення розгону. Якщо напруга не досягне номінального значення за цей час (наприклад, через низьке значення обмеження струму), то ППП зупинить двигун. На дисплеї з'явиться повідомлення "Long Start Time".

Діапазон: 1-30 с (зв'яжіться з виробником у разі необхідності розширення цього діапазону).

Види захистів.

ППП забезпечує такі види захистів:

- Перевищення кількості пусків - компанією Siemens для приводного двигуна ексгаустера узгоджена можливість 2 пусків з холодного стану і 1 пуску з гарячого стану.

- Заборона Пуску в період часу 1-60 хв, після помилки щодо перевищення кількості стартів, протягом якого пуск неможливий.

- Тривалий час пуску - компанією Siemens для приводного двигуна ексгаустера підтверджено можливий час пуску 95 сек за струму ≤ 1100 А.

- Перевантаження за струмом - дві функції: під час пуску при досягненні 850% від номінального струму і під час роботи в діапазоні 100-850% від номінального струму, в обох випадках протягом 1 циклу.

- Електронне перевантаження - згідно з класифікацією ІЕС: 5, 10, 15, 20, 25, 30.

- Знижений струм - вимкнення при зниженні струму до 20-90% від $I_{ном}$ з часовою затримкою 1-40 сек.

- Знижена напруга - вимкнення в разі зниження напруги до 50-90% від $U_{ном}$. Часова затримка 1-10 сек.

- Перенапруження - вимкнення в разі збільшення напруги понад 110-125% від

$U_{ном}$. Тимчасова затримка 1-10 сек.

- Втрата фази - вимкнення за відсутності однієї або двох фаз.

- Порядок фаз - вимкнення в разі неправильної послідовності фаз.

- Неправильне підключення або Пробій Тиристора - запобігання запуску, якщо двигун не під'єднаний або під'єднаний неправильно чи один і більше тиристорів пробиті.

- Перегрів радіаторів - вимкнення в разі перевищення температури радіаторів понад 85°C.

- Асиметрія струмів - вимкнення в разі дисбалансу струмів вище встановленого значення протягом заданого часу затримки

- Увімкнення живлення без сигналу пуску - вимкнення після подавання напруги на три фази ППП і відсутності сигналу Пуску протягом 30 сек.

- Відсутність замикання шунтувального вимикача - вимкнення, якщо не замкнуті одна або дві фази контактора, що шунтує.

Робота захистів двигуна забезпечується також у разі замкненого вимикача байпаса.

Висновки до розділу 1

У першому розділі визначено найважливіші чинники впливу процесів пуску потужних електроприводів на надійність і залишковий технічний ресурс електромеханічного та технологічного обладнання. Встановлено, що збільшення експлуатаційних навантажень призводить до непропорційно значного збільшення зношування та скорочення технічного ресурсу технологічного та електромеханічного обладнання.

Розділ 2 Розробка математичної моделі системи плавного пуску електропривода ексгаустера з тиристорним регулятором напруги

2.1 Розрахунок параметрів математичної моделі електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5

2.1.1 Розрахунок електромагнітних параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна типу 1RQ7 636-6JA80-0CG0-Z

За паспортними даними, наведеними у розділі 1.5, знаходимо параметри схеми заміщення.

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{\text{ном}} = n_{\text{ном}} \cdot \frac{\pi}{30} = 104,37 \text{ 1/с}$$

Кутова швидкість холостого ходу:

$$\omega_0 = n_0 \cdot \frac{\pi}{30} = 104,72 \text{ 1/с}$$

Номінальне ковзання:

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = 0,006 = 0,6 \%$$

Номінальний крутний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 1000 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = 33535 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номінальний струм статора розраховуємо за формулою:

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{1\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_{\text{н}}} = 245,34 \text{ А}$$

де P_H – номінальна потужність двигуна;

U_{1H} – номінальна фазна напруга;

η_H – номінальний к.к.д.;

$\cos\varphi_H$ – номінальний коефіцієнт потужності.

Ці значення співпадає з наведеним у паспортних даних приводного двигуна.

Визначаємо струм статора при 75% навантаженні:

$$I_{1p} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \eta_{p_*} \cdot \cos\varphi_{p_*}} = 189,52 \text{ A}$$

де $p_* = P/P_H$ – коефіцієнт завантаження двигуна;

η_{p_*} – ККД при частковому завантаженні;

$\cos\varphi_{p_*}$ – коефіцієнт потужності при частковому завантаженні;

Сучасні асинхронні двигуни проектуються таким чином, що найбільший ККД досягається при завантаженні на 10-15% менше номінального. Двигуни розраховуються так, тому що більшість з них в силу стандартної дискретної шкали потужностей працюють з деяким недозавантаженням. Тому ККД при номінальному навантаженні і навантаженні $p_* = 0,75$ практично рівні між собою, тобто:

$$\eta_H = \eta_{0,75}$$

Коефіцієнт потужності при тому ж навантаженні $p_* = 0,75$ сильно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, причому ця відмінність в значній мірі залежить від потужності двигуна і для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю підпорядковується залежності, приведеній на рисунку 2.2.

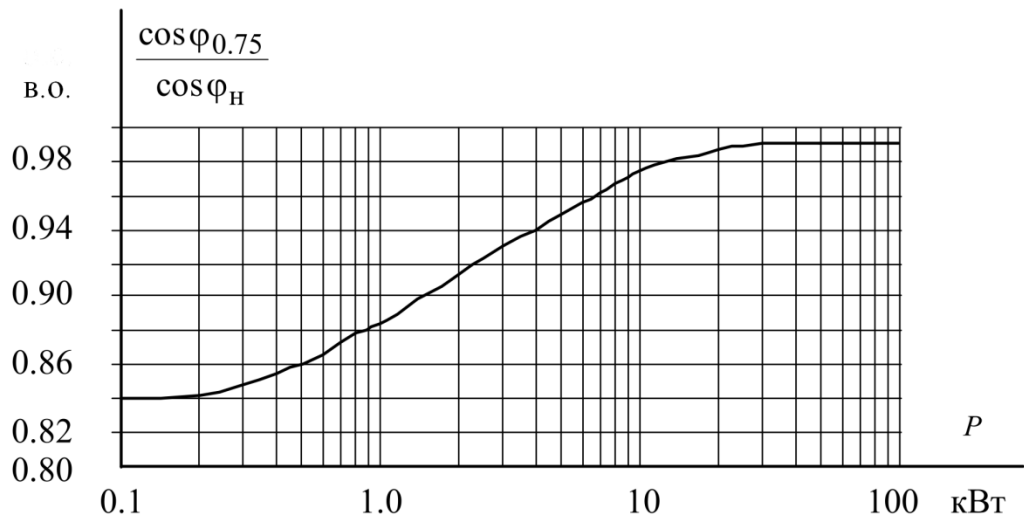


Рисунок 2.2 - Залежність $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$ від потужності асинхронного двигуна

З вище приведеної залежності маємо, що для двигуна ексгаустера:

$$\cos \varphi_{0,75} \approx \cos \varphi_H;$$

Визначаємо струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - I_{1H}^2 \cdot [p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H)]^2}{1 - [p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H)]^2}} = 70,63 \text{ A}$$

де I_{1H} – номінальний струм статора;

I_{1p} – струм статора при 75% навантаженні;

s_H – номінальне ковзання.

Струм холостого ходу складає близько 30% від номінального.

Визначаємо критичне ковзання:

$$s_k = s_H \frac{(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_m - 1)]})}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_m - 1)} = 0,0241 = 2,41 \%$$

де k_m – перевантажувальна здатність двигуна;

β – коефіцієнт, значення якого лежить у межах 0,6-2,5 (для асинхронних двигунів серії 4A $\beta = 1.3$);

Визначаємо коефіцієнт C_I :

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_I \cdot I_{1H}} = 1,026$$

де k_I – кратність пускового струму;

Визначаємо коефіцієнт A_I :

$$A_1 = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_m \cdot P_H} = 6,5906$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора АД:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_H) \cdot C_1} = 0.1502 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 0.2004 \text{ Ом}$$

Визначимо параметр γ , який дозволяє знайти індуктивний опір короткого замикання R_{2k} :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2)^2 - \beta^2} = 41,44$$

Тоді:

$$X_{кн} = \gamma \cdot R_2' \cdot C_1 = 6,387 \text{ Ом}$$

Для того, щоб виділити з індуктивного опору короткого замикання L_{2k} опори розсіювання фаз статора L_1 та ротора L_2 , скористаємося співвідношеннями, які справедливі для серійних асинхронних двигунів.

Індуктивний опір розсіювання фази роторної обмотки, приведеної до статорної, може бути розрахований за формулою:

$$X_2' = 0.58 \cdot X_{кн} / C_1 = 3.6106 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання фази статорної обмотки може бути розрахований за наступною формулою:

$$X_1 = 0.42 \cdot X_{кн} = 2.6826 \text{ Ом}$$

ЕРС ланки намагнічування E_m , наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора у номінальному режимі, дорівнює:

$$E_m = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos\varphi_H - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi_H} - X_1 \cdot I_{1H})^2} = 5412 \text{ В}$$

Тоді індуктивний опір контуру намагнічування буде дорівнювати:

$$X_{\mu} = E_m / I_0 = 77,13 \text{ Ом}$$

2.1.2 Визначення параметрів вентиляторного моменту опору

Спираючись на формулу Бланка, запишемо вираз для вентиляторного моменту опору ексгаустера у вигляді:

$$T_L = T_R \cdot (0.1 + 0.9 \cdot \alpha \cdot \omega^2)$$

де T_R – номінальний крутний момент електродвигуна; коефіцієнт пропорційності α визначаємо за даними номінального режиму роботи електроприводу:

$$\alpha = \frac{0.9 \cdot T_R}{\omega_R^2} = 2.77$$

Остаточно отримаємо такий вираз для вентиляторної характеристики моменту опору ексгаустера:

$$T_L = 3350 + 2.77 \cdot \omega^2$$

2.1.3 Сумарний момент інерції електроприводу

Сумарний момент інерції, приведений до валу електропривода, визначається з урахуванням моментів інерції усіх обертальних частин та коефіцієнтів передачі редукторів.

З технічних характеристик електродвигуна та ексгаустера визначаємо коефіцієнт редукції швидкості:

$$i = \frac{104.37}{21} = 4.97$$

Сумарний момент інерції, приведений до валу електропривода, визначається за виразом:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{ДВ}} + J_{\text{Е}} / i^2$$

де $J_{\text{ДВ}}$, $J_{\text{Е}}$ – відповідно моменти інерції двигуна та ексгаустера. Підставляючи числові значення отримаємо:

$$J_{\Sigma} = 248.1 + 7583 / 4.97^2 = 555 \text{ кгм}^2$$

Остаточно приймаємо з урахуванням дії неврахованих з'єднувальних муфт $J_{\Sigma} = 600 \text{ кгм}^2$

2.2 Математичне моделювання асинхронного двигуна типу 1RQ7 636-6JA80-0CG0-Z

Математична модель асинхронного двигуна з урахування вентиляторного характеру моменту опору з використанням елементів бібліотеки SimPower наведена на рис.2.1.

