

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Електротехніки та енергоефективності

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення ефективності електроспоживання приводів з машинами постійного та змінного струму

Виконав: студент 5 курсу, групи ЕТ-17-1бз
спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

Мирошніченко С.П.

Керівник д.т.н., проф. Артемчук В.В.

Рецензент доц. Коваленко В.Л.

Запоріжжя

2022 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М. _____
Кафедра електротехніки та енергоефективності
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.  В.Л. Коваленко

“ 23 ” _____ травня 2022 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

_____ Мирошніченко Сергію Павловичу _____

1. Тема роботи: Підвищення ефективності електроспоживання приводів з машинами постійного та змінного струму _____

Керівник роботи: д.т.н., проф. Артемчук В.В. _____





2. Строк подання студентом роботи: 15 травня 2022 року _____
затверджені наказом ЗНУ від « 17 » січня 2021 року № 91 - с _____

3. Вихідні дані до роботи: частота напруги 50 Гц, потужність двигунів до 1400 кВт; число фаз – 3; сбудження машин – комбіноване

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; 1) Аналіз роботи машин постійного струму; 2) Аналіз роботи машин змінного струму; 3) Аналіз можливих шляхів підвищення ефективності електроспоживання приводів

5. Перелік графічного матеріалу: 1) Титульна сторінка; 2) Аналіз конструктивних особливостей машин постійного струму; 3) Аналіз конструктивних особливостей машин змінного струму; 4) Конструктивні особливості струмознімаючого вузла; 5) Розроблені заходи щодо підвищення ефективності електроприводів;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Нормоконтроль	Башлій В.С., доцент		

7. Дата видачі завдання

01.02.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Конструктивні особливості машин постійного струму	01.03.22	
2	Конструктивні особливості машин змінного струму	05.04.22	
3	Заходи щодо підвищення ефективності використання електроприводів	15.05.22	

Студент



(підпис)

Мирошніченко С.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи



(підпис)

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



(підпис)

Башлій В.С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка Мирошніченко С.П. «Підвищення ефективності електроспоживання приводів з машинами постійного та змінного струму» містить 87 сторінок, 31 рисунки, 35 джерел, 1 додаток.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Артемчук В.В. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електротехніки та енергоефективності, 2022 р.

У представленій роботі проведено аналіз фізичних процесів, які відбуваються в електричних машинах постійного та змінного струмів, фізичні засади прискореного зношування у пускових режимах. Запропоновано варіант заміни застарілих двигунів сучасними, з більш високим ККД, а також використання пускових пристроїв електроприводів, параметри і режим роботи яких впливають на технічний ресурс обладнання всіх видів, на періодичність планових ремонтів, виключає нераціональне енергоспоживання.

Ключові слова: ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИВОД, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ, ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	8
1.1 Види машин постійного струму	8
1.2 Будова машин постійного струму загального призначення	11
1.3 Принцип дії узагальненої машини постійного струму.....	17
2 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ	26
2.1 Елементи конструкції асинхронної машини.....	26
2.2 Принцип дії асинхронної машини.....	28
2.2.1 Модель для пояснення роботи асинхронного двигуна.....	29
2.3 Режими роботи асинхронних двигунів	31
2.4 Пуск та регулювання швидкості обертання ротора	35
2.5 Питання щодо підвищеного енергоспоживання електроприводу	42
3 ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....	46
3.1 Заміна електричних машин.....	46
3.2 Удосконалення системи пуску	48
3.3 Пускові системи для потужних нерегульованих електроприводів	58
3.4 Покращення енергоефективності електроприводів	67
Висновки.....	71
Перелік посилань	73
Додатки.....	77

ВСТУП

На даний час у народному господарстві широко розповсюджені електричні машини змінного струму, у більшій мірі асинхронні. Своє широке розповсюдження вони отримали завдяки своїм перевагам, серед яких можна виділити простота конструкції, надійність, відносно невисока вартість, відсутність колекторного вузла. У той же час такі машини мають суттєві недоліки, такі як високий пусковий струм та необхідність достатньо складної системи керування. Машини постійного струму мають протилежні переваги та недоліки, менш розповсюджені. Хоча з появою потужних постійних магнітів з високою коерцитивною силою машини постійного струму стають більш привабливими. Існують і універсальні машини, які на даний час найменш розповсюджені.

Не дивлячись на різноманіття електричних машин, при їх використанні необхідно дивитись не як на окрему одиницю, а як на комплексну систему, що зв'язана з приводним механізмом, тобто систему електропривода.

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.

У роботі розглянуто фізичні засади прискореного зношування у пускових режимах. Встановлено, що найзначнішими складовими ресурсних витрат процесу пуску є споживання електроенергії, технічний ресурс електромеханічного обладнання та додаткові економічні ризики, пов'язані з порушеннями роботи через локальне зниження якості напруги живлення.

1 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Види машин постійного струму

Як відомо, машиною постійного струму (МПС) називається така обертова електрична машина, в якій під час основного процесу перетворення енергії споживається або виробляється електрична енергія постійного струму [1].

За призначенням розрізняють наступні види МПС:

- генератори постійного струму (ГПС), призначені для генерування електричної енергії постійного струму;
- двигуни постійного струму (ДПС), призначені для приведення в рух робочих машин і механізмів з регулюванням частоти обертання в широких межах;
- електромашинні підсилювачі (ЕМП) постійного струму, призначені для підсилення потужності постійного струму, до яких відносяться ЕМП з поперечним та повздовжнім полем;
- електромашинні перетворювачі постійного струму в змінний струм і навпаки, до яких відносяться двохякірні перетворювачі, однакірний перетворювач постійного струму та однакірний перетворювач змінного струму в постійний;
- електричні машини постійного струму систем автоматики, до яких відносяться виконавчі двигуни із звичайним якорем, з порожнім и дисковим якорем с печатними обмотками; тахогенератори, призначені для контролю і вимірювання частоти обертання механізмів і машин;
- спеціальні види МПС: уніполярні машини, магнітогідродинамічні машини (МГД), вентильні двигуни постійного струму та ін.

Найчастіше машини постійного струму використовуються в якості двигунів та генераторів.

Широке розповсюдження машин постійного струму, незважаючи на більшу вартість і складність в експлуатації і обслуговуванні порівняно з іншими видами обертових машин, пояснюється можливістю досить простого і надійного регулювання частоти обертання, більшими пусковими моментами і високою перевантажувальною здатністю.

Машини постійного струму серії П (серія створена в 1956 році, для неї встановлена нормалізована шкала потужностей та номінальних частотообертання) застосовуються як двигуни і генератори у різних галузях промисловості і сільського господарства. Випуск машин серії П припинений, але в експлуатації знаходиться значна кількість машин. Електричні машини серії П охоплюють діапазон потужностей: від 0,3 до 200 кВт – 1- 11 га-барити; від 200 до 1400 кВт – 12-17 габарити; понад 1400 кВт – 18-28 габарити. Габарит машини визначається зовнішнім діаметром якоря [2, 3].

Електричні машини серії 2П (серія створена в 1974 році, спроектована у відповідності із вимогами МЕК, має єдину шкалу номінальних висот осей обертання) замінили машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС(Т), ПБС(Т), ПР. Серія машин постійного струму 2П охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт.

Машини цієї серії призначені для роботи в електроприводах з широким діапазоном регулювання швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах серії 2П підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, покращені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації, підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи.

Виходячи з вимог сучасного електропривода в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- за регульовальними властивостями: двигуни з нормальним регулюванням з діапазоном до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;
- по типу конструкції: закриті, захищені;

- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регульовальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму. З метою значного зниження (в 2 - 3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів в новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання і випробувань машин постійного струму технологічного устаткування, створеного для серії 4А.

В уніфікованій конструкції серії 4ПО і 4ПБ магнітопровід статора неявнополюсний з розподіленими обмотками в пазах. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку, компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах розточки статора [3].

В уніфікованій конструкції двигунів 4ПО і 4ПБ однакові габарити із двигунами серії 4А, можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники і їхні кришки

Перевагами уніфікованої конструкції двигунів постійного струму в порівнянні з явнополюсними традиційної конструкції є:

- розподіл статорних обмоток двигунів у порівняно великій кількості пазів, що приносить позитивний ефект, що виражається в поліпшенні тепловіддачі, і дозволяє істотно збільшити щільності струмів;
- повна компенсація поля реакції якоря по всій його окружності;
 - застосування повністю шихтованого магнітопроводу, що зменшує його магнітну несиметрію і практично усуває відставання в часі змін магнітного потоку додаткових полюсів від зміни струму в їхніх обмотках і,

отже, підвищує комутаційну здатність двигунів у стаціонарних і динамічних режимах роботи;

- перехід до ступеня захисту IP44 в уніфікованих двигунах від звичайно застосовуваної у двигунах традиційної конструкції ступеня захисту IP23, що підвищує надійність цих двигунів в експлуатації.

Заміна двигунів серії 2П як закритого, так і захищеного виконання на двигуни уніфікованої конструкції серії 4П забезпечує збільшення номінальної потужності в заданому габариті на одну шкалу, зниження матеріалоемності на 15 - 20%, зменшення витрати обмотувальної міді на 25 – 35 % і зниження трудомісткості виготовлення в 2,5 - 3 рази.

1.2 Будова машин постійного струму загального призначення

Машина постійного струму складається зі статора, ротора (якоря) і повітряного проміжку (рис. 1.1) [2].

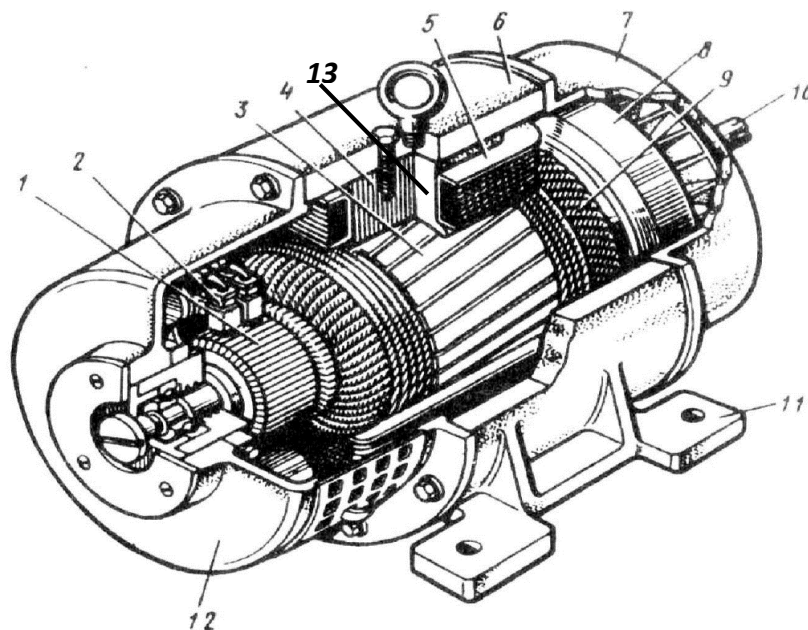


Рисунок 1.1 – Будова машини постійного струму

1 – колектор; 2 – щітко утримувач зі щітками; 3 – осердя якоря із обмоткою;
 4 – головні полюси; 5 – полюсна котушка (обмотка); 6 – станина;
 7,12 – підшипникові щити; 8 – вентилятор; 9 – лобові частини обмотки якоря; 10 – вал; 11 – лапи станини; 13 – осердя головного полюсу (ярмо) [2]

Нерухома частина машини – статор, складається зі станини б (корпуса), ярма 13, головних і додаткових полюсів з обмотками 5. Ярмо 13 (рис. 1.1) в машинах постійного струму призначено для створення шляху, за яким замикається постійний магнітний потік машини. Зазвичай, ярмо виконується масивним зі сталевих труб (для машин малої потужності), сталю прокату або сталю лиття і одночасно виконує функції станини – частини, до якої кріпляться інші нерухомі частини і за допомогою якої машина закріплюється на фундаменті або основі.

Головні полюси (рис. 1.2) призначені для створення основного магнітного потоку машини і складаються з осердя і обмотки, додаткові полюси призначені для зменшення іскріння під щітками. Осердя полюсів набираються з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5...1 мм або з листів конструкційної сталі товщиною до 2 мм.

Оскільки магнітний потік в сталих режимах роботи машини практично не змінюється, то виштамповані листи не ізолюються один від іншого. Осердя полюсів стягуються шпильками, або масивними сталевими стрижнями. Нижня, розширена частина осердя головних полюсів називається полюсним наконечником або полюсним башмаком.

Обмотки головних 3 і додаткових 6 полюсів виготовляють з ізолюваного мідного проводу круглого або прямокутного перерізу (рис. 1.2). Розташована на полюсі обмотка часто розділяється на декілька котушок, які розділяються дистанційними шайбами, для покращення охолодження.

Ротор машини постійного струму складається з якоря і колектора, які розташовані на валу. Осердя якоря набирається з штампованих дисків електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм (рис. 1.3).