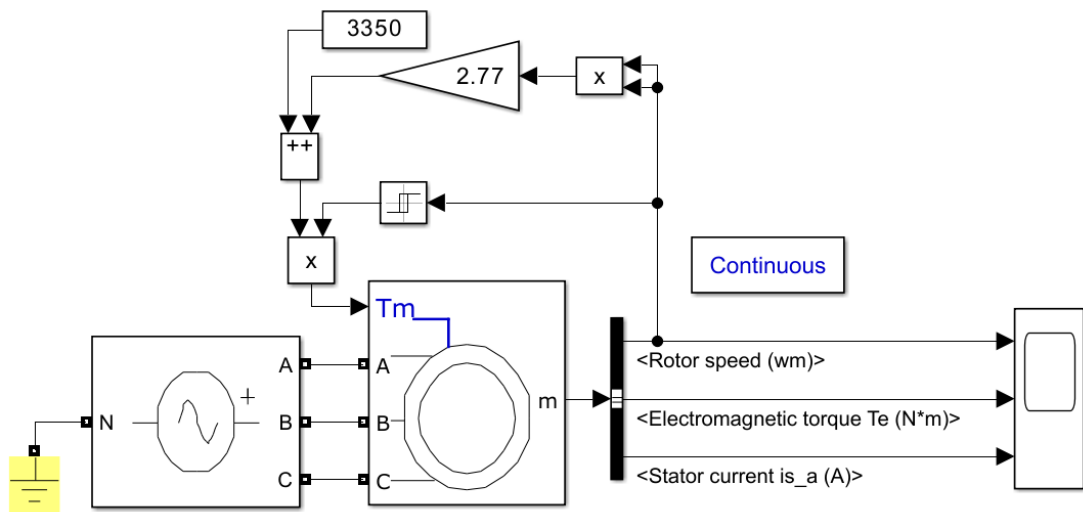


Рисунок 2.1 - Математична модель асинхронного двигуна ексгаустера з урахування вентиляторного характеру моменту опору

Отримані результати розрахунків прямого пуску при повністю відкритій засувці ексгаустера наведено на рис.2.2.

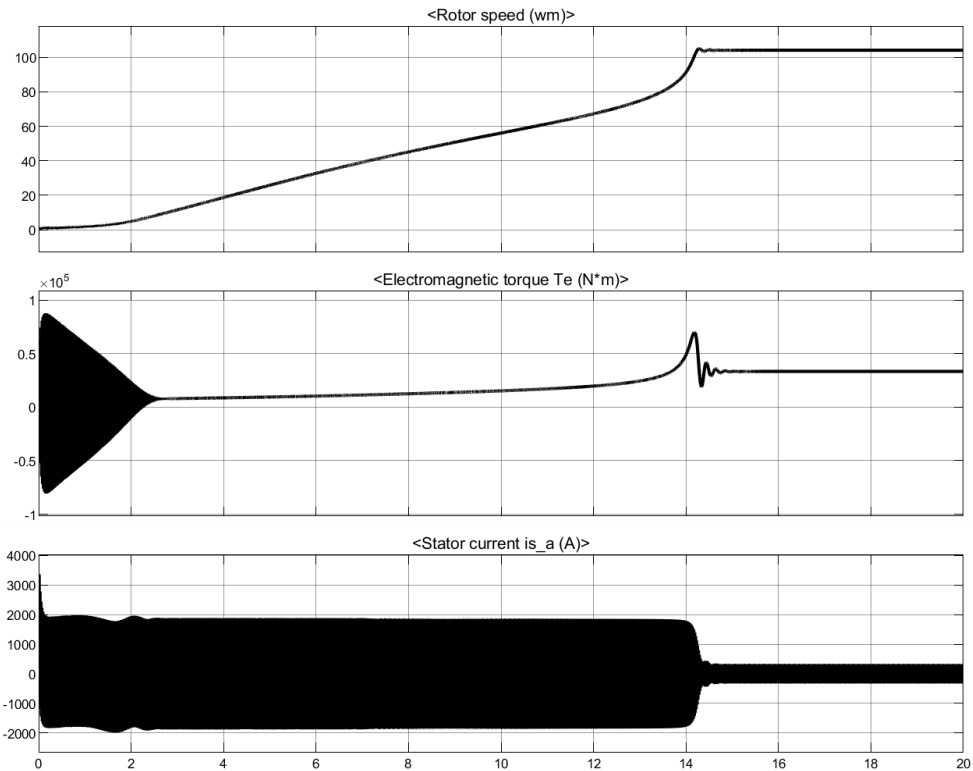


Рисунок 2.2 – Прямий асинхронний пуск електроприводу ексгаустера з вентиляторним моментом опору

Тривалість процесу прямого асинхронного пуску складає 14,75 с. Значення пускового та номінального струмів, максимального крутного моменту двигуна в процесі пуску співпадають з паспортними даними двигуна, що підтверджує адекватність роботи математичної моделі.

2.3 Розробка математичної моделі енергоспоживання в процесі керованого пуску електропривода ексгаустера

Проблема кількісного оцінювання енергоспоживання у процесі пуску пов'язана насамперед з відсутністю чітких, узгоджених визначень для активної, реактивної та повної електричної енергії, що споживається під час запуску.

Процес прямого пуску потужних електроприводів змінного струму характеризується наявністю несинусоїдальних, неперіодичних і несиметричних

струмів статора. Однак у сучасній теоретичній електротехніці не існує загально визнаних методів визначення енергоспоживання за таких складних умов.

Визначення повної потужності для незбалансованих багатofазних систем вважається однією з найбільш спірних тем в електротехніці. Спочатку термін «повна потужність» виник просто як оцінка якості системи. Формування концепції приписуються В. Стенлі та Ч. Штейнметцу [14].

Проте з розвитком трифазних систем змінного струму стало очевидно, що визначення повної потужності і коефіцієнта потужності не може бути застосоване до незбалансованих багатofазних систем. 1920 року було утворено Спеціальний Об'єднаний комітет АІЕЕ і Національної Асоціації Електричного Освітлення для розв'язання цієї проблеми. Цей комітет не знайшов консенсусу, а тема продовжувала домінувати у дискусіях. У 1930 році було утворено ще один комітет, який також раз не зміг вирішити це питання [15].

Незадовільний стан теоретичних досліджень у царині визначення кількісних оцінок поживання електричної енергії підтверджується тим, що на сьогодні існує дві конкуруючі теорії електричних потужностей: теорія потужності систем електропостачання з нелінійним навантаженням, вперше запропонована S. Fryze в 1931 році [16], та пізніше запропонована р-q-r теорія потужності, вперше запропонована Н. Akagi в 1931 році [17].

У сучасній теоретичній електротехніці однозначно визначено тільки поняття для миттєвої потужності електричного кола, яка визначається як добуток миттєвих значень напруги [18]:

$$s(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (2.1)$$

та активної потужності електричного кола, яка визначається як середнє значення повної потужності за період вимірювань [18]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad (2.2)$$

де T – період вимірювань.

Теоретичні уявлення про складові повної потужності сьогодні все ще продовжують залишатися предметом численних теоретичних дискусій [19, 20], а уявлення про формування і особливості визначення неактивних складових повної потужності дотепер є предметом наукового обговорення [20, 21].

Відсутність обґрунтованої відповіді на питання про фізичні особливості реактивної потужності призводить до безперервних спроб розробити універсальне уявлення щодо цієї характеристики енергетичних процесів в електричних колах [19, 21]. Унаслідок цих спроб з'явилися різні вирази реактивної потужності у вигляді білінійних функціоналів від струму і напруги [22].

Поняття «реактивна потужність» визначено лише для синусоїдального режиму в лінійному електричному колі, що не дозволяє без серйозних припущень проводити аналіз режимів роботи енергосистеми зі споживачами, які спотворюють форму струму і напруги, і її визначення дотепер є предметом суперечок [23]. Найбільш загальним формулюванням просторово-часових перетворень електромагнітної енергії є теорема Умова – Пойнтінга, яка дозволяє кількісно характеризувати енергетичний обмін за струмів і напруг, які довільно змінюються в часі [20].

Відсутність суворого методичного обґрунтування для визначення реактивної потужності призвело до розробки численних підходів до визначення цієї величини. У [21] зазначається помилковість визначення реактивної потужності як суми різних гармонік і послідовностей. У [21] пропонується використовувати інтегральні вирази від добутку струму на функцію, ортогональну напрузі, або навпаки. У [20] запропоновано пов'язати реактивну потужність з енергообмінними процесами. В [22] динамічні та енергетичні показники у несинусоїдальних і несиметричних режимах пропонується визначити за миттєвими значеннями струмів і напруг. У [188] пропонується метод розрахунку потужності та енергії спотворення за миттєвими значеннями напруги і струму гармонік як потужності та енергії, які деформують синусоїдальний характер змінної складової потужності основної гармоніки. У [25]

пропонується вимірювання реактивної потужності за діючими значеннями реактивної потужності гармонік.

Для нелінійних електричних кіл поняття реактивної потужності не визначене. Тому для розв'язання деяких практичних завдань були зроблені спроби використовувати інтегральні вирази для оцінювання консервативних процесів [21, 22]. Реактивна потужність за цими виразами визначається як інтеграл від добутку струму на функцію, ортогональну напрузі, або навпаки. Такий, по суті формальний, спосіб спричинив появу двох абсолютно рівноправних інтегральних виразів:

$$Q = -\frac{1}{\omega T_0} \int_0^T i \cdot \frac{du}{dt} dt = \frac{1}{\omega T_0} \int_0^T u \cdot \frac{di}{dt} dt . \quad (2.3)$$

Інтегральні формули дозволяють визначити реактивну потужність без розкладання несинусоїдної функції в ряд Фур'є.

З урахуванням того факту, що усі неактивні складові повної потужності, у тому числі потужність спотворення, обумовлена дією вищих гармонік, також створюють негативний вплив [26], було прийнято рішення вважати за енергетичним складову ресурсних витрат процесу пуску повну потужність, споживану електроприводом з мережі живлення.

Для подальшої реалізації була прийнята наступна методика визначення складових повної потужності. Активна потужність кола визначається за рівнянням (2.8). Повна потужність кола може бути визначена як добуток діючих значень струму і напруги за той самий період вимірювань за формулою:

$$S = \bar{U} \cdot \bar{I} . \quad (2.4)$$

Неактивні складові енергії можуть бути обчислені відповідно до виразу:

$$T = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (2.5)$$

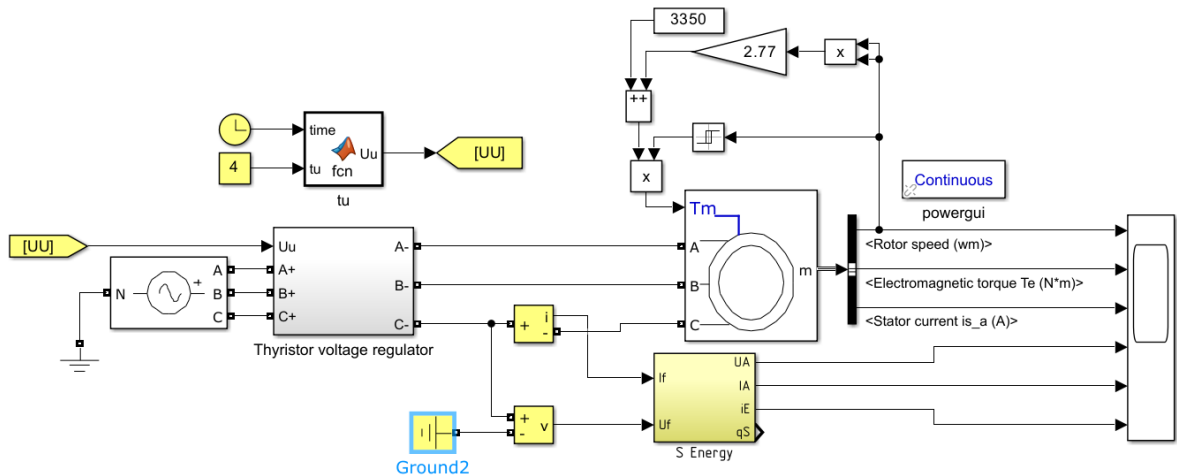
Для синусоїдальних кіл неактивна складова потужності збігається з реактивною потужністю.