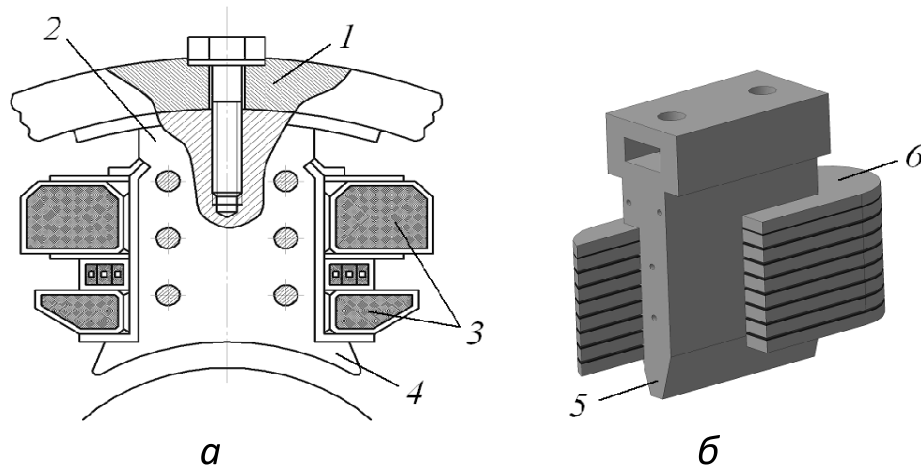


Рисунок 1.2 – Будова полюсів МПС [2]:

а – головний полюс; б – додатковий полюс;

1 – станина; 2 – осердя основного (головного) полюса; 3 – обмотка збудження; 4 – полюсний наконечник; 5 – осердя додаткового полюса;
6 – обмотка додаткового полюса

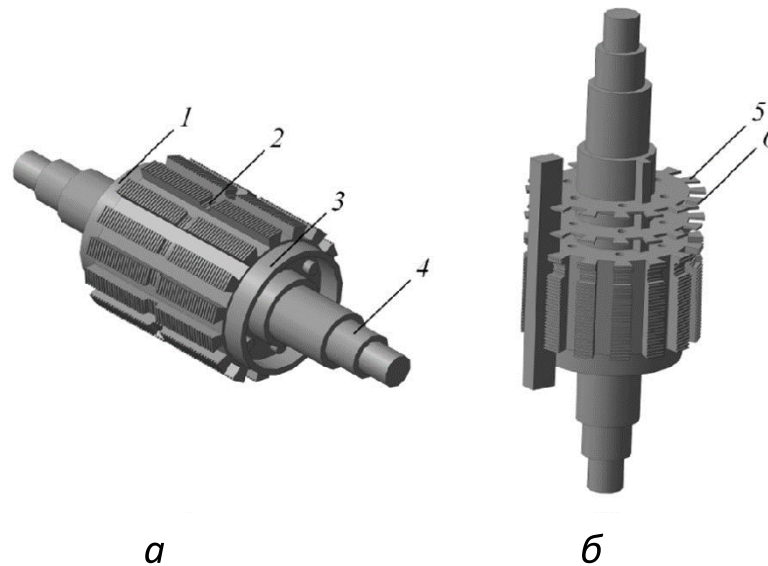


Рисунок 1.3 – Будова осердя якоря (а) і його збирання (б) [2]:

1, 3 – натискні шайби (для утримання обмотки); 2 – виточка для укладання бандажа; 4 – місце для пресування колектора; 5 – ізоляційна плівка;
6 – сталевий лист

Диски насаджуються безпосередньо на вал (в машинах малої та середньої потужності) або набираються на якірну втулку (в машинах великої

потужності). Осердя якоря діаметром більше 100 см та більше виготовляються зі штампованих сегментів. В осерді якоря в залежності від вибраної системи вентиляції можуть бути аксіальні або радіальні канали. Аксіальні канали утворюються отворами в дисках осердя. Радіальні канали утворюються дистанційними розпірками, які розділяють осердя на окремі пакети. В пази на поверхні якоря укладається обмотка якоря (рис. 1.4).

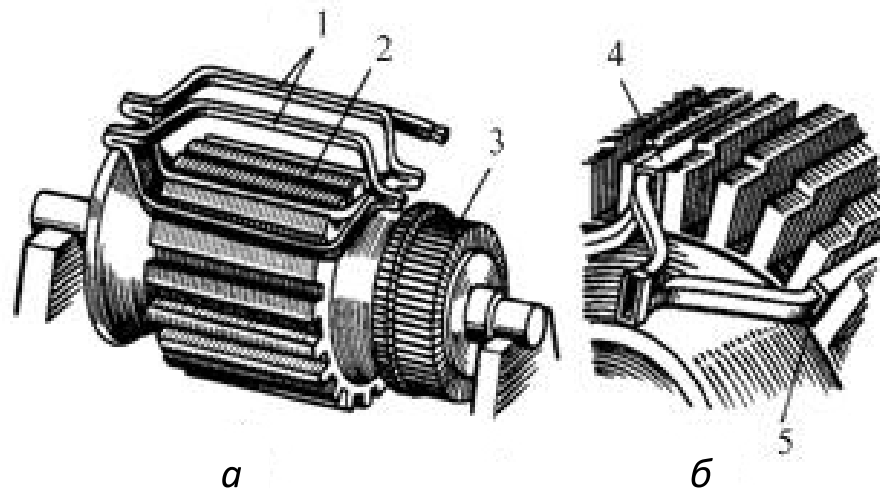


Рисунок 1.4 – Будова якірних котушок (а) і розташування їх в пазах (б) [2]:

1 – якірні котушки; 2 – осердя якоря; 3 – колектор; 4 – верхня сторона якірної котушки; 5 – нижня сторона якірної котушки

Обмотку якоря виготовляють з круглого або прямокутного обмотувального проводу. Зазвичай, обмотка складається з окремих, заздалегідь намотаних якірних котушок, які ізолюють і укладають в пази осердя якоря. Обмотку виконують двохшаровою, в кожний паз укладають дві сторони різних якірних котушок - одну над іншою. Кожна якірна котушка включає в себе декілька секцій, кінці яких припаюють до відповідних колекторних пластин. Секції обмотки можуть бути одно- або багатовитковими.

Колектор машини постійного струму (рис. 1.5) складається з мідних пластин товщиною 3-15 мм, ізольованих одна від іншої міканітовими прокладками товщиною близько 1 мм. Пластини мають трапецеїдальний

переріз і разом з прокладками складають кільце, яке скріплюється за допомогою фланців.

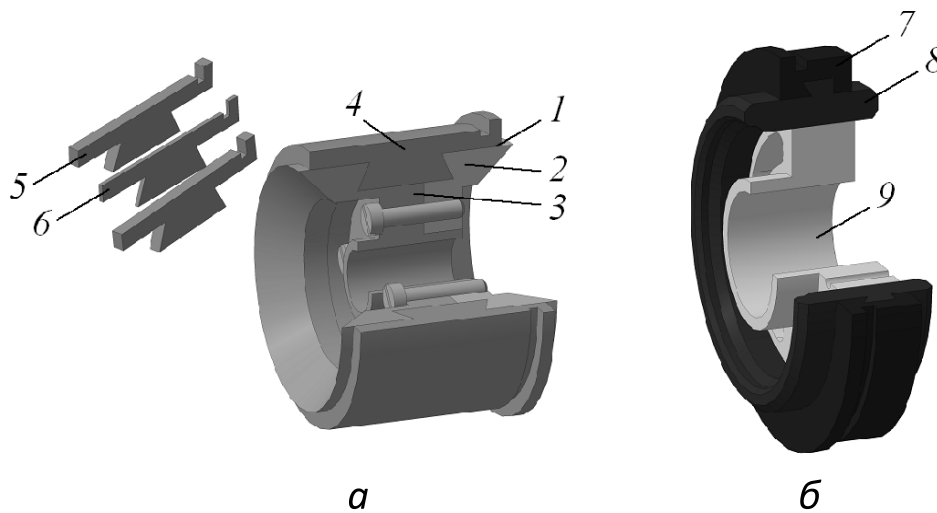


Рисунок 1.5 – Будова колектора машини постійного струму з металевим (а) і пластмасовим (б) корпусом [2]:

1 – ізоляційні манжети; 2 – натискний фланець; 3 – корпус; 4 – колекторна пластина; 5 – виступаюча частина колекторної пластини; 6 – ізоляційна прокладка; 7 – колекторна пластина з ізоляційними прокладками; 8 – пластмаса; 9 – втулка

Секції обмотки якоря впаюють в прорізи, які розташовані в виступаючій частині пластин. В машинах малої і середньої потужності використовують колектори, в яких мідні пластини і міканітові прокладки запресовані в пластмасу. Поверхню зібраного колектора обточують натокарному верстаті і шліфують. Для того, щоб міканітові прокладки приспрацюванні колектора на виступали над пластинами і не викликали вібрації щіток, їх фрезерують на 0,8-1,5 мм нижче поверхні колектора.

Для відведення та підведення струму до колектора використовується щітковий апарат (рис. 1.6), до складу якого входять: щітки, щіткоутримувач, щіточні пальці, траверса і струмові шини.

Щіткоутримувачі закріплюються на щіточних пальцях, які кріпляться

до щіточної траверси і електрично ізолюються від неї. Траверса закріплюється на нерухомій частині машини. Зазвичай передбачається можливість повороту траверси для встановлення щіток в правильне положення.

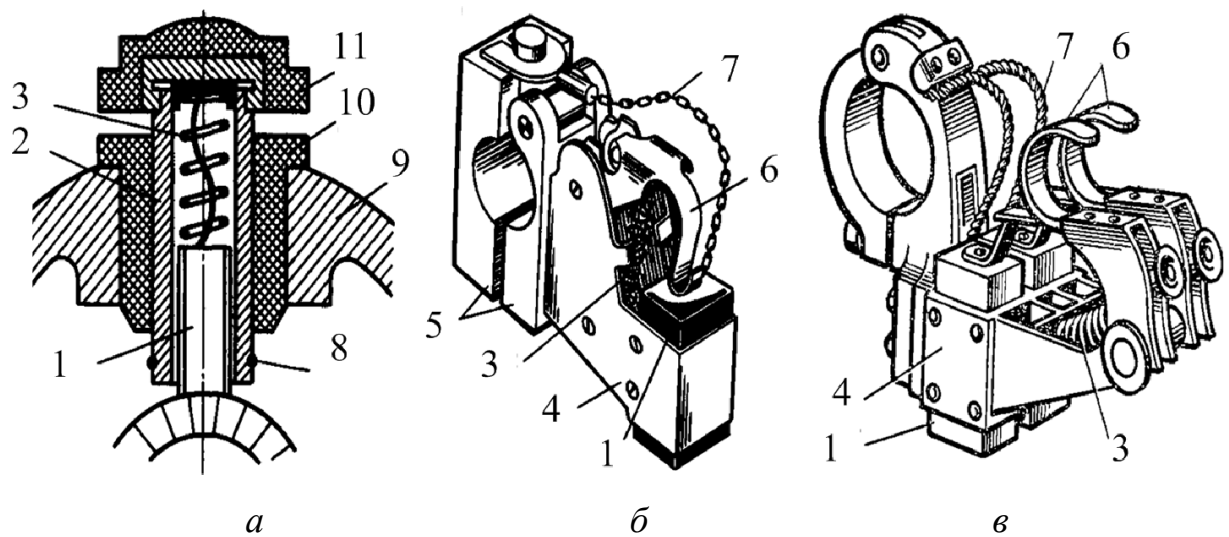


Рисунок 1.6 – Будова щіткоутримувачів МПС малої (а), середньої (б) і великої (в) потужності [3]:

- 1 – щітка; 2 – обойма; 3 – пружина; 4 – обойма; 5 – затискачі для кріплення до щіткового пальця; 6 – натискні пластини; 7 – щітково-вий канатик;
 8 – затискач для вивідного провідника; 9 – підшипниковий щит;
 10 – ізоляційна втулка; 11 – ковпак

В залежності від складу, способу виготовлення та фізичних властивостей всі щітки (рис. 1.7) ділять на шість основних груп: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, мідно-графітні, бронзо-графітні та срібно-графітні. Вибір і застосування щіток залежить від типу машини, умов і режимів роботи.

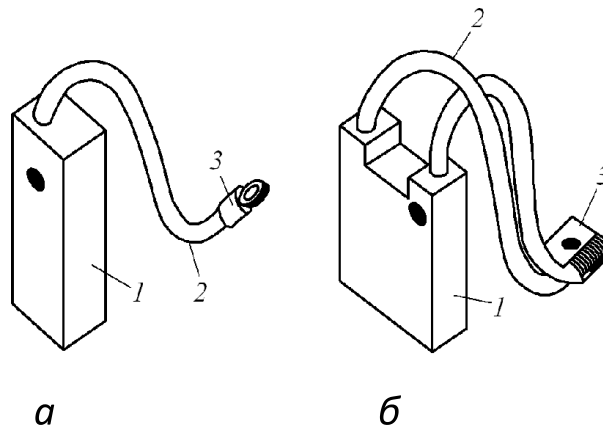


Рисунок 1.7 – Будова щіток МПС малої (а) і великої (б) потужності [2]:

1 – щітка; 2 – щітковий канатик; 3 – кабельний наконечник

Колектор і щітковий апарат найбільш відповідальні вузли, від конструкції і якості яких залежить надійна робота машини постійного струму.

1.3 Принцип дії узагальненої машини постійного струму

Для знаходження можливих шляхів поліпшення енергетичних показників електричних машин необхідно розібратись з їхнім принципом дії. Принцип дії машини постійного струму розглядається на основі моделі машини постійного струму (рис. 1.8). Статор машини постійного струму називається індуктором. Він складається з двох полюсів 1 (N, S), що створюють основний магнітний потік Φ , і ярма (станини), не наведеного на рисунку 1.8. Ротор найпростішої машини постійного струму складається з якоря 2, який представлений у вигляді сталевого осердя з обмоткою з одного витка, і колектора 3, який представлений у вигляді двох ізольованих одна від одної пластин. До колектора прилягають дві нерухомі щітки 4, що з'єднують обмотку якоря із зовнішніми колами [3, 4].