Як інтервал інтегрування для обчислення середніх значень використовується період напруги мережі живлення $T = 1/f$, с.

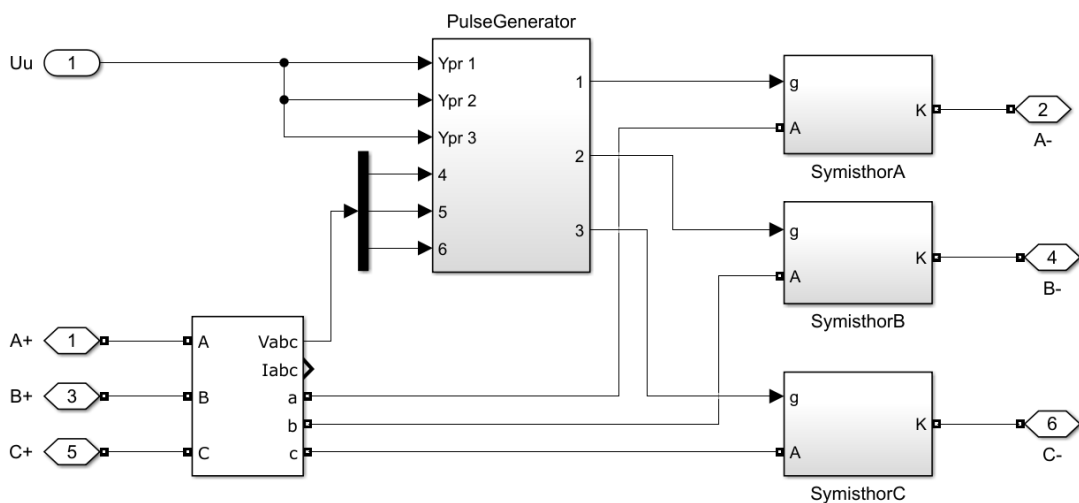
2.4 Математична модель електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 з пристроєм плавного пуску

Для математичного моделювання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 з пристроєм плавного пуску використовуємо MATLAB/Simulink з бібліотекою SimScapе/Electrical, оскільки ця бібліотека містить апробовані елементи для моделювання електромеханічних та напівпровідникових компонентів, що складають електромеханічну систему ексгаустера 9000-11-5.

Розроблена математична модель зображено на рис. 2.3.



a)



б)

Рисунок 2.3 – Математична модель електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 з пристроєм плавного пуску: а – повна математична модель; б – математична модель напівпровідникового перетворювача – пристрою плавного пуску за схемою тиристорного регулятора напруги.

На рис.2.4 наведено розраховані діаграми електромеханічних координат в процесі плавного пуску електроприводу ексгаустера 9000-11-5.

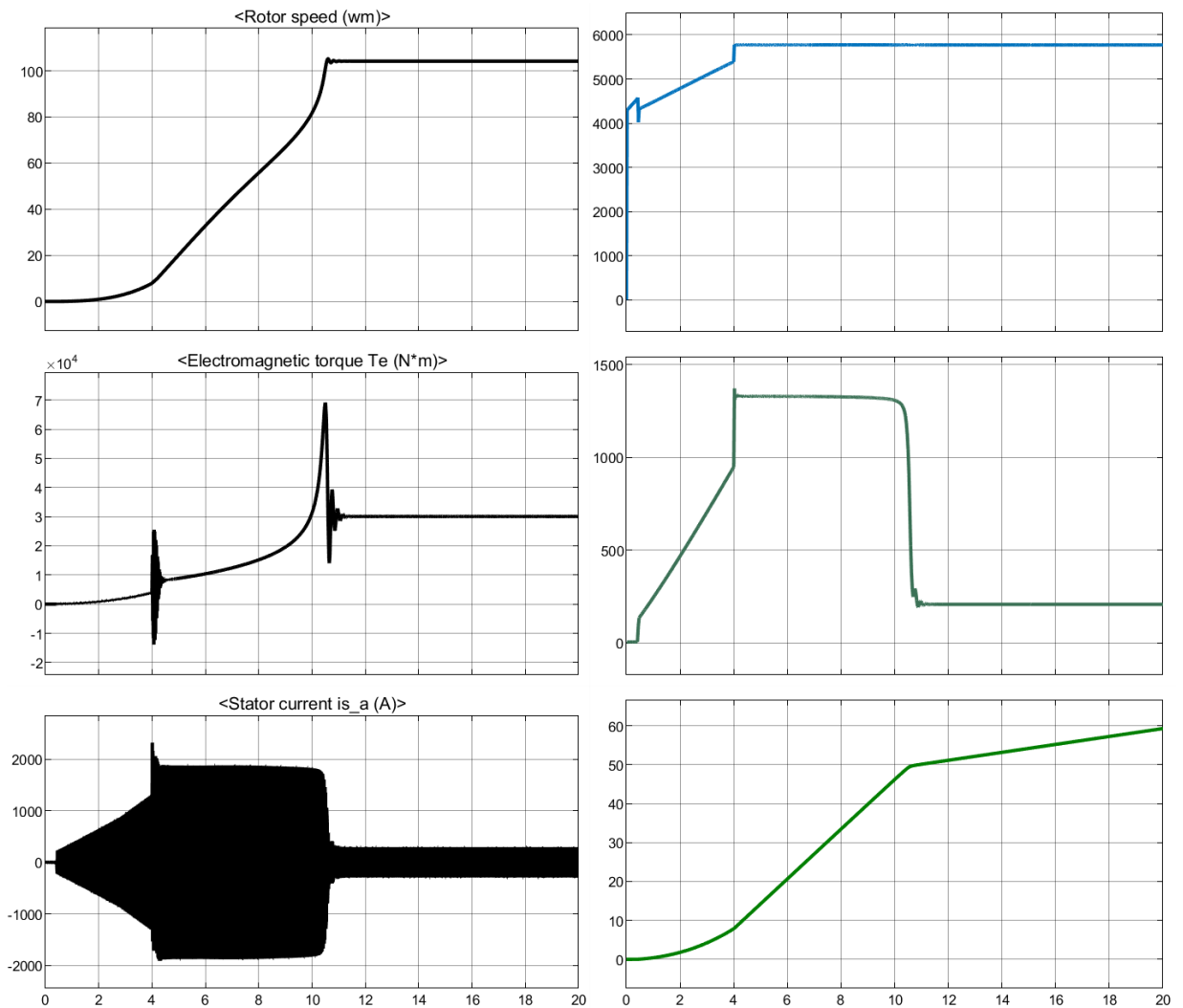


Рисунок 2.4 – Плавний запуск асинхронного електроприводу ексгаустера 9000-11-5: кутова швидкість ексгаустера, рад/с; рушійний момент, Нм; фазний струм статора, А; діюче значення фазної напруги, В; миттєве значення

повної потужності, що споживається з мережі, кВА; повна енергія, спожита електроприводом від початку запуску, кВА*год.

На рис.2.5 наведено часову діаграму струму статора АД у початковій фазі плавного пуску.

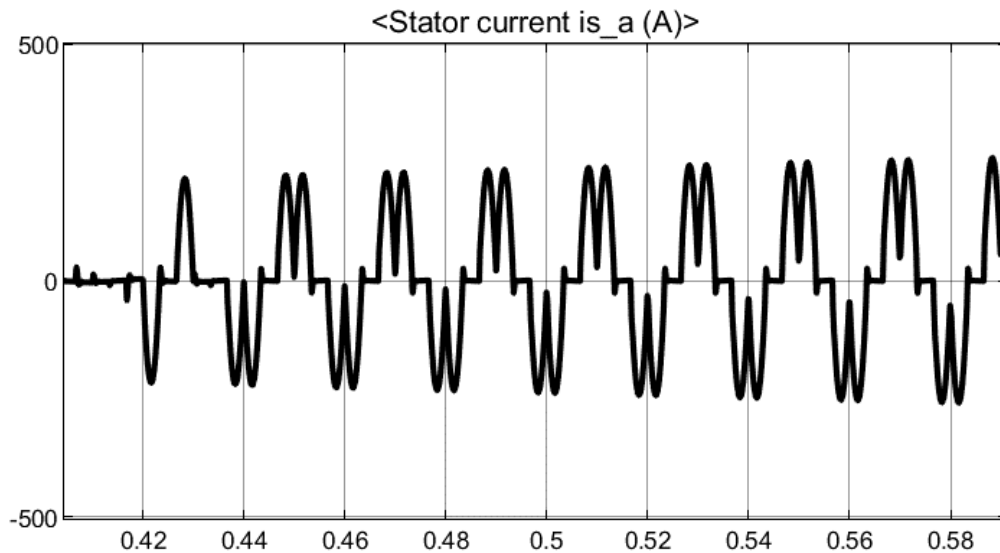


Рисунок 2.5 - Часова діаграма струму статора АД у початковій фазі плавного пуску.

Ця діаграма наочно демонструє працездатність використаної математичної моделі тиристорного регулятора напруги, форма фазного струму безперервно змінюється відповідно до теоретичних міркувань, що підтверджує її адекватність.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано необхідні розрахунки та визначено електромагнітні параметри схеми заміщення та електро механічні параметри електроприводу ексгаустера 9000-11-5. З використанням MATLAB/Simulink з бібліотекою SimScape/Electrical створено математичну модель асинхронного

електроприводу ексгаустера 9000-11-5 з урахуванням вентиляторного моменту на валу та обґрунтовано її адекватність.

У якості показника енергоспоживання електроприводу ексгаустера 9000-11-5 запропоновано використання миттєвої повної потужності та повної енергії, оскільки до теперішнього часу не існує загально визнаної методології аналізу неактивних складових електричної енергії.

Створено математичну модель цілісної електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 з урахуванням наявності пристрою плавного запуску по схемі тиристорного регулятора напруги. Наведено результати розрахунків динамічних режимів, що підтверджують коректність роботи цієї математичної моделі. Ця математична модель може бути використана для аналізу показників енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 при різних налаштуваннях системи плавного пуску.

Розділ 3 Дослідження енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 у керованому пусковому режимі

3.1 Синтез регресійної моделі енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5

За допомогою розробленої у п.2.4 математичної моделі електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 з пристроєм плавного запуску було виконано серію математичних експериментів для синтезу регресійної моделі енергоспоживання досліджуваної електромеханічної системи. Керуючим впливом в цьому експериментальному дослідженні виступає час розгортки напруги живлення від початкового значення до повної номінальної живлячої напруги t_p . У якості відгуку експериментального дослідження фіксувалося значення повної енергії E_s , спожитої електромеханічною системою, на момент завершення запуску і перемикання на режим прямого живлення від цехової мережі електропостачання.