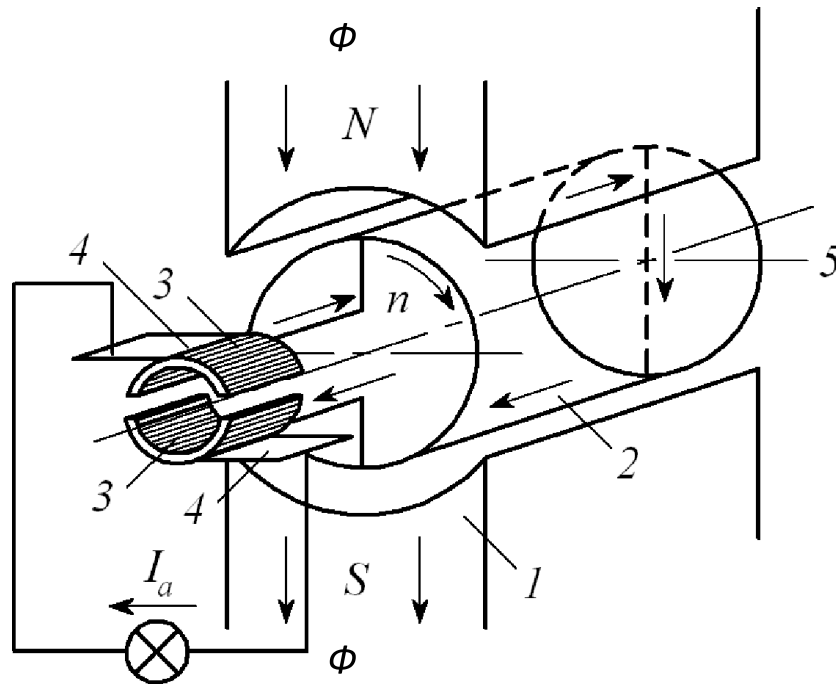


Рисунок 1.8 – Модель машини постійного струму [3]

Магнітний потік Φ виходить з північного полюса N , пронизує якір, входить у південний полюс S і замикається по ярму, повертаючись до північного полюса N .

Величина магнітної індукції в повітряному проміжку між якорем і полюсами змінюється від максимального значення під полюсами, до нуля на лінії геометричної нейтралі 5.

Режим генератора. Якір машини постійного струму обертається первинним двигуном за годинниковою стрілкою. В провідниках обмотки якоря індуктується електрорушійна сила (ЕРС), напрям якої може бути визначено за правилом правої руки. Оскільки потік полюсів Φ вважається постійним, то індукована ЕРС створюється виключно внаслідок обертання якоря і називається ЕРС обертання.

Величина ЕРС обертання, що індуктується в провіднику обмотки якоря [3]:

$$e_{np} = B \cdot l \cdot v,$$

де B – величина магнітної індукції в повітряному проміжку між полюсом і якорем в місці розташування провідника;

l – активна довжина провідника, тобто довжина, на протязі якої провідник розташований у магнітному полі;

v – лінійна швидкість руху провідника.

В обох провідниках, внаслідок симетрії, індукуються однакові e_{np} , які складаються за контуром витка, утворюючи повну ЕРС якоря машини, амплітудне значення якої визначається виразом [4]:

$$E_a = 2e_{np} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v.$$

Оскільки провідники обмотки якоря при обертанні проходять по чергово під північним та південним полюсом машини, то напрям ЕРС в провіднику змінюється. За формою крива ЕРС провідника повторює криву розподілення індукції B в повітряному проміжку (рис. 1.9). Частота ЕРС залежить від частоти обертання якоря і кількості пар полюсів.

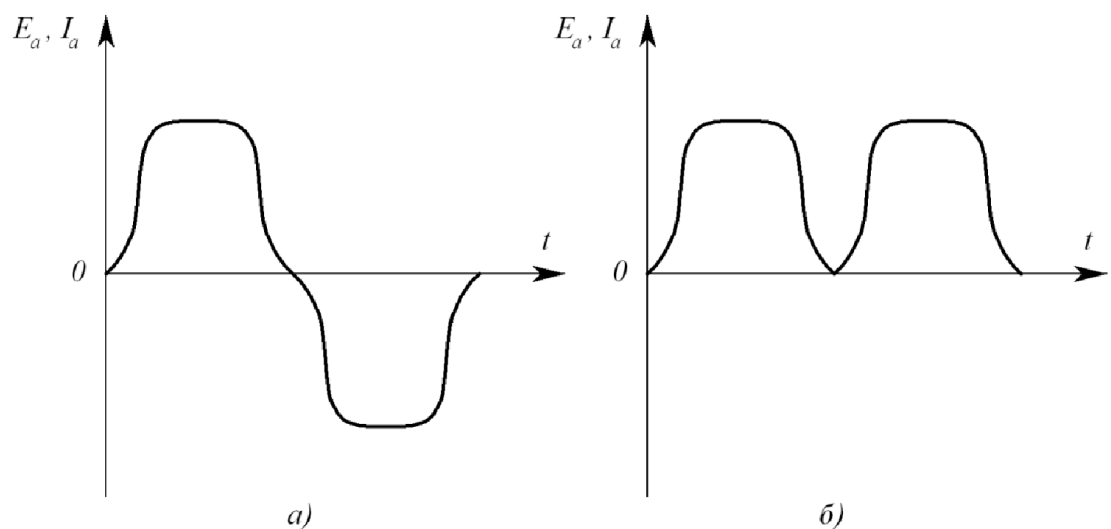


Рисунок 1.9 – Форма кривої ЕРС і струму в якорі (а) і зовнішній мережі (б) моделі машини постійного струму [3]

При підключенні обмотки якоря за допомогою щіток до зовнішньої мережі, по ній і по обмотці якоря потече струм I_a . В обмотці якоря струм буде змінним і його крива буде аналогічною кривій ЕРС.

Однак в зовнішній мережі напрям струму буде постійним, що пояснюється дією колектора. При обертанні якоря з колектором і зміні напрямку ЕРС в провіднику, одночасно відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Внаслідок чого, під верхньою щіткою завжди буде знаходитися пластина, що з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним полюсом. В результаті чого, полярність щіток і напрям струму в зовнішній мережі залишаються незмінними.

Таким чином, в генераторі колектор виконує функцію механічного випрямляча, який перетворює змінний струм обмотки якоря в постійний струм в зовнішній мережі.

Змінивши знак напівперіода кривої ЕРС і струму I_a , отримаємо форму кривої ЕРС і струму I_a в зовнішній мережі.

Напряга постійного струму на затискачах генератора визначається E_a і величиною падіння напруги на опорах елементів обмотки якоря ΣR_i

$$U_a = E_a - I_a \cdot \Sigma R_i$$

Провідники обмотки якоря із струмом I_a розташовані в магнітному полі і на них діють електромагнітні сили:

$$F_{np} = B \cdot l \cdot I_a$$

напряг яких визначається за правилом лівої руки. Електромагнітні сили створюють механічний обертовий момент M_{em} , який називається електромагнітним моментом:

$$M_{em} = F_{np} \cdot D_a,$$

де D_a – діаметр якоря, мм.

В режимі генератора M_{em} діє в протилежному обертанню якоря напрямку і є гальмівним (рис. 1.10).

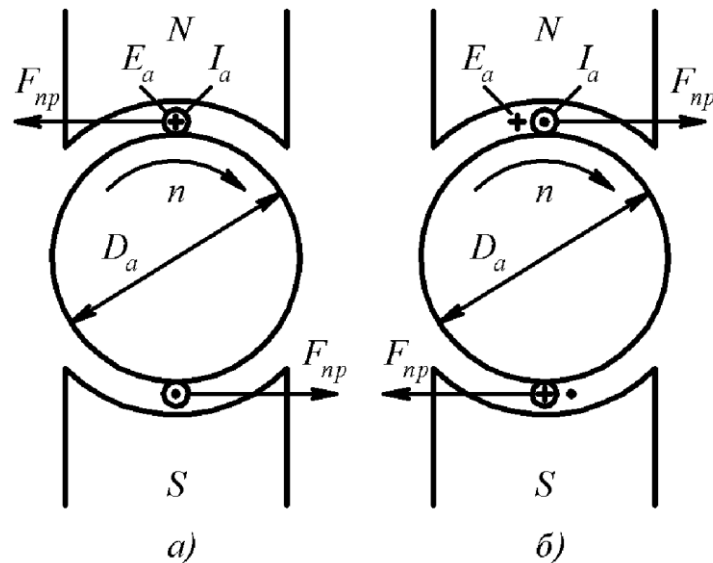


Рисунок 1.10 – Робота машини постійного струму в режимі генератора (а) і двигуна (б) [4]

Режим двигуна. До обмотки якоря підводиться постійна напруга U_a від зовнішнього джерела живлення, по обмотці якоря протікає струм I_a . При цьому на провідники обмотки якоря діють електромагнітні сили F_{np} і створюється електромагнітний момент M_{em} . При достатньому значенні M_{em} , якір машини буде обертатися і розвивати механічну потужність. Момент M_{em} при цьому є обертовим і діє в напрямку обертання якоря.

В режимі двигуна колектор перетворює постійний струм, що споживається з зовнішньої мережі, в змінний струм, що протікає в обмотці якоря, і виконує функції механічного інвертора струму.

Провідники обмотки якоря в режимі двигуна обертаються в магнітному полі, в них індукується E_a . При збереженні напрямку обертання якоря, напрямки напруги U_a і струму I_a в обмотці якоря при зміні режиму змінилися на протилежний.

Таким чином, E_a в двигуні постійного струму направлена зустрічно прикладеній напрузі U_a і струму I_a в обмотці якоря, тому E_a в якорі двигуна постійного струму називається *противоЕРС*. Напруга, прикладена до затискачів якоря двигуна постійного струму, врівноважується E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки елементів якоря ΣRi .

$$U_a = E_a + I_a \cdot \Sigma Ri.$$

Таким чином, в режимі генератора $U_a \leq E_a$, а в режимі двигуна $U_a \geq E_a$.

Грунтуючись на розглянутому принципі дії машини постійного струму, можна зробити висновок, що будь-яка машина постійного струму може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Така якість притаманна всім типам обертових електричних машин і називається *оберненністю*. Можливість зміни режиму роботи машини постійного струму пояснюється можливістю зміни напрямків моментів, ЕРС та струмів в окремих елементах.

Таким чином, для зміни режиму роботи машини постійного струму при постійній полярності полюсів і щіток і при незмінному напрямі обертання необхідно змінити напрям струму в обмотці якоря. Напрямки ЕРС, струму і моментів в генераторі (а) і двигуні (б) постійного струму представлено на рисунку 1.11.

ЕРС обмотки якоря машини постійного струму. При обертанні обмотки якоря в магнітному полі машини з частотою обертання E_{np} в кожному її провіднику створюється ЕРС E_{np} :

$$E_{np} = B_{cp} \cdot l \cdot v,$$

де B_{cp} – середнє значення магнітної індукції в машині, Тл;

l – довжина провідника в пазу (приблизно рівна довжині якоря), м;

v – лінійна (колова) швидкість руху провідника в магнітному полі, m/c .

$$v = \omega \cdot Da / 2,$$

де ω – кутова частота обертання, $рад/с$.

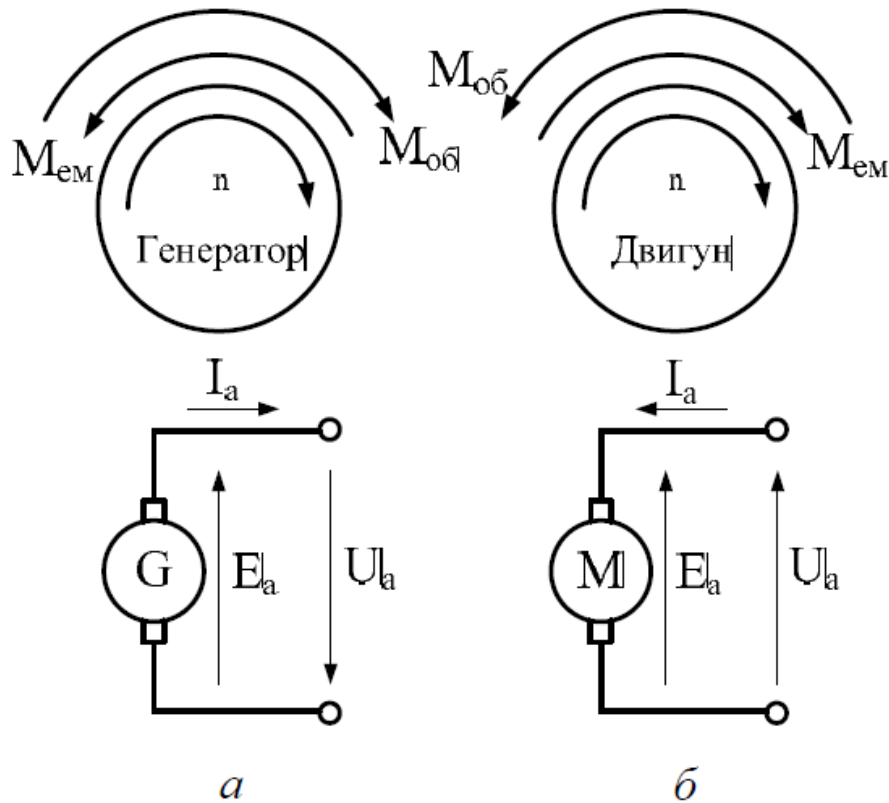


Рисунок 1.11 – Напрямки ЕРС, струму і моментів в генераторі (а) і двигуні (б) постійного струму

Середнє значення індукції пропорційне загальному потоку, що пронизує циліндр якоря і обернено пропорційне його площі

$$B_{cp} = 2p \cdot \Phi / \pi \cdot Da \cdot l,$$

де Φ – магнітний потік одного полюса, $Вб$;

Da – діаметр якоря, $м$;

$2p$ – число основних полюсів машини, шт.;

p – число пар полюсів машини, шт.