На рис. 3.1 – 3.3 наведено приклади реєстрації енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 відповідно при прямому асинхронному пуску та при плавному запуску з часом розгортки $t_p = 0,1$ с та $t_p = 4$ с.

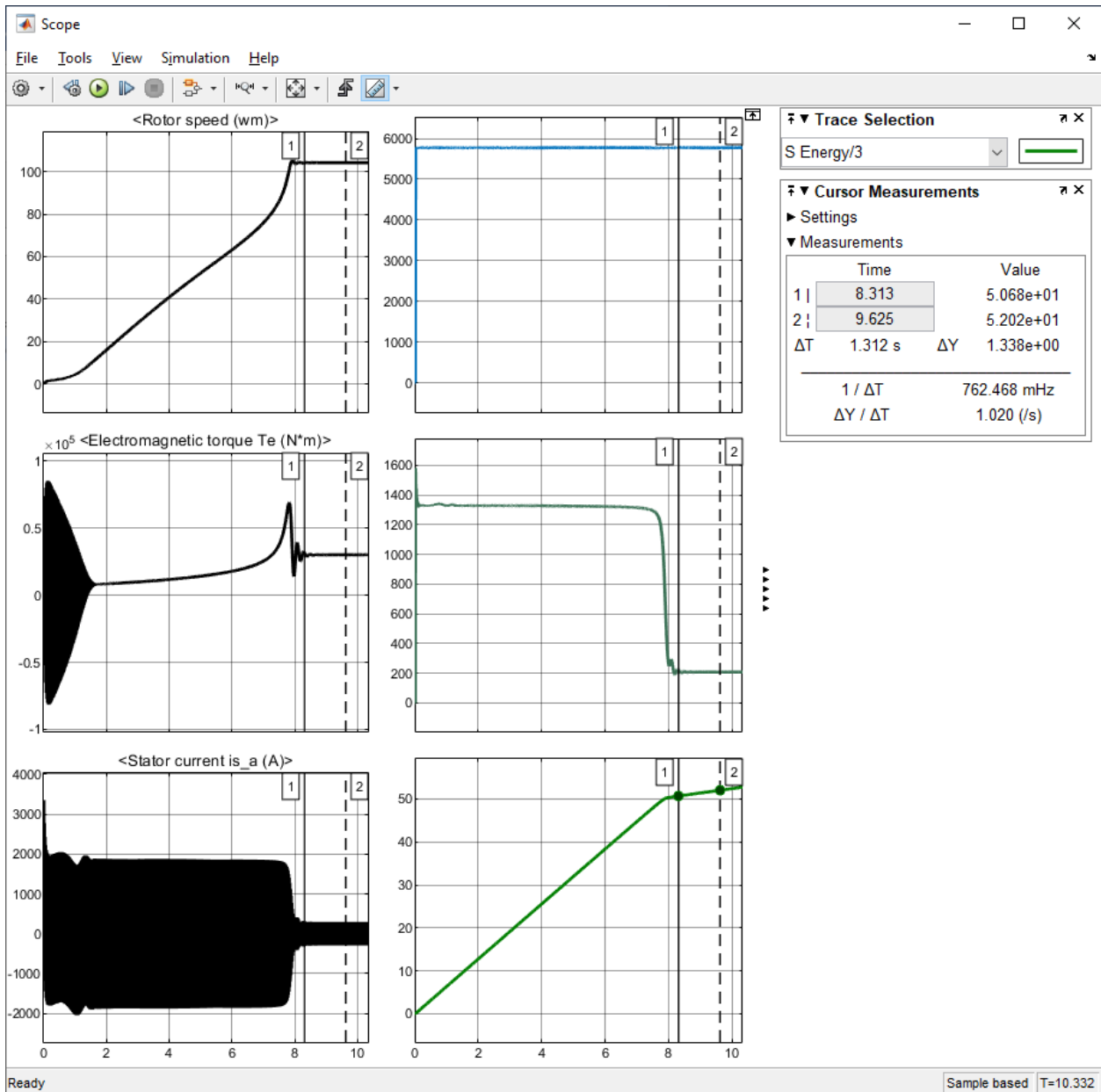


Рисунок 3.1 - Реєстрація енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 при прямому асинхронному пуску.

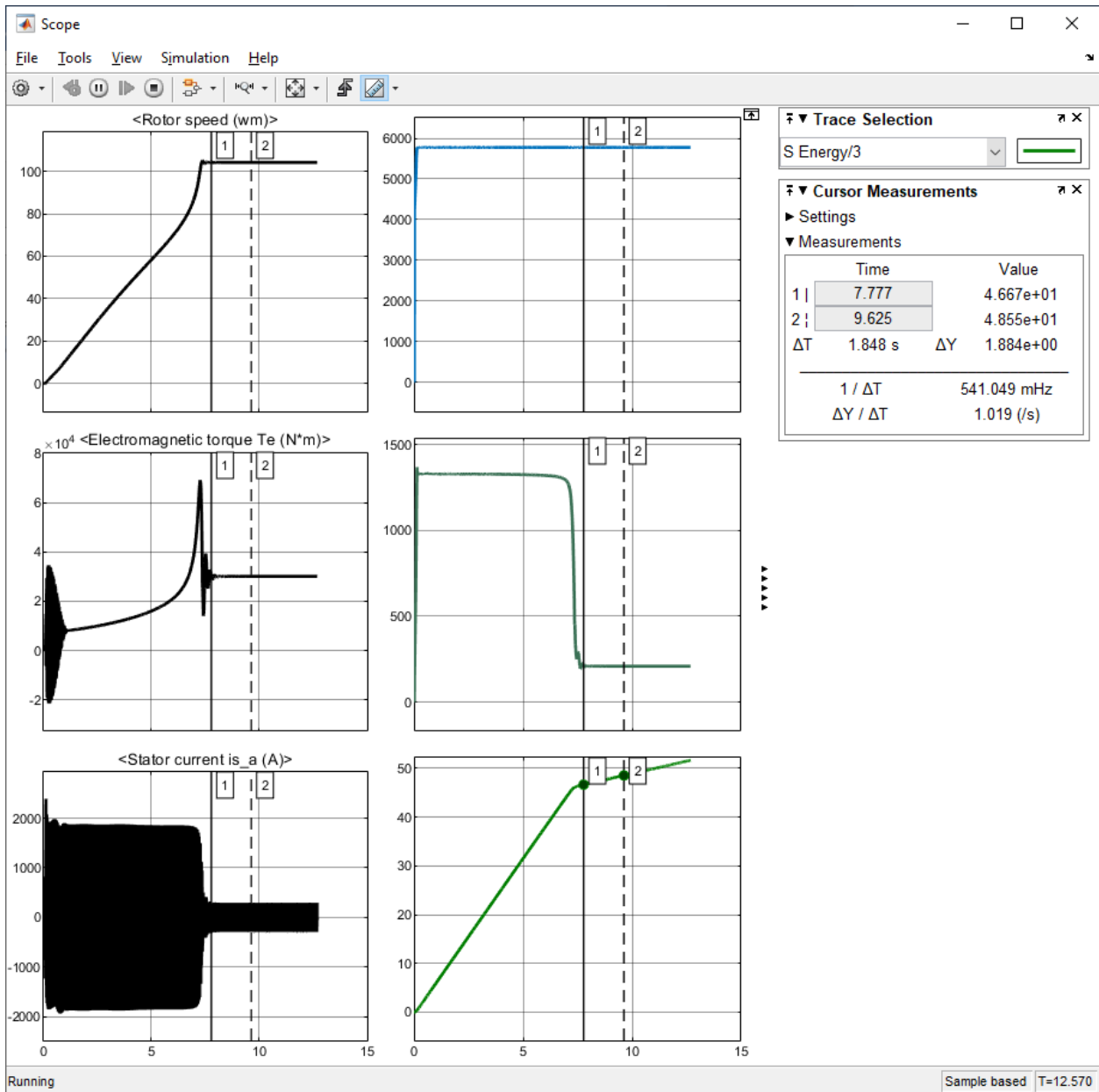


Рисунок 3.2 - Реєстрація енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 при плавному запуску з часом розгортки $t_p = 0,1$ с.

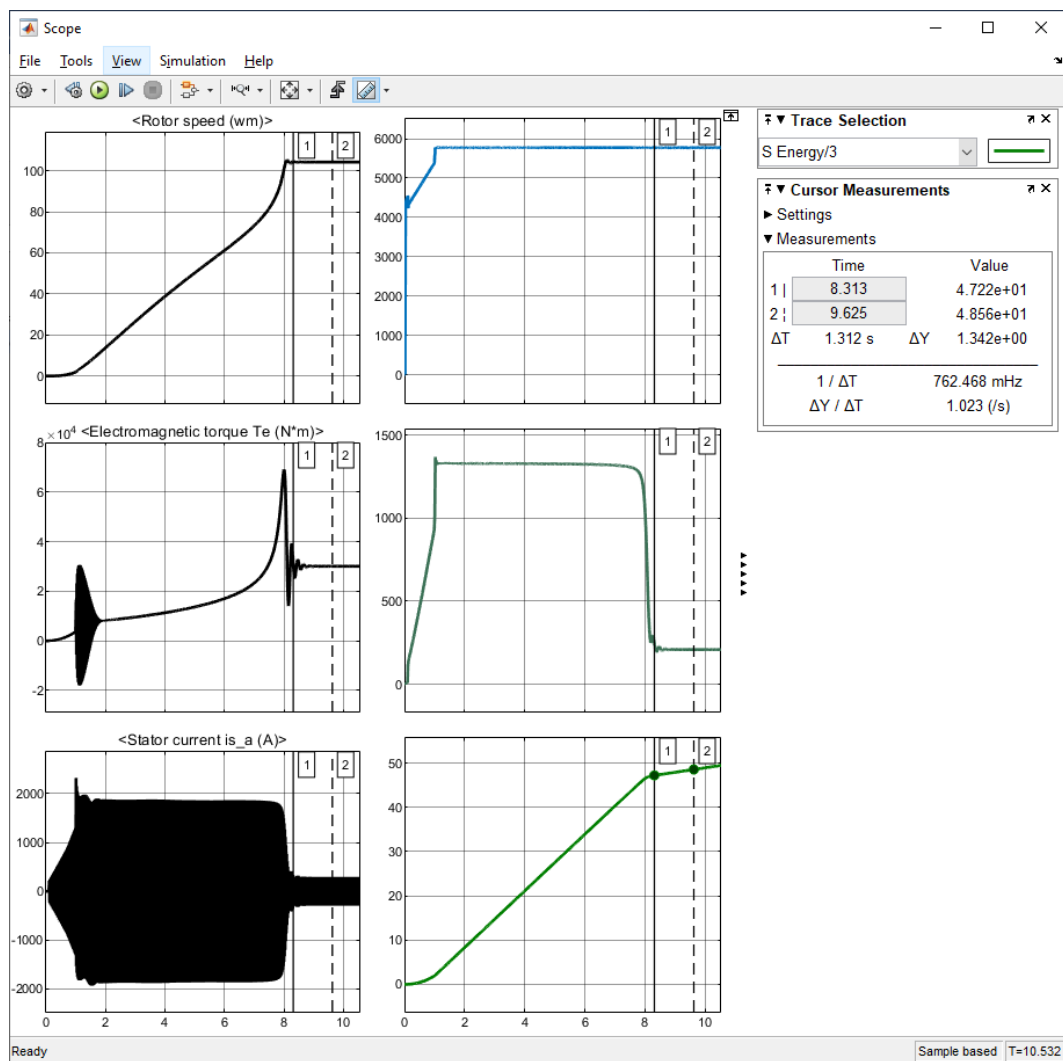


Рисунок 3.3 - Реєстрація енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-1 1-5 при плавному запуску з часом розгортки та $t_p = 4$ с.

У таблиці 3.1 наведено повні результати експериментального дослідження, виконаного на математичній моделі.

Таблиця 3.1 Результати експериментального дослідження енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-1 1-5 з пристроєм плавного запуску на математичній моделі.

| № ПП | Час розгортки напруги живлення t_p , секунд | Значення спожитої пов- ної енергії E_S , кВт |
|---------|--|---|
| 1 | 0 | 50.68 |

| | | |
|----|-----|--------|
| | 0.1 | 46.67 |
| 2 | 0.5 | 46.80 |
| 3 | 1 | 47.22 |
| 4 | 2 | 48.16 |
| 5 | 4 | 49.59 |
| 6 | 7 | 52.87 |
| 7 | 10 | 56.02 |
| 8 | 20 | 68.91 |
| 9 | 40 | 103.60 |
| 10 | 60 | 141.10 |

Для обробки цих результатів та отримання рівняння регресійної моделі було використано програмний інструмент MATLAB/curveFitter. Результати дослідження регресійної моделі наведено на рис. 3.4, 3.5.

На рис.3.4 наведено скріншот роботи інструментального засобу MATLAB/curveFitter при аналізі поліноміальної моделі першого порядку (лінійна регресія). Нижче наведено числові показники цієї регресійної моделі.

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1*x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1.534 \quad (1.394, 1.673)$$

$$p2 = 44.53 \quad (41.33, 47.73)$$

Goodness of fit:

SSE: 132.9

R-square: 0.9856

Adjusted R-square: 0.984

RMSE: 3.842

Коефіцієнт регресії лінійної моделі склав 0.9856, що вказує на значну близькість цієї моделі до експериментальних даних.

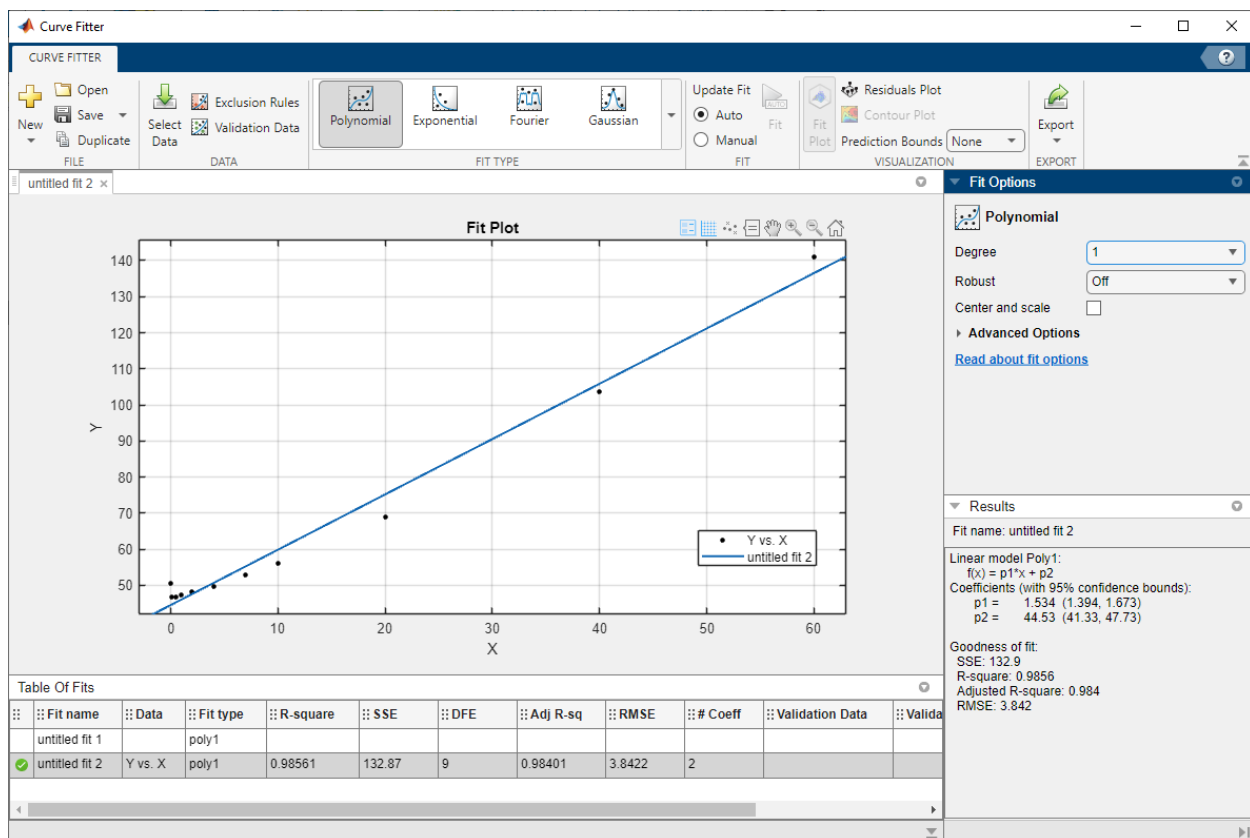


Рисунок 3.4 – Поліноміальна регресійна модель енергоспоживання першого порядку (лінійна регресія)

На рис.3.5 наведено скріншот роботи інструментального засобу MATLAB/curveFitter при аналізі поліноміальної моделі другого порядку (параболічна регресія). Нижче наведено числові показники цієї регресійної моделі.

Linear model Poly2:

$$f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p1 &= 0.01106 \quad (0.00669, 0.01544) \\ p2 &= 0.9229 \quad (0.6726, 1.173) \\ p3 &= 46.76 \quad (45.01, 48.5) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

SSE: 25.3

R-square: 0.9973

Adjusted R-square: 0.9966

RMSE: 1.778

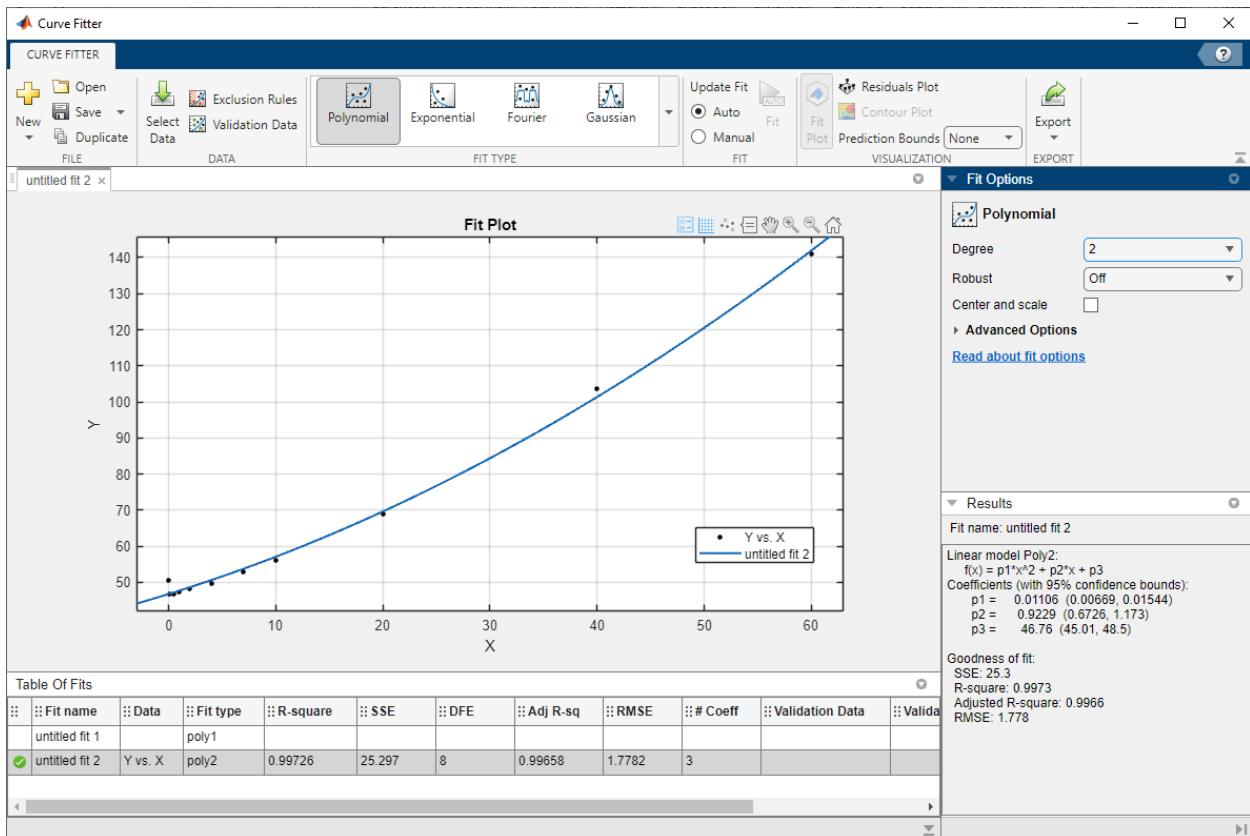


Рисунок 3.5 – Поліноміальна регресійна модель енергоспоживання другого порядку (параболічна регресія)

Коефіцієнт регресії параболічної моделі склав 0.9973, що вказує на значну близькість цієї моделі до експериментальних даних.

Оскільки ми не маємо додаткових теоретичних відомостей про структуру регресійної моделі, то остаточно маємо прийняти у якості остаточного рішення лінійну регресійну модель, оскільки вже для неї коефіцієнт регресії більший за гранично допустимий 0,8.

Зростання енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 при збільшенні часу розгортки можна пояснити наступним чином. Процес запуску передбачає споживання електричної енергії та її перетворення на кінетичну енергію рухомих частин електромеханічної системи ексгаустера.

Ця енергія не залежить від темпу запуску. Додатково з мережі споживається електрична енергія, необхідна для покриття різних видів втрат, в тому числі умовно сталих втрат в електромеханічній системі. Ця частина спожитої електричної енергії зростає прямо пропорційно тривалості пускового процесу, що й зумовлює зростання загального енергоспоживання.

3.2 Техніко-економічні показники використання систем керованого пуску потужних електроприводів

Обґрунтування доцільності застосування пускових пристроїв для нерегульованих потужних електроприводів – складне, нетривіальне завдання. Це обумовлено, насамперед, багаточинниковим впливом пускових процесів, відсутністю загально визнаних методик оцінювання капітальних вкладень та ресурсних витрат на реалізацію процесу пуску.

Коректне обґрунтування доцільності застосування пускових пристроїв повинно базуватися на графіках і режимах роботи технологічного обладнання, які визначають технологічно доцільну тривалість роботи обладнання, можливу кількість і тривалість пауз у роботі електропривода.