Тоді ЕРС провідника E_{np} можна представити, як

$$E_{np} = p \cdot \Phi \cdot \omega / \pi.$$

ЕРС обмотки – це та ЕРС, що створюється в одній паралельній вітці $N / 2a$ провідниками, отже

$$E_a = E_{np} \cdot N / 2a.$$

де N – число активних провідників обмотки, шт.;

$2a$ – число паралельних віток обмотки, шт.;

a – число пар паралельних віток обмотки, шт.

Таким чином

$$E_a = p \cdot N \cdot \Phi \cdot \omega / 2 \pi \cdot a,$$

де $p \cdot N / 2 \pi \cdot a = k$ – електромашинна стала.

Враховуючи, що $\omega = 2 \pi n / 60 = \pi n / 30$, тоді

$$E_a = p \cdot N \cdot \Phi \cdot n / 60 \cdot a,$$

де $p \cdot N / 60 \cdot a = k$ – електромашинна стала.

Отже, остаточна формула ЕРС якоря

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot \omega,$$

або

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot n.$$

Слід зазначити, що максимальне значення E_a буде мати лише в тому випадку, коли щітки розташовані на поперечній осі машини, яку називають геометричною нейтраллю. При зміщенні щіток з поперечної осі на кут β , значення ЕРС буде зменшуватись

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot \omega \cdot \cos \beta.$$

2 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1 Елементи конструкції асинхронної машини

Асинхронні електричні машини - це машини, в яких обертове магнітне поле і обертова частина машини (ротор) обертаються з різними швидкостями.

Асинхронні двигуни містять нерухому частину - статор і рухому – ротор (рис. 2.1). Ротори бувають двох типів: короткозамкнені і фазні. Обертове магнітне поле створюється або трифазною системою струмів або введенням спеціальної додаткової обмотки (для однофазних АД) [1, 2].

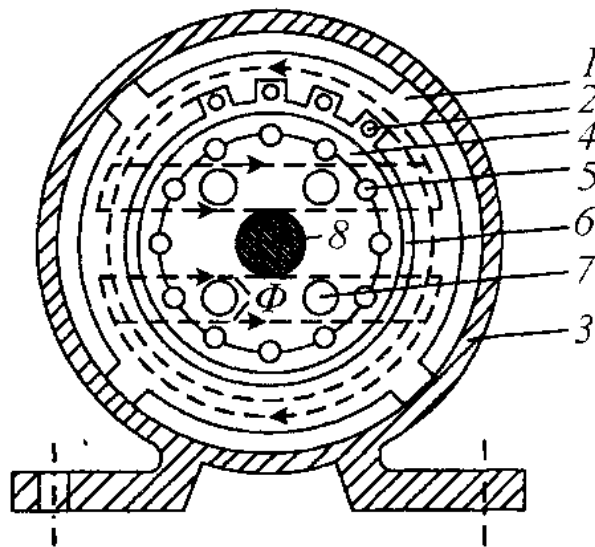


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема асинхронної машин [2]:

1 - осердя статора, набране із листів електротехнічної сталі; 2 - трифазна обмотка статора; 3 - корпус (станина) статора; 4 - осердя ротора, теж набране з листів електротехнічної сталі; 5 - обмотка ротора; 6 - повітряний проміжок між ротором і статором; 7 - вентиляційні канали; 8 - вал машини

Короткозамкнений ротор має обмотку з мідних або алюмінієвих стрижнів, укладених без ізоляції в пази на зовнішній поверхні ротора й замкнених з торців кільцями накоротко. Алюмінієву обмотку одержують, заливаючи в пази розтоплений алюміній. За зовнішнім виглядом

короткозамкнена обмотка нагадує колесо білки, тому її деколи називають "білячим колесом" (рис. 2.2).

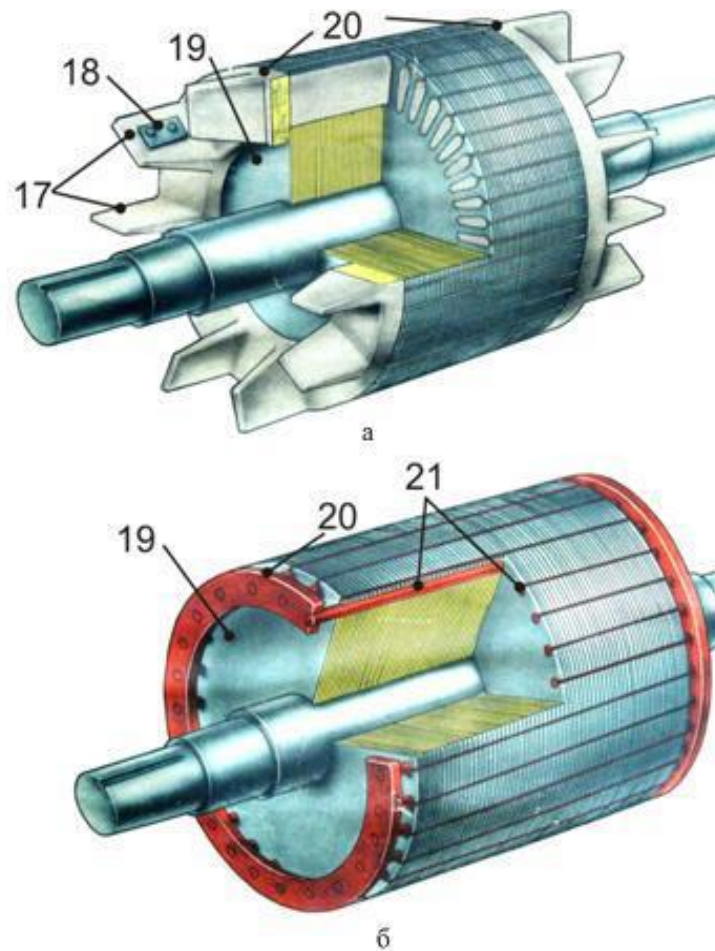


Рисунок 2.2 – Ротор асинхронної машини [5]

Фазний ротор має обмотку, виконану аналогічно трифазній обмотці статора. Вона теж трифазна (для трифазного двигуна). Кінці цих обмоток з'єднують в одну точку (з'єднання зіркою), а початки виводять до трьох контактних кілець, розташованих на валу (рис. 2.3).

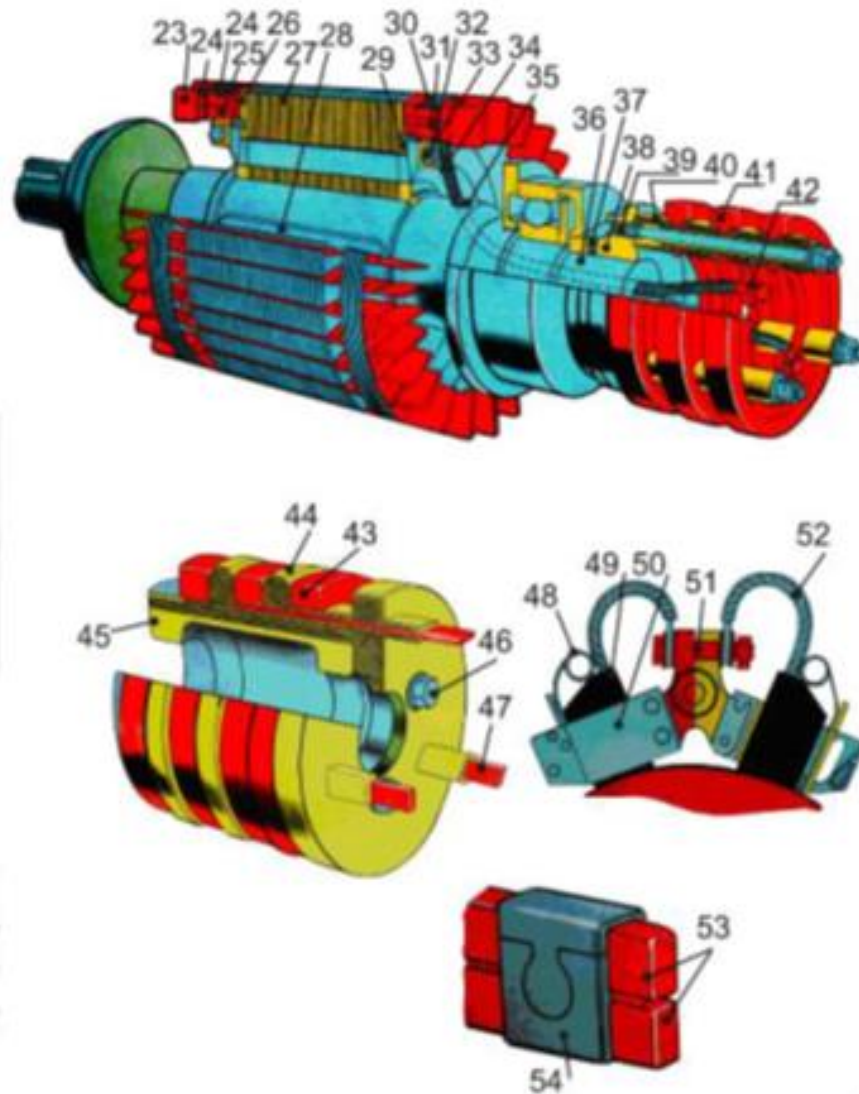


Рисунок 2.3 – Конструктивні елементи ротора [5]

2.2 Принцип дії асинхронної машини

На обмотку статора подається змінна напруга, під дією якої в обмотках протікає трифазна система струмів. Оскільки обмотки в асинхронній машині зрушені один відносно одного на 120 градусів (в симетричній системі струми в обмотках мають фазовий зсув в 120 градусів), в таких обмотках створюється обертове магнітне поле. Обертове магнітне поле, перетинаючи провідники обмотки ротора, індукує в них електрорушійну силу, під дією якої в обмотці ротора протікає струм. Цей струм (в роторі) породжує власне магнітне поле, яке взаємодіючи з магнітним полем статора, призводить до виникнення

електромагнітної сили, під дією якої ротор починає обертатися (тобто під дією сили Ампера, що діє на провідники обмотки ротора, які знаходяться в магнітному полі статора). Таким чином, щоб в обмотці ротора виникала ЕРС, необхідно, щоб швидкість обертання ротора відрізнялася від швидкості обертання поля статора.

Частота обертання ротора (асинхронна частота) завжди менша синхронної частоти, тобто ротор асинхронного двигуна завжди відстає від статора. Якщо б ротор обертася з частотою обертового поля, то це поле не перетинало б провідники обмотки ротора. В останніх не наводилася б ЕРС і не було б струмів, а це значить, що обертовий момент на роторі був би рівний нулю. Таким чином, ротор асинхронного двигуна принципово не може обертатися з синхронною частотою.

2.2.1 Модель для пояснення роботи асинхронного двигуна

При взаємодії магнітного поля статора і ротора до провідника прикладена сила F , що змушує його переміщатися у бік руху поля статора.

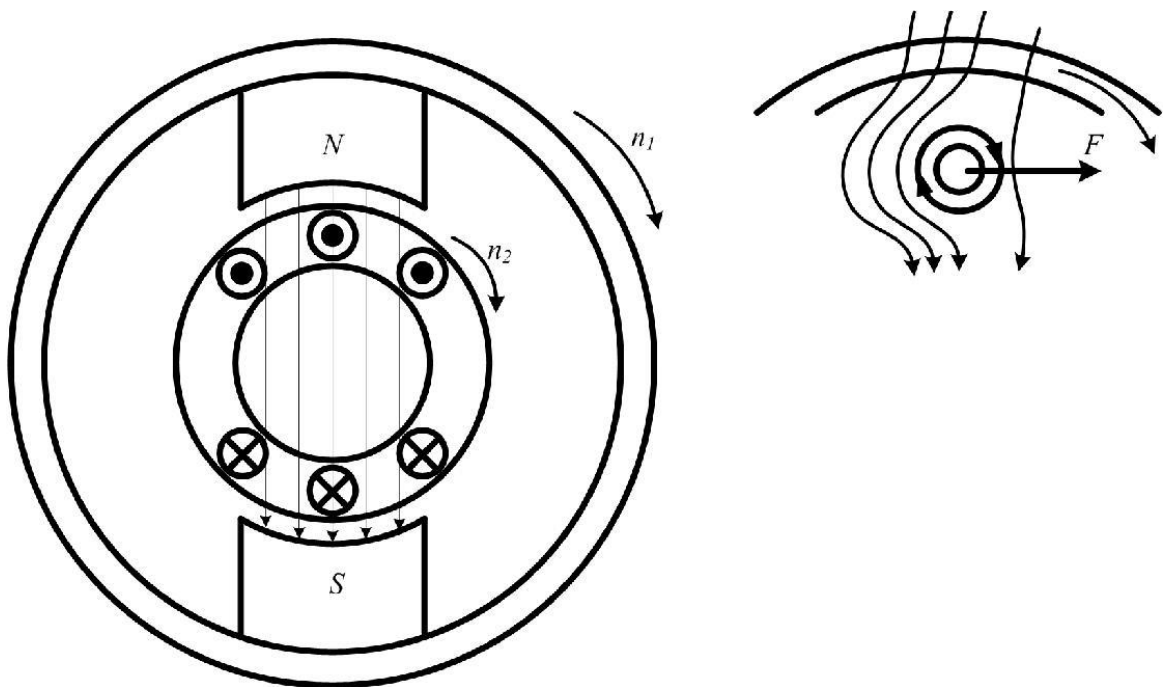


Рисунок 2.4 – Взаємодія магнітного поля статора і ротора [5]

Швидкість обертання поля визначають з формули

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Швидкість обертання ротора

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} (1 - S),$$

p — кількість пар полюсів статорної обмотки,

S — ковзання ротора,

f — частота змінного струму джерела живлення.

Ковзання АД. Коли обертовий момент АД і гальмівний момент робочого механізму врівноважуються, ротор матиме деяку усталену частоту обертання n_2 , меншу від n_1 . Різниця частот обертання магнітного поля статора n_1 і ротора n_2 , віднесена до частоти обертання магнітного поля статора, називається ковзанням:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%.$$

Отже, ковзання характеризує ступінь відставання ротора стосовно обертового магнітного поля. Мащини, в яких частота обертання ротора n_2 відрізняється від частоти обертання поля n_1 називають асинхронними.

З формули ковзання отримаємо кількість обертів ротора

$$n_2 = n_1(1 - s)$$

2.3 Режими роботи асинхронних двигунів

Згідно з принципом оберненості електричних машин, асинхронні машини можуть працювати як у режимі двигуна, так і у генераторному режимі (рис. 2.5). Крім того, можливий ще й режим електромагнітного гальмування – протидія.

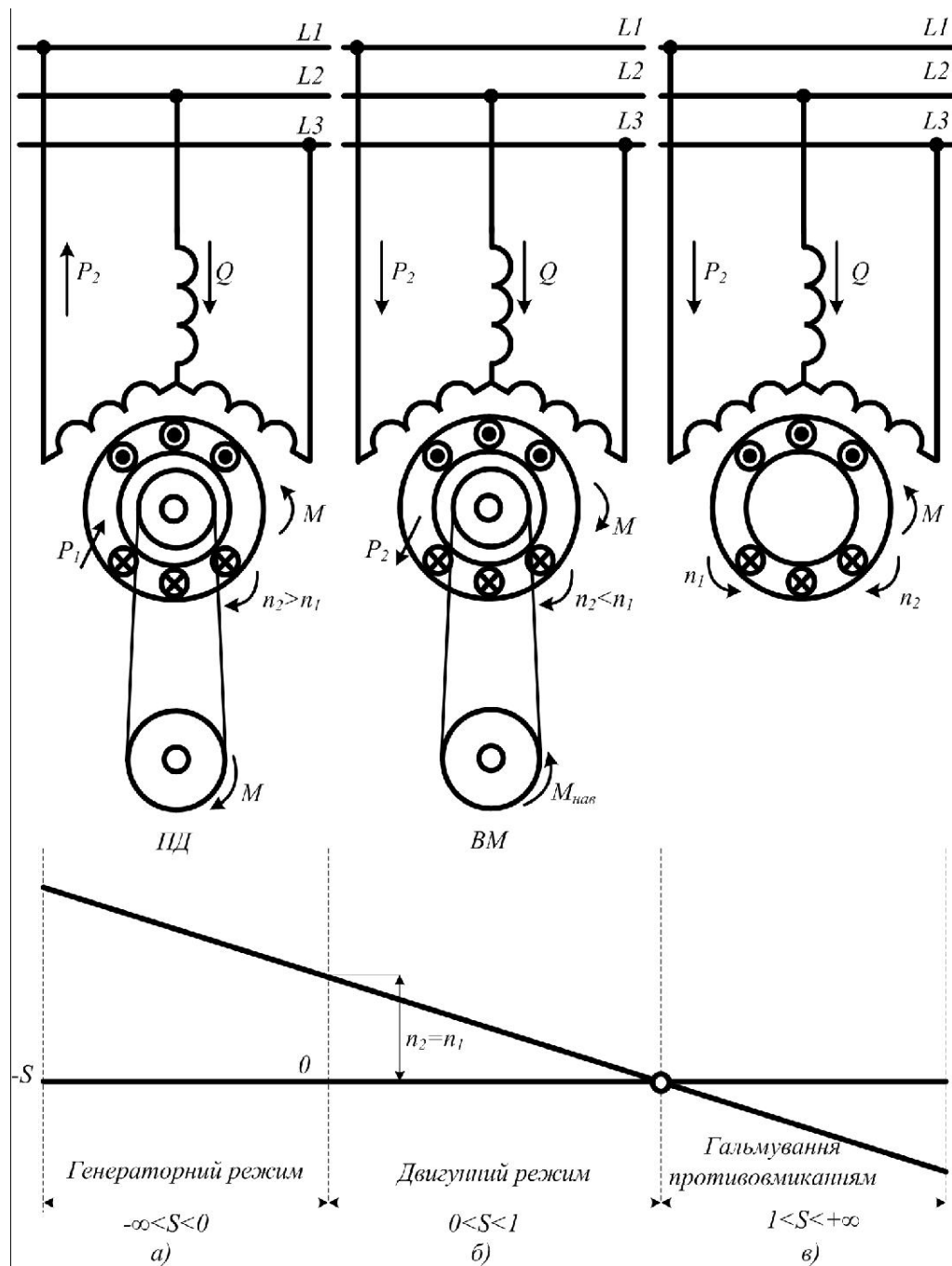


Рисунок 2.5 – Режими роботи асинхронних машин [6]

Режим двигуна. При включенні обмотки статора в мережі трифазного струму виникає обертове магнітне поле, яке, зчіпляючись з короткозамкненою обмоткою ротора, наводить у ній ЕРС. При цьому в стрижнях обмотки ротора з'являються струми, навколо яких утворюються власні магнітні поля. В результаті взаємодії магнітних полів ротора і статора, на роторі виникають електромагнітні сили. Сукупність цих сил створює електромагнітний момент, що обертається, під дією якого ротор асинхронного двигуна приходить в обертання з частотою $n_2 < n_1$ в бік обертання поля статора. Якщо вал асинхронного двигуна механічно з'єднати з валом якого-небудь виконавчого механізму (верстата, підйомного крана та інше.), то обертовий момент двигуна M , подолавши протидіючий момент (навантажувальний) $M_{нав}$ виконавчого механізму, призведе механізм до обертання.

Отже, електрична потужність P_1 , що надходить у двигун з мережі, в основній своїй частині перетворюється в механічну потужність P_2 і передається до виконавчого механізму. Зі збільшенням моменту навантаження на валу асинхронного двигуна частота обертання ротора n_2 зменшується. Отже, ковзання асинхронного двигуна залежить від механічного навантаження на валу двигуна і може змінюватися в діапазоні $0 < s \leq 1$.

При включенні асинхронного двигуна в мережу в початковий момент часу ротор під впливом сил інерції нерухомий ($n_2 = 0$). При цьому ковзання s дорівнює одиниці. У режимі роботи двигуна без навантаження на валу (режим холостого ходу) ротор обертається з частотою трохи меншою синхронної частоти обертання n_1 й ковзання дуже мало відрізняється від нуля ($s \approx 0$). Ковзання, що відповідає номінальному навантаженні двигуна, називають номінальним ковзанням $S_{ном}$. Для асинхронних двигунів загального призначення $S_{ном} = 1 \dots 8 \%$, при цьому для двигунів великої потужності $S_{ном} = 1 \%$, а для двигунів малої потужності $S_{ном} = 8 \%$.

Генераторний режим. Якщо обмотки статора включити в мережу, а ротор асинхронної машини за допомогою приводного механізму (двигун

внутрішнього згорання, турбіна і т.д.), який є джерелом механічної енергії, обертати в напрямку обертання магнітного поля статора з частотою $n_2 > n_1$, то напрямок руху ротора щодо поля статора зміниться на зворотній (порівняно з двигунним режимом роботи цієї машини), оскільки ротор обганятиме поле статора. При цьому ковзання стане від'ємним, а ЕРС, наведена в обмотці ротора, змінить свій напрямок. Електромагнітний момент на роторі M також змінить свій напрямок, тобто буде направлений зустрічно обертового магнітного поля статора і стане гальмівним по відношенню до обертового моменту приводного двигуна M_1 . У цьому випадку механічна потужність приводного двигуна в основній своїй частині буде перетворена в електричну активну потужність P_2 змінного струму.

Особливість роботи асинхронного генератора полягає в тому, що обертаючись магнітне поле в ньому створює реактивну потужність Q трифазної мережі, в яку включено генератор і куди він віддає вироблювану активну потужність P_2 . Отже, для роботи асинхронного генератора необхідне джерело змінного струму, при підключенні до якого відбувається зрушення генератора, тобто в ньому зрушується обертове магнітне поле.

Ковзання асинхронної машини у генераторному режимі може змінюватися в діапазоні $-\infty < s < 0$, тобто воно може приймати будь-які від'ємні значення. Особливість роботи асинхронного генератора полягає в тому, що обертаючись магнітне поле в ньому створює реактивну потужність Q трифазної мережі, в яку включено генератор і куди він віддає вироблювану активну потужність P_2 . Отже, для роботи асинхронного генератора необхідне джерело змінного струму, при підключенні до якого відбувається зрушення генератора, тобто в ньому зрушується обертове магнітне поле. Ковзання асинхронної машини у генераторному режимі може змінюватися в діапазоні $-\infty < s < 0$, тобто воно може приймати будь-які від'ємні значення.

Гальмівний режим. Якщо у працюючого трифазного асинхронного двигуна поміняти місцями будь-яку пару приєднувальних проводів, що підходять до статора з мережі, то обертове поле статора змінить напрямок

обертання на зворотній. При цьому ротор асинхронної машини під дією сил інерції буде продовжувати обертання у попередньому напрямку. Іншими словами, ротор і поле статора асинхронної машини будуть обертатися в протилежних напрямках. У цих умовах електромагнітний момент машини, спрямований у бік обертання поля статора, буде чинити на ротор гальмуючу дію. Цей режим роботи асинхронної машини називається електромагнітним гальмуванням (протидією). Активна потужність, що надходить з мережі в машину при цьому режимі, частково витрачається на компенсацію механічної потужності повороту ротора, тобто на його гальмування.

У режимі електромагнітного гальмування частота обертання ротора є негативною, а тому ковзання набуває додатні значення більше одиниці [6]:

$$s = \frac{[n_1 - (-n_2)]}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} > 1$$

Ковзання асинхронної машини в режимі гальмування противовмиканням може змінюватися в діапазоні $1 < s < \infty$, тобто воно може приймати будь-які значення більше одиниці.

Таким чином, характерною особливістю роботи асинхронної машини є нерівність частот обертання магнітного поля статора n_1 і ротора n_2 , тобто наявність ковзання, оскільки тільки в цьому випадку обертове магнітне поле наводить в обмотці ротора ЕРС і на роторі виникає електромагнітний момент. При цьому кожному режиму роботи асинхронної машини відповідає певний діапазон змін ковзання, а отже, і частоти обертання ротора.

З розглянутих режимів роботи найбільше практичне застосування отримав двигунний режим асинхронної машини, тобто частіше використовують асинхронні двигуни, які складають основу сучасного електропривода, вигідно відрізняючись від інших електродвигунів простотою

конструкції і високою надійністю. Тому теорію асинхронних машин прийнято викладати стосовно асинхронних двигунів.

2.4 Пуск та регулювання швидкості обертання ротора

Обертання швидкості обертання ротора регулюються:

- зміною частоти f_1 ;
- зміною кількості пар полюсів p ;
- зміною ковзання s .

Пуск АД. Під час пуску АД з номінальною напругою живлення виникають значні пускові струми в обмотці статора, що у декілька (5 - 7) разів перевищують номінальні. Це небезпечно для двигуна й для мережі.

Для покращення пускових характеристик АД штучно підвищують опір обмотки ротора, що призводить до збільшення пускового моменту та зменшення пускового струму.

Для зміни напрямку обертання двигуна необхідно змінити послідовність приєднання обмоток статора до мережі (поміняти місцями будь-які дві фази, наприклад А і В): початок обмотки С1 з'єднати з лінійним провідником В, початок обмотки С2 - з провідником А, а початок обмотки С3 залишити приєднаним до провідника С [7, 8].

Пусковий струм в лінії при сполученні обмоток статора "зіркою" втричі менший, ніж при сполученні їх "трикутником". Пусковий момент при цьому зменшується теж втричі [9].

Введення додаткового опору в коло ротора на час пуску дає змогу збільшити пусковий момент аж до максимального значення M_{\max} і одночасно значно зменшити пусковий струм [10].

Аналіз процесів пуску електромеханічної системи ґрунтується на класичних положеннях і законах класичної механіки – законі Ньютона та законі збереження моменту імпульсу [11]. У класичній теорії електроприводу [12, 13] аналіз руху електроприводу здійснюється на підставі рівнянь Ньютона

для обертального руху, які є лише окремим випадком закону збереження моменту імпульсу і не враховують деякі важливі особливості протікання процесу пуску.

Розглянемо рівняння динаміки обертального руху у вигляді закону збереження імпульсу для обертального руху, яке задається виразом [12]:

$$d(J_{\Sigma} \cdot \omega) dt = (T_E - T_L)$$

де J_{Σ} – сумарний приведений до вала електроприводу момент інерції електроприводу;

T_E, T_L – рушійний момент електроприводу і статичний момент опору робочої машини відповідно.

Виконуючи диференціювання цього рівняння, отримаємо наступне [12]:

$$J_{\Sigma} \cdot (d\omega/dt) = (T_E - T_L) - \omega \cdot (dJ_{\Sigma}/dt)$$

Якщо сумарний момент інерції електромеханічної системи усталений, то це рівняння перетворюється на відоме рівняння руху, отримане на підставі другого закону Ньютона.