Пояснимо вищесказане на прикладі роботи компресорної станції машинобудівного підприємства [29].

Машинобудівне підприємство, зазвичай, працює у дві зміни з двома вихідними днями протягом тижня. Споживання стисненого повітря протягом зміни є майже постійним. У неробочий час стиснене повітря не споживається, компресори можуть бути зупинені. Графіки середньодобового споживання стисненого повітря подані на рис. 3.6 [29].

Основна економія в першому випадку може бути отримана в неробочий час (нічні години, а також вихідні та святкові дні), коли компресори можуть бути зупинені без зменшення обсягів виробництва. Для компресорних станцій підприємств з безперервним циклом роботи, наприклад, залізвидобувних шахт

(рис. 3.6, б), також існують досить тривалі інтервали часу, коли один або два компресори можуть бути зупинені.

Однак, за відсутності пускових пристроїв, компресори на час можливих пауз не вимикаються, а переводяться в режим холостого ходу.

Це пов'язано з тим, що найважчим щодо навантажень на елементи конструкції компресора є режим пуску, який істотно впливає на ресурс агрегату. Незважаючи на незначну тривалість (близько 30 с), процес пуску створює значний вплив на технічний ресурс агрегату. Це пояснюється високими пусковими моментами, які в два рази перевищують номінальні, з проходженням компресора через зону резонансних механічних коливань і додатковими навантаженнями конструкцій під час прогрівання агрегату. Втрати моторесурсу на кожен цикл запуску становлять 50 годин [29], тому виробник компресора допускає максимум щотижневі пуски/зупинки компресора, а рекомендована виробником тривалість безперервної роботи турбокомпресорів складає не менше 25 діб [28].

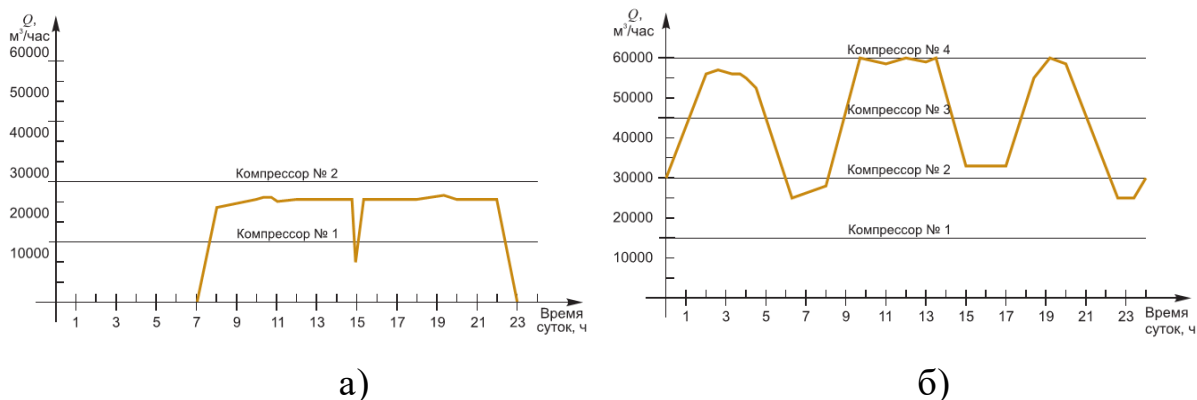


Рисунок 3.6 – Графіки середньодобового споживання стисненого повітря: а - машинобудівного підприємства; б - підприємства з безперервним циклом роботи

Аналіз пускових режимів компресорних агрегатів, наведений у [29], не враховує зношування приводного двигуна і спожиту ним електроенергію, що не применшує його цінності.

З вищевикладеного можна зробити загальний висновок про те, що аналіз доцільності використання пускових пристроїв повинен враховувати тривалість

усталеного режиму роботи і ґрунтуватися на визначенні співвідношення ресурсних витрат в процесі запуску і в усталеному режимі.

Також важливим завданням, яке необхідно розв'язати для обґрунтування доцільності застосування пускових пристроїв, є визначення структури та кількісної оцінки різних складових ресурсних витрат, необхідних для виконання запуску, а також розв'язати проблеми порівнянності окремих складових ресурсних витрат.

Складність визначення ресурсних витрат на здійснення запуску обумовлена необхідністю всебічного аналізу технологічних, енергетичних, надійнісних аспектів функціонування електроприводу та робочої машини.

Ресурсними витратами на здійснення пуску загалом є наступні витрати: технічний ресурс електромеханічного та технологічного обладнання, що витрачається за час пуску, вартість планово-попереджувальних ремонтних робіт, заробітну плату обслуговуючого персоналу, спожита в процесі запуску електроенергія тощо.

Розглянемо два можливі варіанти роботи електромеханічного обладнання з виникненням можливості технологічної перерви, яка не впливає на загальну продуктивність технологічного процесу, (рис. 3.7).

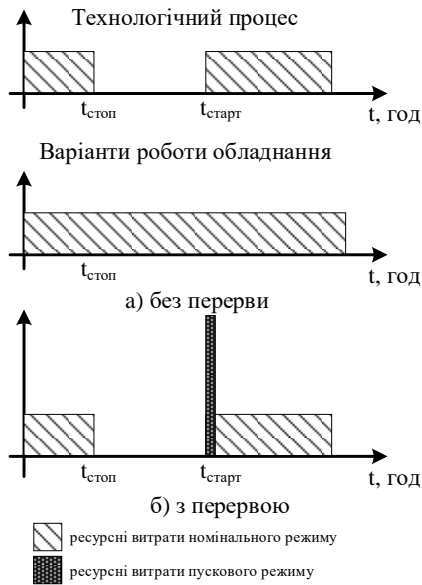


Рисунок 3.7 – Варіанти роботи електро-механічного обладнання у разі виник-
на період перерви технологічного процесу (рис. 3.7, б). З вибором такого варіанту роботи виникають додаткові ресурсні витрати на повторний запуск електроприводу та робочої машини (рис. 3.7, б).

Розглянемо докладніше зміни ресурсних витрат за різних підходів до використання обладнання у разі зупинки технологічного процесу (рис. 3.8).

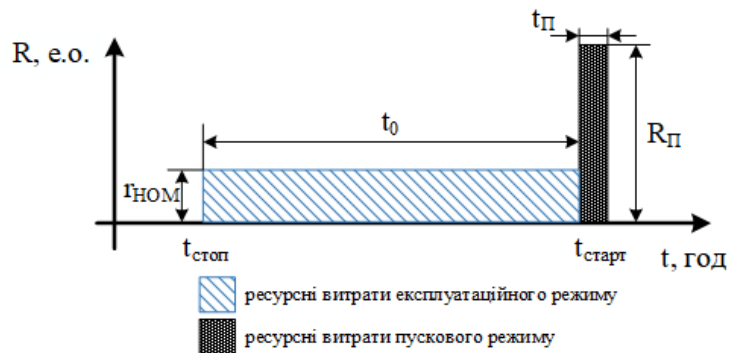


Рисунок 3.8 – До порівняння експлуатаційних витрат експлуатаційного та пускового режимів

Зупинка технологічного обладнання, з одного боку, призводить до зменшення ресурсних витрат на час паузи, а, з іншого боку, призводить до

У першому варіанті, (рис. 3.7, а), електропривод і робоча машина не зупиняються і працюють у режимі, наближеному до холостого ходу. За час перерви технологічного процесу відбувається споживання ресурсних витрат: зношування електромеханічного обладнання, споживання електроенергії та інше.

Альтернативою є другий варіант – повна зупинка обладнання

необхідності виконання додаткового пуску, що створює додаткові ресурсні витрати, яких би не було за безперервної роботи обладнання.

Позначимо тривалість зупинки технологічного процесу символом t_0 тривалість повторного пуску обладнання – символом t_n , при цьому, тривалість прямого пуску позначимо символом t_{n0} . Питому величину ресурсних витрат в номінальному режимі роботи позначимо символом $R_{ном}$.

Якби обладнання не було відключено, то ресурсні витрати визначалися б питомою величиною ресурсних витрат у номінальному режимі роботи $R_{ном}$ і тривалістю перерви в роботі t_0 :

$$R_E = r_{ном}t_0 \quad (3.1)$$

У разі зупинки устаткування цієї складової ресурсних витрат немає, але з'являється пускова складова ресурсних витрат R_n .

Якщо здійснюється прямий запуск електроприводу технологічного обладнання, то час запуску буде мінімальним і дорівнюватиме t_{n0} , а пускові ресурсні витрати – максимальними, і дорівнюватимуть R_{n0} . З реалізацією плавного запуску ми збільшуємо час запуску і можемо істотно зменшити пускові ресурсні витрати. Як показує аналіз, тривалість плавного запуску залишається зневажливо малою, порівняно з тривалістю паузи, що дозволяє розглядати пускові ресурсні витрати як імпульсну функцію Дірака.

Зупинка технологічного обладнання є доцільною, якщо економія ресурсних витрат за час паузи перевищує ресурсні витрати на повторний запуск обладнання:

$$R_E > R_n \quad (3.2)$$

де R_E – ресурсні витрати за час зупинки устаткування, визначені за (3.1).

Ресурсні витрати на повторний пуск електроприводу можуть бути суттєво зменшені з використанням спеціальних, специфічних для різних типів робочих машин технічних рішень, наприклад, використання режиму глибокого

дроселювання турбокомпресорів [161]. Більш універсальним, придатним для більшості робочих машин, методом зменшення пускових ресурсних витрат є використання пускових пристроїв електроприводу.

Отже, проблематика обґрунтування доцільності використання пускових пристроїв поділяється на два взаємопов'язаних завдання: вибір раціональної схеми пускового пристрою для нерегульованого електроприводу, який дозволить зменшити пускові ресурсні витрати до прийняттого рівня, і вибір раціонального режиму пуску, що дозволить оптимізувати процес пуску щодо співвідношення пускових ресурсних витрат з отриманим сукупним результатом процесу пуску (СРПП).

Ресурсні витрати та СРПП потужних електроприводів, що працюють у режимі холостого ходу у разі перерви технологічного процесу, зображено схемою на рис. 3.8.

Узагальнюючи розглянуте вище формування ресурсних витрати та СРПП потужних електроприводів можна зобразити такою схемою (рис. 3.9).