Нестационарність моменту інерції призводить до появи динамічної складової моменту опору, що може істотно впливати на процес пуску електроприводу і обумовлює складнішу структуру рівняння руху для механізмів з несталим приведеним моментом інерції. Оскільки електропривод працює у складі виробничого технологічного оточення [14] існує суттєвий взаємовплив між пусковим процесом електроприводу і технологічним оточенням, який обумовлює невідтворюваність пускових процесів електроприводу, поміщеного в різні технологічні оточення. Миттєве значення обертального моменту електричної машини T_E загалом залежить від значень струмів в окремих обмотках електричної машини і кутового положення ротора. Тому на створюваний електромагнітний момент істотно впливають

два чинники – неідеальність мережі живлення і неідеальність власне електричної машини. Ці чинники призводять до нерівномірного струмового та теплового навантаження окремих фаз статора, до появи пульсуючих складових електромагнітного моменту. Момент опору робочої машини T_L також досить часто є істотно нелінійною функцією як координат електроприводу (кутової швидкості і положення), так і часу. У пускових режимах момент опору робочої машини може істотно зростати через вплив пружних зв'язків у механічній частині електроприводу. Особливим завданням є пуск багатодвигунних електроприводів [15].

Найважливіші характерні напрямки взаємовпливу електроприводу і його технологічного оточення, які пов'язані з пусковими процесами, розглянуто докладніше у наступних розділах.

З урахуванням виконаного теоретичного аналізу рівняння руху механічної частини електроприводу на підставі закону збереження імпульсу для обертального руху визначено чинники, що впливають на електромеханічні показники процесу пуску потужних електроприводів.

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.

Основною причиною відмов АД і СД є пошкодження обмотки статора унаслідок пробоя ізоляції обмотки [13, 14]. 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 [14, 15].

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.

Вплив різноманітних чинників на формування процесу пуску електроприводу можна зобразити у вигляді наступної схеми показано на рисунку 2.6.

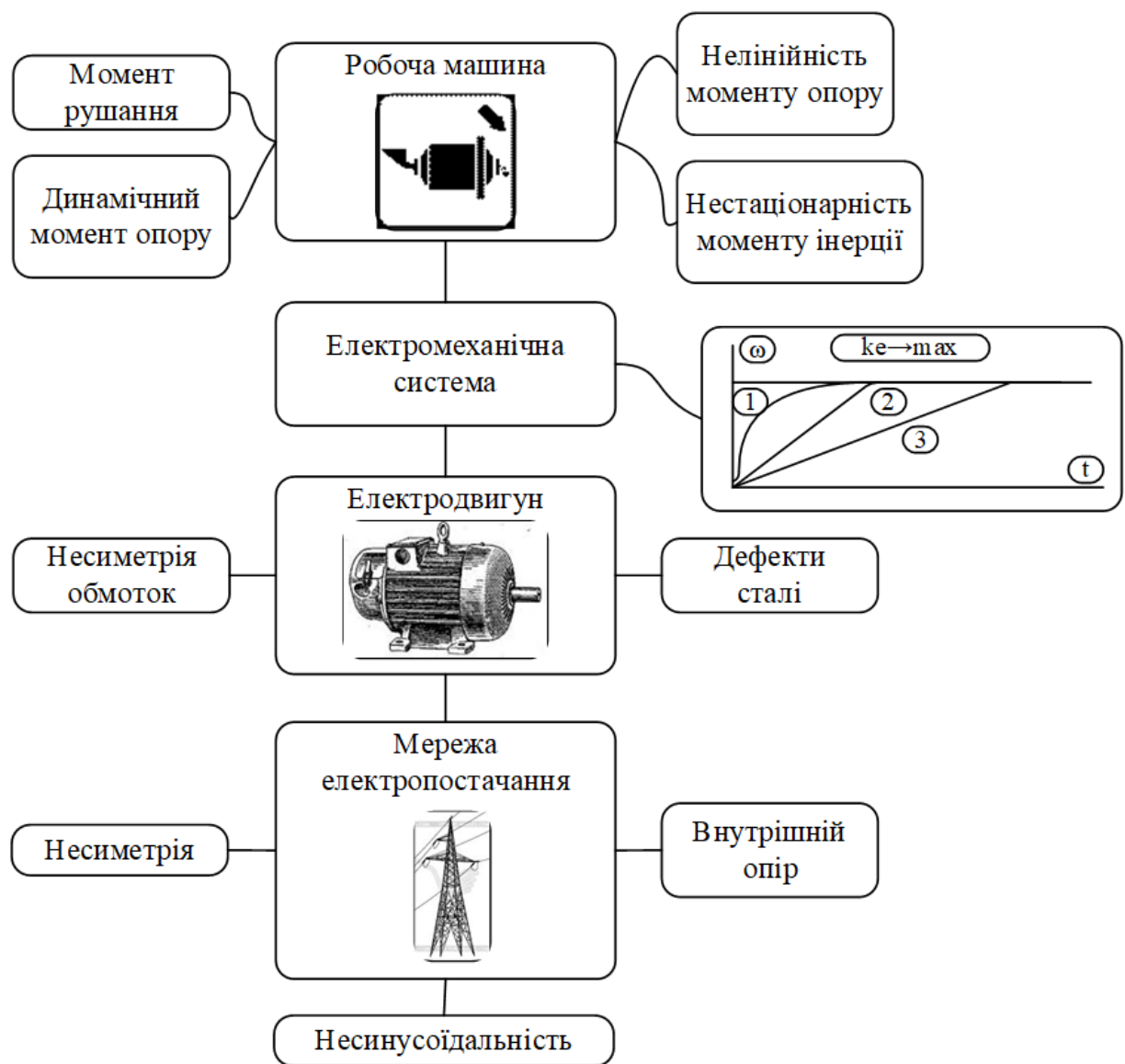


Рисунок 2.6 – Схема впливу різних чинників на режим пуску електромеханічної системи

Інтенсифікація теплового старіння зумовлена значною тепловою енергією, що виділяється під час пуску та максимальним погіршенням умов охолодження, навіть за наявності примусової вентиляції [16]. У результаті додаткового нагрівання обмоток під час пуску відбувається розм'якшення, плавлення, зміна міцності до розтягнення, розтріскування ізоляції, що призводить до зміни її фізичних і електричних властивостей та інтенсивнішого старіння [17].

Під час пуску двигуна в початковий момент в електроприводі виникають вібраційні складові електромагнітного моменту [18, 19] унаслідок:

- збільшення навантаження, при якому часова характеристика моменту опору має експоненціальний фронт з малою постійною часу;
- ударних знакозмінних моментів, що мають синусоїдальну форму з частотою, яка на самому початку процесу пуску може бути прийнята рівною частоті мережі;
- імпульсного електромагнітного моменту.

У електроприводі можливе виникнення додаткових динамічних коливань у механічній частині електроприводу. Це пояснюється тим, що під час пуску електродвигуни змінного струму працюють на нестійкій частині механічної характеристики, вносячи таким чином від'ємне демпфування пружних коливань у багатомасових механічних частинах [20]. Максимум коливального моменту при цьому може досягти значення $(2 \div 2,5) M_{ном}$.

У пускових режимах до ротора прикладаються різні складові періодичних зусиль, такі як:

- складові, прямо пропорційні нерівномірності зазору і зміщення центру ваги ротора:

$$F_1(t) = F_{дб} \cdot \sin(\omega t) + F_e \cdot \sin(\omega t - \varphi_1)$$

де F_1 – амплітуда розглянутої складової;

$F_{\delta\delta}$ – амплітуда, що визначається значенням дисбалансу;

F_e – амплітуда, яка визначається значенням ексцентриситету;

φ_1 – кут зсуву по фазі;

– складова з частотою, амплітуда якої визначається ступенем несиметрії процесів під час пуску асинхронного двигуна;

– складова з частотою мережі, амплітуда якої пропорційна величині одноосної сили магнітного тяжіння;

– зубцеві складові, спричинені прямим і зворотним обертовими полями [16].

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 [10].

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 [21].

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 [22].

Несинусоїдальність напруг джерела живлення також істотно впливає на режими роботи електродвигунів [23]. Струми деяких вищих гармонік

створюють магнітні поля зворотної послідовності та зменшують сумарний рушійний момент електродвигуна [14, 24]. За наявності в кривій напруги вищих гармонік процес старіння ізоляції також відбувається інтенсивніше, ніж у разі роботи електроустаткування із синусоїдальною напругою [14, 24].

Неідеальність двигуна проявляється у вигляді параметричної несиметрії обмоток статора та ротора, у несиметрії магнітної системи, також призводить до появи струмів зворотних послідовностей, погіршує пускові властивості електродвигунів. Причиною несиметрії магнітної системи є міжвиткові замикання, розпушування, локальне закорочування листів сталі та інше. У цих місцях спостерігається посилення вихрових струмів, втрат на гістерезис, що призводить до нерівномірності розподілу магнітного потоку в повітряному зазорі [25]. Питанням діагностики технічного стану електродвигунів, прогнозування їх залишкового технічного ресурсу присвячені наукові роботи з моніторингу параметрів електричних двигунів електроприводів.

Оскільки момент опору значної частини робочих машин, створений силами тертя, має нелінійний характер типу кулонівського тертя, то пуск електроприводу помітно розділяється на два послідовних етапи: етап рушання, коли кутова швидкість приводного двигуна залишається нульовою, та етап безпосередньо розгону до усталеної швидкості [22].

Особливий характер протікання процесу пуску притаманний також широкому класу електроприводів із пружними зв'язками в механічній частині - стрічкових конвеєрів; механізмів переміщення балок мостових кранів [22]; кранові механізми переміщення вантажів [23]; турбомеханізми з урахуванням розподілених властивостей комунікаційних мереж [24, 25]; бурових верстатів з великою глибиною буріння [26]; підйомні установки шахт зі значною глибиною видобутку корисних копалин [27].

Особливістю роботи електроприводів зі змінним моментом інерції (намотувальне обладнання [28], механізми вібротранспорту [29, 30], екскаватор у режимі копання [31]) є поява додаткової складової динамічного

моменту опору, який суттєво впливає на динаміку процесу пуску таких електроприводів.

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. Проблема визначення експлуатаційного зношування обладнання за період пуску електроприводу, на сьогодні не розв'язана.

2.5 Питання щодо підвищеного енергоспоживання електроприводу

Процес пуску електроприводу є одним з найбільш енергетично напружених режимів роботи, що пов'язано з необхідністю створення кінетичної енергії рухомих частин електроприводу. Робота в пусковому режимі, наближеному до режиму короткого замикання, супроводжується 5–7 кратними пусковими струмами, значними втратами в обмотках електричної машини, і, відповідно, значним енергоспоживанням електричної машини. За допомогою математичного моделювання було проаналізовано споживання повної, активної та реактивної енергії під час прямого асинхронного пуску СД потужністю 3,5 МВт (рис. 2.7) [28].

Аналіз моделювання енергоспоживання показує, що споживання різних складових енергії за період пуску СД, (рис. 2.7), може у 15 – 25 разів перевищувати відповідні показники того ж самого СД під час роботи в усталеному режимі. Через відносно невелику тривалість пускового режиму щодо часу роботи з усталеною швидкістю, цей факт часто ігнорують. Слід зазначити, що зі зменшенням обсягів промислового виробництва має місце відносне збільшення кількості необхідних пускових процесів для зменшення витрат виробництва. Особливо чітко ця тенденція помітна на промислових підприємствах, які перебувають на консервації.

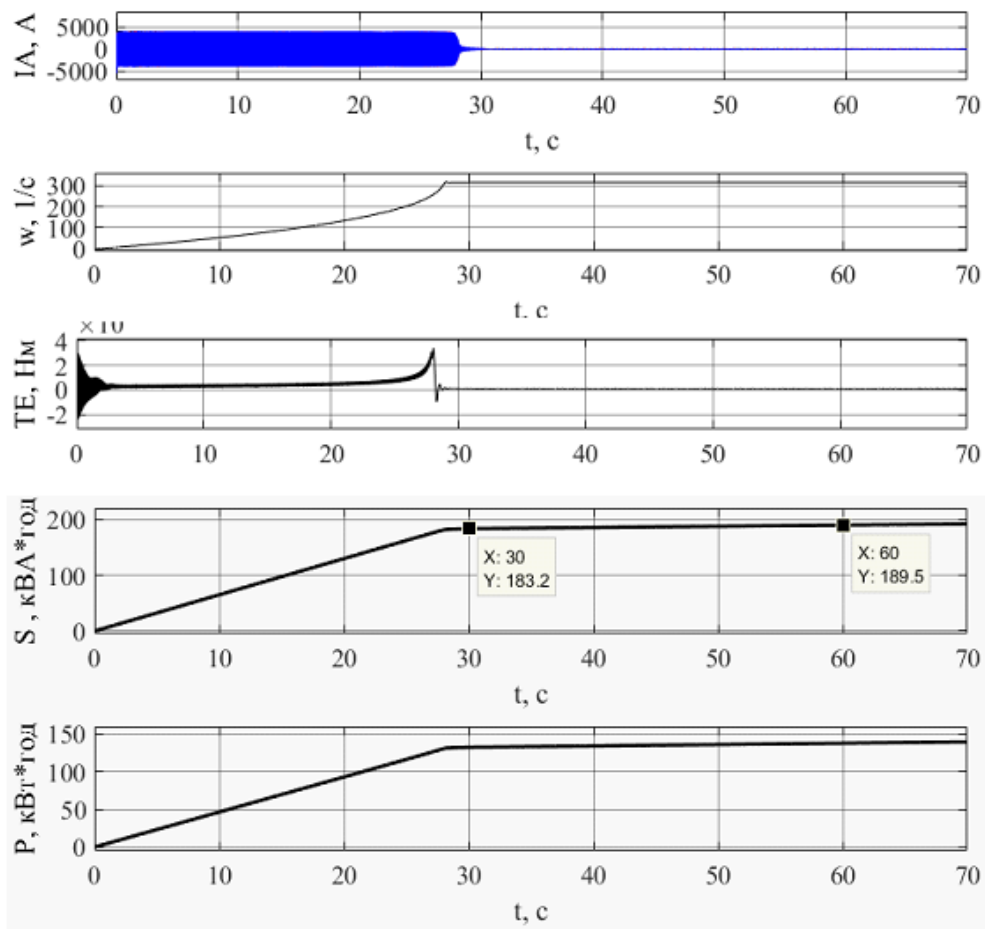


Рисунок 2.7 – Експериментальне дослідження енергоспоживання синхронного двигуна під час його асинхронного пуску та під час роботи із синхронною швидкістю

Стосовно процесів пуску потужних електроприводів недоцільно порушувати проблему мінімізації споживання лише електричної енергії. Для процесів пуску потужних електроприводів необхідно ставити більш широке, комбіноване завдання раціонального використання всіх видів ресурсів, постановка якого враховувала б не тільки витрати електроенергії, але й інші види витрат, насамперед – зношування обладнання у процесі пуску, а також створений процесом пуску корисний результат.