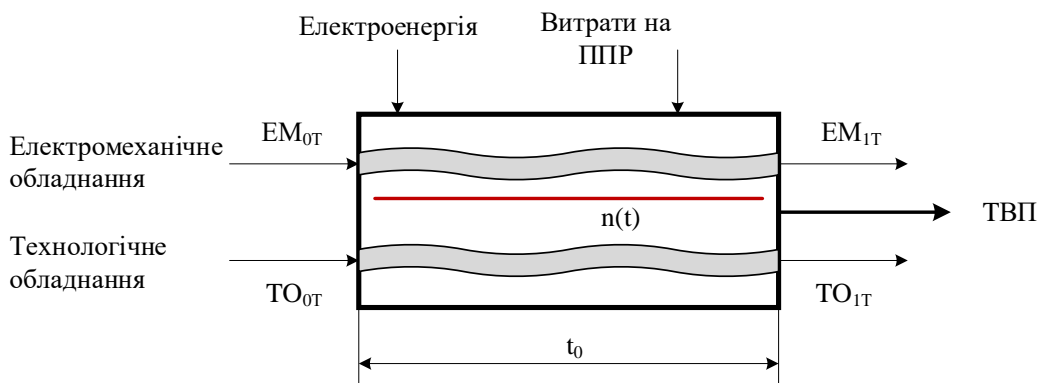


Рисунок 3.9 – Схема формування ресурсних витрат електроприводів, що працюють у режимі холостого ходу у разі перерви технологічного процесу

На рис. 3.9 позначено: EM_{0T} , EM_{1T} – вартість електромеханічного обладнання на початку та по завершенні пуску; $(EM_{0T} - EM_{1T})$ – зношування електромеханічного обладнання за період пуску; TO_{0T} , TO_{1T} – вартість технологічного обладнання на початку та по завершенні пуску; $(TO_{0T} - TO_{1T})$ – зношування

технологічного обладнання за період пуску; СРПП – сукупний результат електроприводу, створений протягом технологічної перерви; t_0 – тривалість технологічної перерви

Порівняння ресурсних витрат протягом технологічної перерви з ресурсними витратами пускового режиму має здійснюватися з урахуванням капітальних вкладень на придбання системи керованого запуску.

Капітальні витрати необхідно враховувати для проектування систем керованого пуску, вартість вибраної пускової системи слід урахувати як складову загальної вартості електромеханічного обладнання $EM_{0П}$, $EM_{1П}$.

Використання системи керованого пуску суттєво впливає на значення окремих складових ресурсних витрат. Як показує виконаний вищеаналіз, збільшення тривалості процесу пуску дозволяє суттєво зменшити зношування електромеханічного та технологічного обладнання, зменшує додаткові економічні ризики від пускових процесів, що, власне, і складає основний сенс використання пускових систем. Формування ресурсних витрати та СРПП потужних електроприводів можна зобразити такою схемою (рис. 3.10).

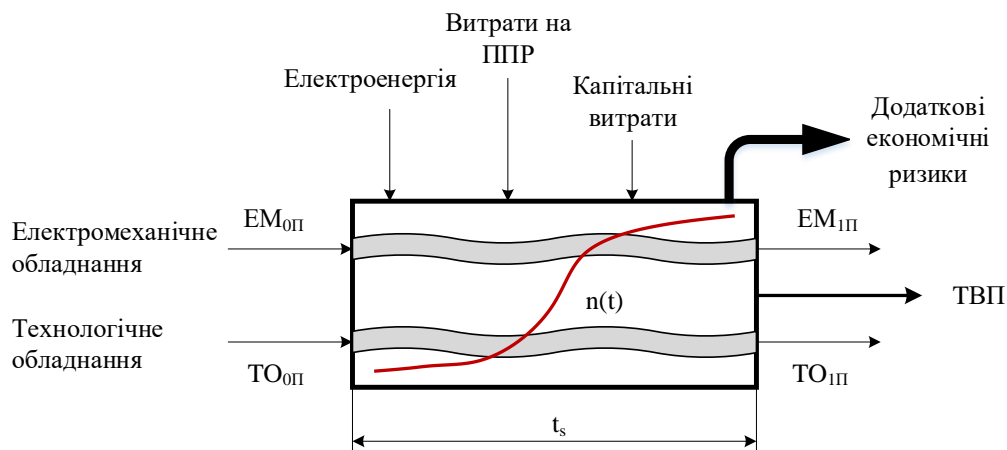


Рисунок 3.10 – Схема формування ресурсних витрат процесу пуску потужних електроприводів: $EM_{0П}$, $EM_{1П}$ – вартість електромеханічного обладнання на початку та по завершенні пуску; $(EM_{0П} - EM_{1П})$ – зношування електромеханічного обладнання за період пуску; $ТО_{0П}$, $ТО_{1П}$ – вартість технологічного обладнання на початку та по завершенні пуску; $(ТО_{0П} - ТО_{1П})$ – зношування технологічного

обладнання за період пуску; СРПП – сукупний результат, створений процесом пуску; t_s – тривалість процесу пуску

Після визначення типу пускової системи постає завдання вибору раціонального режиму пуску. Оскільки початкова вартість електромеханічного обладнання на цьому етапі цілком визначена, то немає необхідності врахування капітальних вкладень, цілком достатньо оперувати значеннями зношування обладнання за період пуску. Основний матеріал роботи присвячено розв'язанню цього завдання.

Більш детальної уваги заслуговує уточнення питання, що саме складає сукупний результат електроприводу під час технологічної перерви або процесу запуску електроприводу, яку корисну функцію виконує електропривод під час технологічної перерви, коли він працює вхолосту? Вочевидь, єдиною корисною функцією електроприводу під час технологічної перерви є підтримання технологічного обладнання у стані готовності до відновлення технологічного процесу, функція підтримання кутової швидкості обладнання та кінетичної енергії обертових частин електроприводу на достатньому для поновлення технологічного процесу рівні. Аналогічно сукупним результатом процесу пуску слід уважати утворення необхідного для поновлення технологічного процесу запасу кінетичної енергії.

Розглянемо методику визначення області техніко-економічної доцільності зупинки електроприводу у разі виникнення технологічної перерви.

З нерівності (3.2) визначимо мінімально допустиму тривалість технологічної перерви, за якої доцільно зупинити нерегульований електропривод з подальшим прямим пуском:

$$t_0 > \frac{R_{n0}}{r_{ном}} \quad (3.3)$$

Методику визначення ресурсних витрат на реалізацію плавного пуску можна розробити на підставі уявлень про прискорене зношування устаткування під час роботи з неномінальним навантаженням.

Збільшення часу запуску супроводжується зменшенням струмових, механічних та інших видів навантажень, що призводить до прискореного зменшення ресурсних витрат у міру збільшення тривалості плавного пуску t_n , порівняно з тривалістю прямого пуску t_{n0} . Висловлена гіпотеза може бути описана виразом:

$$R_n = R_{n0} / f(t_n / t_{n0}), \quad (3.4)$$

де функція f має монотонно зростати зі збільшенням аргументу.

Висунутим вимогам цілком відповідає степенева функція з показником степені, більшим за 1. Прийнявши це припущення, отримаємо наближений вираз для визначення ресурсних витрат керованого запуску:

$$R_n = R_{n0} / (t_n / t_{n0})^\alpha. \quad (3.5)$$

Підставляючи отримані вирази (3.1) і (3.5) у нерівність (3.2) і вирішуючи цю нерівність щодо тривалості плавного пуску t_n , отримаємо такий вираз для граничної тривалості запуску, що забезпечує беззбитковість у разі перерви в роботі обладнання тривалістю t_0 (за умови відсутності впливу такої зупинки на продуктивність технологічного процесу в цілому):

$$t_n > t_{n0} \left(\frac{R_{n0}}{r_{ном} t_{n0}} \right)^{1/\alpha}. \quad (3.6)$$

Використовуємо дані, наведені в [161], щодо характеристик прямого пуску компресорної установки, щоб оцінити значення показника ступеня α .

Ураховуючи, що втрати моторесурсу на кожен цикл запуску тривалістю 30 секунд (30/3600 години) складають 50 годин, отримаємо, що зношування обладнання в подібному режимі роботи за 1 годину складе 6000 мотогодин. Орієнтуючись на значення пускового струму електроприводу, рівного $(5..7)I_{ном}$,

відповідно до запропонованої в розділі 2.4.1 моделі прискореного зношування обладнання отримаємо наступне співвідношення:

$$6000 = (5 \cdot t_0)^\alpha,$$

звідки знайдемо орієнтовний діапазон значень для параметра α :

$$4.5 < \alpha < 5.4.$$

За формулою (3.6) був виконаний розрахунок мінімально необхідної тривалості пуску компресорної установки залежно від обсягу ресурсних витрат на прямий пуск R_{n0} і тривалості перерви в роботі обладнання t_0 . Отримана поверхня, розрахована для таких числових значень параметрів: $R_{ном} = 1$ е. о./год; $2 < t_0 < 10$ (годин); $t_{n0} = 30$ с.; $R_{n0} = 6000$ е.о.; $\alpha = 5$, зображена на рис. 3.11.

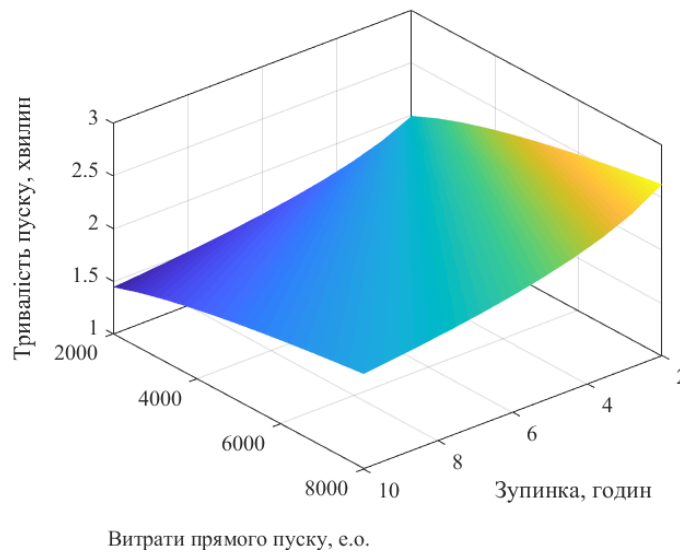


Рисунок 3.11 – Залежність мінімальної за умови беззбитковості тривалості процесу пуску від величини ресурсних витрат на прямий пуск R_{n0} і тривалості перерви в роботі обладнання t_0

Як показує аналіз отриманих результатів, зменшення тривалості зупинки потребує збільшення тривалості керованого пуску, зменшення пускових

ресурсних витрат дозволяє виконувати більш інтенсивний керований пуск з меншим часом розгортання.

3.2.1 Числовий приклад.

Нижче наведено приклад визначення техніко-економічних показників впровадження системи керованого пуску турбокомпресора К-250, обладнаним синхронним двигуном типу СТМ-3500-2 потужністю 3500 кВт на прикладі машинобудівного підприємства, графіки середньодобового споживання стисненого повітря якого наведено на рис. 6.27 а.

Вихідні техніко-економічні дані електромеханічного обладнання.

Загальні дані.

1. Тривалість прямого пуску електромеханічної системи $T_s = 30$ с;
2. Тариф сплати за спожиту електроенергію $t_E = 0,085$, €/кВт*год.
3. Тривалість перерви технологічного процесу $h_p = 8$, годин

Вихідні параметри двигуна СТМ-3500-2.

4. Номінальна потужність $P_{ном} = 3500$, кВт.
5. Початкова вартість двигуна $C_M = 700000$, €.
6. Паспортний строк служби двигуна до першого капітального ремонту $L_{MY} = 5$, років.
7. Кількість прямих пусків за життєвий цикл двигуна за даними виробника $N_s = 500$, пусків.

Вихідні параметри компресора К-250.

8. Початкова вартість компресора $C_K = 1200000$, €.
9. Паспортний строк служби компресора до першого капітального ремонту $L_{KY} = 5$, років.
10. Еквівалентне зношування компресора за один пуск $W_{KH} = 50$, годин.

Вартість зношування електродвигуна

11. Вартість одного прямого пуску, cM_{SU} , €:

$$cM_{SU} = \frac{C_M}{N_s} = 1400 \text{ €}.$$

12. Вартість однієї секунди прямого пуску, cM_{SS} , €/с:

$$cM_{SS} = \frac{cM_{SU}}{T_S} = \frac{1400}{30} = 46,67 \text{ € / с.}$$

13. Вартість однієї секунди тривалого режиму роботи, cM_{SH} , €/с:

$$cM_{SH} = \frac{C_M}{L_{MY} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = \frac{700000}{157680000} = 0,0044 \text{ € / с.}$$

Вартість зношування компресора.

14. Вартість однієї секунди тривалого режиму роботи, cK_{SH} , €/с:

$$cK_{SH} = \frac{C_K}{L_{KY} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = \frac{1200000}{157680000} = 0,0076 \text{ € / с.}$$

15. Вартість однієї секунди прямого пуску, cK_{SS} , €/с:

$$cK_{SS} = \frac{cK_{SH} \cdot W_{KH} \cdot 50}{T_S} = \frac{1370}{30} = 45,66 \text{ € / с.}$$

Загальна вартість зношування електромеханічної системи.

16. Вартість однієї секунди прямого пуску, cW_S , €/с:

$$cW_S = cM_{SH} + cK_{SH} = 46,67 + 45,66 = 92,33 \text{ € / с.}$$

17. Вартість однієї секунди тривалого режиму роботи, cW_H , €/с:

$$cW_H = cM_{SS} + cK_{SS} = 0,0044 + 0,0076 = 0,012 \text{ € / с.}$$

Ресурсні витрати за час технологічної паузи

18. Вартість зношування обладнання за час технологічної паузи, CW_P , €

$$CW_P = cW_H \cdot h_P \cdot 3600 = 0,012 \cdot 28800 = 347,03 \text{ €.}$$

19. Вартість спожитої електроенергії за час технологічної паузи при роботі електроприводу у режимі холостого ходу, CE_P , €

$$CE_P = t_E \cdot 0,1 \cdot P_{НОМ} \cdot h_P = 0,085 \cdot 0,1 \cdot 3500 \cdot 8 = 238 \text{ €.}$$

20. Загальні ресурсні витрати за час технологічної паузи, C_P , €

$$C_P = CW_P + CE_P = 347,03 + 238 = 585,03 \text{ €.}$$

Ресурсні витрати за час прямого пуску без урахування спожитої електроенергії.

21. Загальні ресурсні витрати за час прямого пуску, C_S , €

$$C_S = (cK_{SS} + cM_{SS}) \cdot T_S = (45,66 + 46,67) \cdot 30 = 2770 \text{ €}.$$

Ресурсні витрати за час керованого пуску.

22. Показник степеня функції прискореного зношування $\alpha = 5$.

23. Тривалість прямого пуску електромеханічної системи $T_{CS} = 60$ с;

24. Ресурсні витрати за час керованого пуску без урахування спожитої електроенергії за виразом (6.14), C_{CS} , €

$$C_{CS} = \frac{C_S}{(T_{CS}/T_S)^\alpha} = 86,56 \text{ €}$$

25. Річна економія (з розрахунку 250 робочих днів на рік)

$$S_Y = (C_{CS} - C_S) \cdot 250 = 124620 \text{ €}$$

Таким чином, річна економія ресурсних витрат при використанні керованого пуску турбокомпресора сягнула майже 125 000 €. Річний економічний ефект та строки окупності проекту суттєво залежатимуть від початкової вартості пускового обладнання.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано експериментальне дослідження залежності енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 у керованому пусковому режимі, отримано регресійну модель залежності енергоспоживання від темпу розгортки живлячої напруги на виході пристрою плавного запуску. Встановлено, що енергоспоживання під час плавного пуску практично прямо пропорційно залежить від тривалості пускового процесу, що пояснюється необхідністю подолання умовно сталих втрат в електромеханічному обладнанні.

Розглянуто методику визначення економічної ефективності використання пускового пристрою, яка спирається на визначення сукупних витрат на

пусковий процес, які додатково враховують і зменшення зношування електро-
механічного і технологічного обладнання при плавному запуску.

Висновки

У першому розділі визначено найважливіші чинники впливу процесів пуску потужних електроприводів на надійність і залишковий технічний ресурс електромеханічного та технологічного обладнання. Встановлено, що збільшення експлуатаційних навантажень призводить до непропорційно значного збільшення зношування та скорочення технічного ресурсу технологічного та електромеханічного обладнання.

У другому розділі виконано необхідні розрахунки та визначено електромагнітні параметри схеми заміщення та електромеханічні параметри електроприводу ексгаустера 9000-11-5. З використанням MATLAB/Simulink з бібліотекою SimScape/Electrical створено математичну модель асинхронного електроприводу ексгаустера 9000-11-5 з урахуванням вентиляторного моменту на валу та обґрунтовано її адекватність.

У якості показника енергоспоживання електроприводу ексгаустера 9000-11-5 запропоновано використання миттєвої повної потужності та повної енергії, оскільки до теперішнього часу не існує загально визнаної методології аналізу неактивних складових електричної енергії.

Створено математичну модель цілісної електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 з урахуванням наявності пристрою плавного запуску по схемі тиристорного регулятора напруги. Наведено результати розрахунків динамічних режимів, що підтверджують коректність роботи цієї математичної моделі. Ця математична модель може бути використана для аналізу показників енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 при різних налаштуваннях системи плавного пуску.

У третьому розділі виконано експериментальне дослідження залежності енергоспоживання електромеханічної системи ексгаустера 9000-11-5 у керованому пусковому режимі, отримано регресійну модель залежності енергоспоживання від темпу розгортки живлячої напруги на виході пристрою плавного

запуску. Встановлено, що енергоспоживання під час плавного пуску практично прямо пропорційно залежить від тривалості пускового процесу, що пояснюється необхідністю подолання умовно сталих витрат в електромеханічному обладнанні.

Розглянуто методику визначення економічної ефективності використання пускового пристрою, яка спирається на визначення сукупних витрат на пусковий процес, які додатково враховують і зменшення зношування електромеханічного і технологічного обладнання при плавному запуску.

Перелік використаних джерел

1. Котлярчук В.А., Гончаров А.Ф. Електропостачання екскаваторів, М.: Надра, 1980., 1980, с. 175.
2. Глебов И.А., Шулаков Н.В., Крутяков Е.А. Проблеми пуску надпотужних синхронних машин, Л: Наука. Ленінг. відд., 1988, с. 197.
3. Овчаренко А.С., Розінський Д.І. Підвищення ефективності електропостачання промислових підприємств, К.: Техніка, 1989, с. 287.
4. Гречко Е.М., Родькін Д.І., Чорний О.П., Титюк В.К., Павленко В.Є. Дослідження та шляхи підвищення ефективності пускових систем синхронних двигунів в електроприводах промислових механізмів, Київ: докл. АН України. Ін-т проблем енергозбереження, 93-1, 1993, с. 48.
5. Сиромятников И.А. Режимы работы асинхронных і синхронных двигунів / за ред. Л.Г. Мамиконянца, М.: Энергоатоміздат, 1984, с. 240.
6. Морозов А.А., Чорний А.П. Ціноутворення при ремонті електродвигунів систем приводу, Проблеми створення нових машин і технологій: наукові праці КДПУ № 1(8), 2000, с. 217-219
7. Виноградов С.Б. Оцінка працездатності електроприводів насосних станцій гірничо-збагачувальних комбінатів. Проблеми створення нових машин і технологій: наукові праці КДПІ - Кременчук: КДПІ, № 1, 1996.
8. Єрмолін Н.П., Жеріхін І.П. Надійність електричних машин, Л.: Енергія, Ленінгр. відд., 1976, с. 248.
9. Гольдберг О.Д., Хелемська С.П. Надійність електричних машин: підручник для студ. вищ. учб. закладів, О. Гольдберг, Ред., М.: Видавничий центр "Академія", 2010, с. 288.
10. Ванєєв Б.М., Головний В.Д., Гостищев В.М., Сердюк Л.І. Надійність асинхронних електродвигунів: Під ред. Б.М. Ванєєва, К.:Техніка, 1983, с. 143.

11. Копилов І.П. До визначення динамічних енергетичних показників за несинусоїдальної та несиметричної напруги. Изв. АН Енергетика, № №2, 2001, с. 31-38.
12. Ковач К., Рац І. Перехідні процеси в машинах змінного струму, М. - Л.: Госенергоиздат, 1963, с. 744.
13. Гладир О.І. Експериментальні пускові характеристики насосного агрегату з урахуванням моменту рушання. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: - Кременчук: КДПУ, № 2(19), 2003, с. 247-249.
14. «AC power» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/AC_power. [Accessed 25/10/2018].
15. A.E. Emanuel. On The Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits with Sinusoidal Voltage and Currents. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, 1993, pp. 841–852.
16. S. Fryze. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems. Przegląd Elektrot., vol. 7, 1931, pp. 193-203.
17. H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits, Int. Power Electronics Conf. Tokio, Japan, 1983.
18. Зевеке Г.В., Іонкін П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основи теорії кіл. М.: Енергія, 19765, с. 751.
19. Домнін І.Ф., Жемеров Г.Г., Крилов Д.С., Сокол О.І. Сучасні теорії потужності та їхнє використання в перетворювальних системах силової електроніки. Технічна електродинаміка, № 1, с. 80-91, 2004.
20. Демірчян К.С. Реактивна або обмінна потужність. Изв. АН СРСР. Енергетика і транспорт, №2, 1984, с. 66-72.
21. Баламетов А.Б., Халілов Е.Д., Ісаєва Т.М. Про визначення реактивної потужності за несинусоїдальних режимів. Журнал "Проблеми енергетики" №1, АЗНДІЕ і ЕП, АГНА, 2005, с. 88-94.
22. Домнін І.Ф., Жемеров Г.Г. Визначення миттєвих активних і реактивних потужностей у трифазних електричних мережах з вентильними

перетворювачами. Вісник Приазовського державного технічного університету, № 15, 2005, с. 70-74.

23. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Фізичний зміст поняття "реактивна потужність" стосовно трифазних систем електропостачання з нелінійним навантаженням. Електротехніка і електромеханіка, № 6, 2015, с. 36-42.

24. Мельников Н.А. Реактивна потужність в електричних мережах. М.: Енергія, 1975, с. 128.

25. Савиновський Ю.А., Корольов С.Я., Стратонов А.В. До інтегрального поняття "реактивна потужність". Изв. вузів. Енергетика, №7, 1981, с. 55-57.

26. Маєвський О.А. Енергетичні показники вентильних перетворювачів. М.: Енергія, 1978, с. 320.

27. Гоголев П.В., Куликов А.І., Кучеренко В. В. Методи енергозбереження для відцентрових компресорів К-250 і К-500. Автоматизація в промисловості, т. 6, 2004, с. 7-11.

28. Чорний А.П., Гладир О.І., Осадчук Ю.Г., Курбанов І.Р., Вошун О.М. Пускові системи нерегульованих електроприводів, Кременчук: П.П. Щербатих О.В., 2006, с. 277.

29. В. К. Титюк, О. П. Чорний, І.А. Луценко, Барановська М.Л. Керування пуском потужних електроприводів, оптимізованим за енергетичною ефективністю: монографія – Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2022. – 264 с., іл.