Під час аналізу пускових процесів групових електроприводів постає завдання врахування додаткових економічних ризиків підприємства,

пов'язаних з локальним погіршенням якості електроенергії під час пуску електроприводів.

Зменшення напруги живлення зумовлене пусковими струмами, призводить до зменшення продуктивності або навіть аварійної зупинки технологічних механізмів, електроприводи яких підключено до того самого трансформатора живлення, що й потужний електропривод, який запускається. У практиці експлуатації досить поширено, коли потужні СД не вимикають у разі зупинки технологічного процесу.

Значні пускові струми під час прямого пуску електроприводів можуть призводити до пускових провалів напруги у вузлі електропостачання [9]. Така ситуація є типовою під час пуску електроприводів великої потужності, особливо за зіставної потужності силового трансформатора або наявності лінії живлення великої довжини. Пускові провали напруги призводять до появи низки додаткових економічних ризиків.

Ці ризики пов'язані з наступними основними чинниками:

- унаслідок зменшення напруги на період пуску знижується продуктивність технологічних механізмів, електроприводи яких підключені до загального вузла електропостачання, а в деяких випадках може відбуватися і відключення цих електроприводів з повною зупинкою прилеглих технологічних механізмів, що потребують їх подальшого перезапуску. Отже, формуються ризики, пов'язані з недовипуском готової продукції через зменшення продуктивності або простою обладнання;

- унаслідок невдалого пуску виникає ризик недовипуску готової продукції, пов'язаний з вимушеним простоєм технологічного обладнання на період часу, необхідний для підготовки і проведення повторного пуску. Для потужних СД цей період часу регламентується правилами експлуатації і може досягати для великих машин до двох годин;

- додаткові економічні ризики, пов'язані з витратами на можливий повторний пуск окремих вузлів технологічного кола.

Особливу увагу слід зосередити на імовірнісному характері цих додаткових ризиків. Імовірність їх виникнення і розмір економічного ризику залежать від значної кількості зовнішніх чинників, що знаходяться поза зоною впливу і контролю електроприводу, який пускається [4]. Однак абсолютний розмір потенційних збитків від порушення роботи технологічного кола може бути колосальним, значно перебиваючи витрати на підтримку роботи електроприводу в режимі холостого ходу.

Додаткові економічні ризики підприємства, які виникають унаслідок локального зменшення якості напруги живлення, зумовлені зменшенням продуктивності технологічного обладнання та перериванням технологічних процесів, є одним з найважливіших чинників впливу пускових процесів потужних електроприводів. На сьогодні не існує методів визначення значення додаткових ризиків від пускових процесів, оскільки такий аналіз потребує складної статистичної інформації про роботу цілісного технологічного оточення.

3 ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

3.1 Заміна електричних машин

Один зі способів підвищити енергоефективність – поступово замінити старий парк асинхронних двигунів із низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) на двигуни нових стандартів з високим ККД. Звернемося до європейських норм і стандартів, які вже починають діяти для Європи. Для України вони є теж дуже важливими, оскільки частка спожитої електроенергії на підприємствах (приблизно 60%) припадає на електропривод, загальний ККД якого становить не більше 70%. До вересня 2008 р. у Європі діяли норми СЕМЕР, де точно відповідно до ККД були названі стандартні двигуни EFF2 (EFF2 значно перевищує стандарт ГОСТ), двигуни із завищеним ККД -EFF1. Із вересня 2008 року прийнятий новий стандарт ІЕС60034-30, в якому вказано 4 класи енергоефективності: стандартний (Ie1), високий (Ie2), завищений PREMIUM (Ie3), найвищий Super Premium (Ie4). Таким чином, норми підвищились, і зараз EFF1 займає згідно з новим стандартом тільки Ie2. Навіть при потужностях до 1 кВт різниця в ККД у різних класах становить до 10 %. При різниці в ціні на двигуни з різним ККД до 15% окупність проекту з заміни асинхронних двигунів із низьким ККД на двигуни з високим проходить менше, ніж за 1 рік, а далі. Розглянемо, з яких технічних моментів у «звичайному» асинхронному двигуні складаються відсотки додаткового ККД на прикладі високоефективного двигуна фірми WEG - W22. На даний час корпорація WEG є найбільшим виробником низьковольтних і високовольтних двигунів у світі, кількість двигунів, вироблених за добу, сягає 76 000. Поряд з іншими відомими виробниками WEG входить до європейської електротехнічної комісії, яка встановлює стандарти в електротехніці, тобто задає «моду» у світі електротехніки. Високоефективні електродвигуни нової серії W22 із класом енергоефективності EFF1 і зі ще нижчими витратами на

обслуговування були розроблені WEG у серії трифазних електродвигунів. Отримали патенти на різні інноваційні удосконалення, забезпечили низький рівень шуму та вібрації, покращену надійність і більший час роботи, полегшене обслуговування. Зменшення втрат у двигуні за рахунок виробничих вдосконалень прирівнюють ряд W22 до класу енергоефективності EFF1 і навіть вище. Завдяки цьому досягненню двигуни ряду W22 відповідають найсучаснішим вимогам енергоефективності. Для покращення енергетичних показників електродвигунів WEG провів удосконалення ключових частин корпусу. Вдосконалення енергоефективності й надійності є також результатом вдосконалення системи охолодження. Значних змін зазнала форма кожуха і вентилятора охолодження. Нова покращена запатентована форма покращує аеродинаміку й забезпечує більший потік повітря по корпусу двигуна, підтримуючи температуру в межах оптимального значення і покращуючи надійність і довговічність.

Робота з перетворювачем частоти: ряд електродвигунів W22 насамперед проектувався для роботи з інверторами для забезпечення енергоефективності й вирішення різних технологічних завдань. Ці двигуни забезпечують надійну роботу при живленні ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) напругою і підвищеною напругою на обмотках. Рівень шуму системи охолодження був значно зменшений (3 -8 dB). У результаті рівень шуму в діапазоні від 72 до 80 dB, а це значно нижче, ніж рекомендує ІЕС (Міжнародна електротехнічна комісія) і дорівнює чи навіть нижчий, ніж у конкурентів. Також був збільшений термін експлуатації двигуна, відповідно це сприяє безвідходності та захисту навколишнього середовища. Корпуси промислових електродвигунів W22 виготовлені з високоякісного чавуну для забезпечення максимального терміну служби в складних умовах експлуатації. Вдосконалена система вентиляції також гарантує кращий захист при постійному навантаженні. Крім цього, форма підшипникового щита була перепроєктована для кращого відведення тепла від підшипників і збільшення міцності. Лапи є монолітними з корпусом і забезпечують ще більшу міцність і демпферну

властивість в умовах підвищеної вібрації установки. Стандартний ступінь захисту — IP55. Легко замінюється на IP65 із комплектом ущільнень (сальників) від WEG. Вдосконалений пило- і вологозахист забезпечує мийку працюючого двигуна водою під тиском.

3.2 Удосконалення системи пуску

Перший етап розвитку теорії електромеханічного перетворення енергії був пов'язаний з рівняннями усталених режимів, що призводило до значних похибок аналізу динамічних пускових процесів. Основні досягнення у вивченні пускових режимів електричних машин були досягнуті разом зі створенням математичних моделей електромеханічного перетворення енергії в динамічних режимах [27]. Розвиток теоретичних досліджень процесів пуску потужних електроприводів нерозривно пов'язаний зі створенням математичних моделей електричних машин змінного струму, їх подальшим уточненням, розвитком моделей напівпровідникових перетворювальних пристроїв, розвитком обчислювальної техніки та методів розв'язання рівнянь електроприводів на ЕОМ.

До процесів пуску електродвигунів висувують суперечливі вимоги: з одного боку, забезпечення необхідної величини пускового моменту, а з іншого – зменшення пускового струму до допустимої величини. Для обмеження пускового струму використовують різноманітні схеми з додатковими елементами у статорному колі електродвигуна.

Зменшення напруги в момент пуску може здійснюватися за допомогою реакторного (рис. 3.1, а) або автотрансформаторного (рис. 3.1, б) пуску. Надані схеми обмеження струмів у процесі пуску досить громіздкі та дорогі, і на сьогодні майже не використовуються. Майже безступінчасте регулювання швидкості в процесі розгону досягається з використанням плавнорегульованих індуктивних опорів – підмагнічувальних реакторів і магнітних підсилювачів [31]. Таке рішення дозволяє отримати значне

обмеження ударних і знакозмінних складових моменту, підвищує надійність та довговічність механізмів і машин. Однак через порівняно велике значення опору дроселів у насиченому стані пусковий момент двигуна менший, ніж на природній характеристиці.

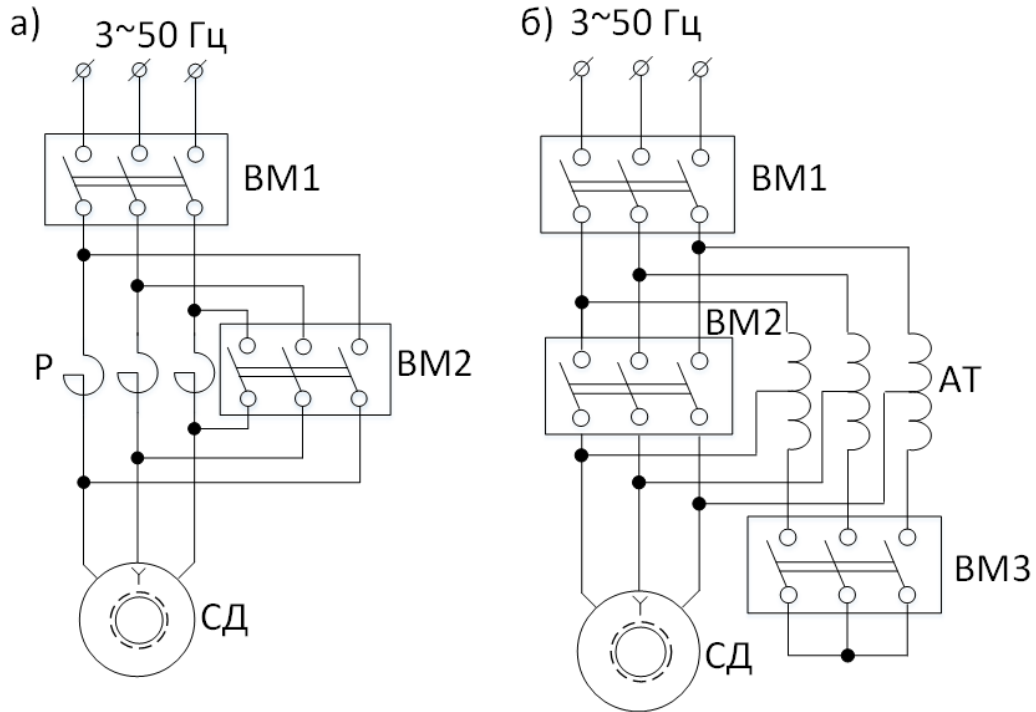


Рисунок 3.1 – Схеми пуску синхронних двигунів з пониженням напруги мережі: а – реакторний; б – автотрансформаторний

У літературних джерелах існує варіант включення конденсаторів у коло статора та розглянуто вплив на пускові процеси АД [27, 288]. Таку схему запропоновано використовувати для приводів з важким пуском. Включення конденсаторів забезпечує збільшення коефіцієнта потужності, зменшення струму під час пуску, підвищення пускового моменту, формування необхідних пускових характеристик двигуна.

На сьогодні застосовують методи керування процесом асинхронного пуску СД шляхом включенням активних опорів і реактивних елементів у контур збудження, запропоновані у [29]. Підключення до кола збудження ємності забезпечує збільшення електромагнітного моменту, створеного

обмоткою збудження двигуна, в області підсинхронної швидкості. Основне обмеження на широке застосування цього способу накладає величина ємності (до 1Φ), а також значне зменшення ефекту на разі шунтування ємності збудником. У деяких роботах розглянуто питання оптимізації пускових режимів електроприводів з ємнісними накопичувачами енергії, питання застосування керованих ємнісних накопичувачів енергії в контурі збудження синхронних двигунів [31, 32, 33].

Також є роботи, в яких обґрунтовувано доцільність використання розгінного пуску для приводного СД групи Г–Д [19, 21]. За такого способу пуску розгінний двигун розташовується на одному валу з головним двигуном. Як розгінний найчастіше використовують асинхронний двигун з фазним ротором. При цьому головний двигун розганяється до підсинхронної частоти обертання, з подальшим підключенням до мережі методом самосинхронізації, або до надсинхронної – з включенням у мережу на вибігу методом точної синхронізації. Під час пуску електроприводу Г–Д доцільно використання як розгінного двигуна генератора постійного струму у двигунному режимі.

Розв'язання завдання обмеження пускових струмів з одночасним підтриманням пускового моменту електродвигуна на необхідному рівні можливе лише за умови використання частотного пуску.

Одним з поширених способів пуску потужних синхронних двигунів є частотний пуск за допомогою електромашинного перетворювача частоти. Електромашинний перетворювач частоти, зазвичай, складається з приводного асинхронного двигуна з фазним ротором, керованого рідинним реостатом, і синхронного генератора (рис. 3.2). Частота обертання генератора змінюється за допомогою реостата в колі ротора асинхронного двигуна [24]. Приваблює своєю оригінальністю пусковий пристрій для синхронних двигунів (СД) за методом Унгера–Кларка, що містить дві асинхронні машини з фазним ротором, одна з яких працює в режимі асинхронного генератора (АГ), інша – в режимі двигуна (рис. 3.3).

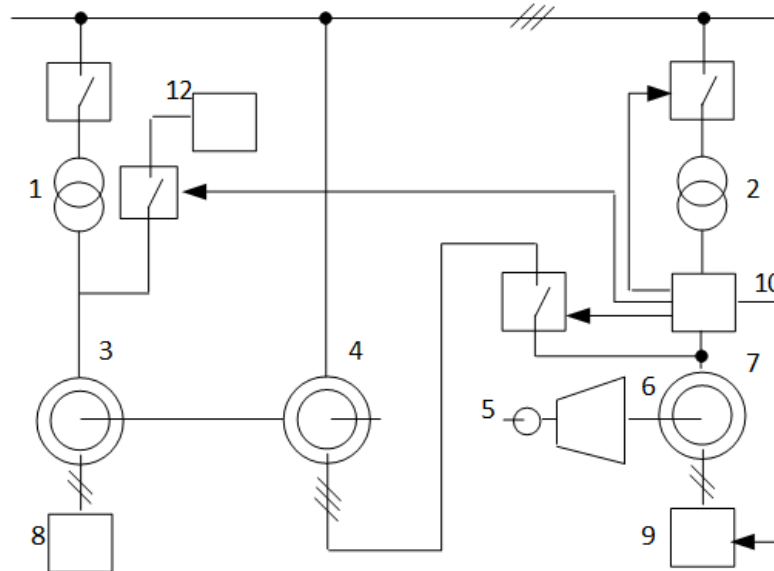


Рисунок 3.2 – Функціональна схема пуску синхронного двигуна за допомогою електромашинного перетворювача:

- 1, 2 – трансформатор; 3 – асинхронний двигун; 4 – синхронний генератор;
 5 – валоповоротний пристрій; 6 – компресор; 7 – головний синхронний двигун;
 8 – пусковий реостат; 9 – збудник головного двигуна;
 10 – синхронізувальний пристрій

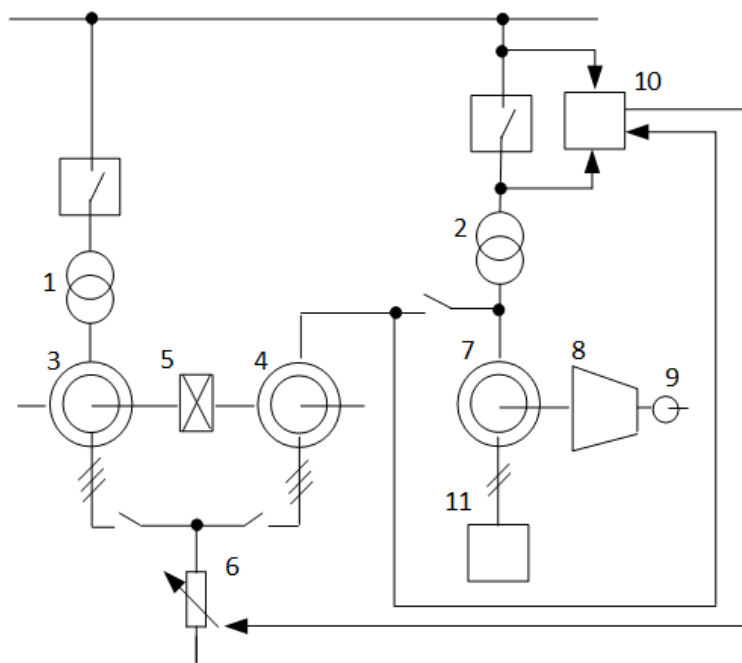


Рисунок 3.3 – Функціональна схема пуску синхронного двигуна за методом Унгера–Кларка:

- 1, 2 – трансформатор; 3 – асинхронний двигун; 4 – асинхронний генератор; 5 – редуктор;
 6 – пусковий реостат; 7 – головний синхронний двигун; 8 – компресор;
 9 – валоповоротний пристрій; 10 – синхронізувальний пристрій;
 11 – пристрій збудження синхронного двигуна

Після розгону СД без ударів включається на шини мережі живлення. На сьогодні метод Унгера-Кларка досить докладно вивчений і досліджений зарубіжними авторами [25].

Найбільш суттєвий прогрес у розвитку систем формування пускових процесів електроприводів нерозривно пов'язаний з розробкою силових напівпровідникових елементів і перетворювальних пристроїв на їх базі, що суттєво розширило сферу використання пристроїв керування пуском електроприводів.

Для систем електроприводів розроблені комплексні та багатофункціональні системи пуску потужних високовольтних електродвигунів. Завдання пускової системи можуть розв'язуватися і власне системою регульованого електроприводу, коли можливість плавного пуску потужного АД або СД закладена в його схемному рішенні. Для інших систем електроприводу пускова система може бути виконана у вигляді окремого елемента, що працює тільки під час пуску.

Найбільш поширеним схемним рішенням для пристроїв плавного пуску потужних електроприводів змінного струму є використання тиристорних регуляторів напруги для плавного збільшення діючого значення напруги живлення двигуна в процесі пуску. Сучасні пускові пристрої відомих фірм Schneider Electric, ABB, Siemens та ін. [34], забезпечують формування пускових характеристик і плавний пуск електроприводу за умови $MTP \leq 0.8$ МН. Якщо момент рушання перевищує вказане значення, пусковий пристрій автоматично переходить у режим «повновольтажного байпасного старту».

Розвитком частотного способу пуску для СД є спосіб імпульсного керування, за якого в статор збудженої машини подаються поодинокі імпульси струму, синхронізовані з положенням ротора [35, 36]. Для цього використовується тиристорний перетворювач з безпосереднім зв'язком. Оскільки пуск СД здійснюється зміною величини напруги живлення статора, отримання задовільних пускових характеристик, необхідних для пуску СД з номінальним навантаженням, неможливо.

Пусковий пристрій серії РУПП, (Україна) призначений для плавного пуску від мережі 6 (10) кВ одного або декількох (почергово) синхронних або асинхронних електродвигунів приводів турбомеханізмів потужністю до 8000 кВт (з струмом 1,5 - 2,5 Ін) і механізмів, що пускаються вхолосту, у тому числі «підхоплення» двигунів з ненульовою частотою обертання.

В основу роботи РУПП покладено принцип параметричного обмеження пускового струму електродвигуна і його стабілізації на заданому рівні на більшій частині перехідного процесу. Синусоїдальна форма напруги, що подається до електродвигуна, зберігається протягом усього пуску.

Виготовляється на потужність до 12,5 МВт з напругою живлення 6 – 10 кВ.

Переваги пуску через РУПП в порівнянні з прямим пуском:

- зменшення електродинамічних зусиль і, як наслідок, підвищення надійності й продовження терміну служби електродвигуна;
- зменшення просадок напруги в мережі живлення і, як наслідок, поліпшення режиму роботи інших споживачів;
- продовження терміну служби механічної та технологічної частин обладнання;
- продовження терміну служби високовольтного захисно-комутаційного, трансформаторного обладнання та електричних мереж;
- можливість пуску електродвигунів в системах зі слабкими мережами або такими, що одержують живлення від автономних джерел.

Принципова схема використання пристрою РУПП для почергового пуску високовольтних електродвигунів зображено на рисунку 3.4. Пристрої плавного пуску ПАД-В-Г, ПСД-В-Г призначені для індивідуального та групового почергового плавного пуску високовольтних асинхронних і синхронних двигунів з номінальною напругою 3, 6, 10 кВ [35]. Галузі застосування: насоси, вентилятори, компресори, повітрорудки та інші механізми відцентрового принципу дії.

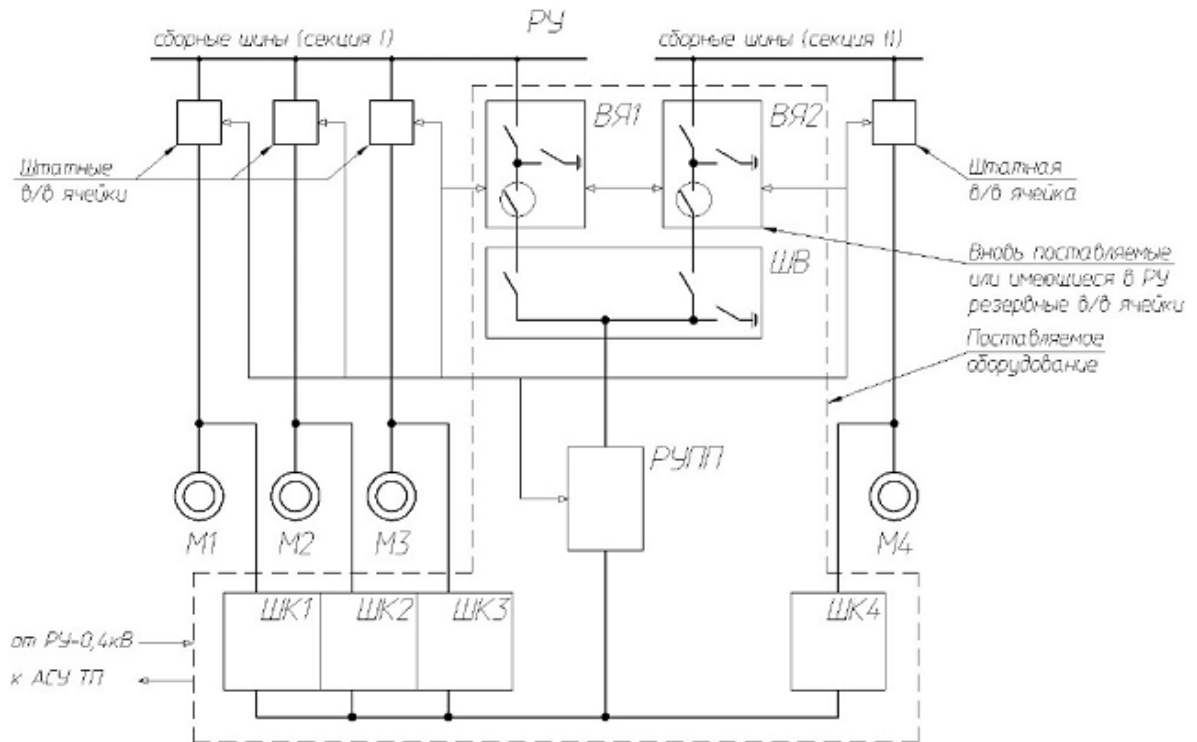


Рисунок 3.4 – Принципова схема силової частини пускового пристрою серії РУПП (Україна)

Спосіб регулювання заснований на фазовому керуванні вихідної напруги перетворювача.

Обмеження на заданому рівні динамічного електромагнітного моменту двигуна під час пуску механізму зменшує пусковий струм двигуна на рівні (1–4) I_n , що дозволяє значно зменшити:

- динамічні перевантаження в кінематичних колах механізму;
- гідравлічні (пневматичні) удари в насосі, компресорі, магістралі;
- електромагнітні зусилля у статорних обмотках двигуна;
- просадки напруги в мережі.

Пристрій плавного пуску «Soft-Starter WEG 7000» - це вискоелефективний продукт, який дозволяє запускати та зупиняти, здійснювати керування і захист трифазних асинхронних двигунів середньої напруги [158], запобігає механічним ударам навантаження, знижує пікові значення струму в лінії живлення і пошкодження двигуна. Контроль напруги

двигуна виконується з регулюванням кута керування тиристорів з антипаралельним з'єднанням.

Основні конструктивні особливості:

- комплексний байпас;
- автоматичні вимикачі не потрібні, тому що є лінійний контактор;
- захист двигуна, убудований у стандартний корпус;
- зручна конфігурація та експлуатація;
- волоконно-оптичне з'єднання;
- повна ізоляція між відсіками високої та низької напруг.

Використання пускового пристрою SSW7000 надає такі переваги перед прямим пуском електродвигунів:

- механічні переваги – зменшення механічних зусиль у приводі, мінімізує витрати на ремонт; збільшується термін служби двигуна; забезпечує плавне збільшення швидкості двигуна;

- електричні переваги – поліпшення якості електроенергії; зменшення впливу на трансформатори, лінії електропередачі та двигун; зменшення падіння напруги; збільшує термін служби двигуна; повна ізоляція між відсіками середньої та низької напруги;

- переваги технологічного процесу – продуктивність і час безвідмовної роботи можуть бути значно збільшені; зменшення витрат, пов'язаних з обслуговуванням, простоями та заміною деталей; збільшений термін служби обладнання; запобігає стрибкам тиску від насосів і трубопроводів; запобігає ривкам і прослизанням конвеєрних стрічок.

Принципова схема силової частини пускового пристрою SSW7000 зображено на рисунку 3.5.

Тиристорні пристрої частотного безударного пуску серії УБПВД-С забезпечують плавний частотний пуск високовольтних синхронних електродвигунів потужністю до 10 МВт та напругою живлення 6 кВ, що приводять в рух механізми зі статичним навантаженням на валу або з важкими

умовами пуску, [33], такими як кульові млини, конвеєри, вентилятори з великими інерційними масами та інше.

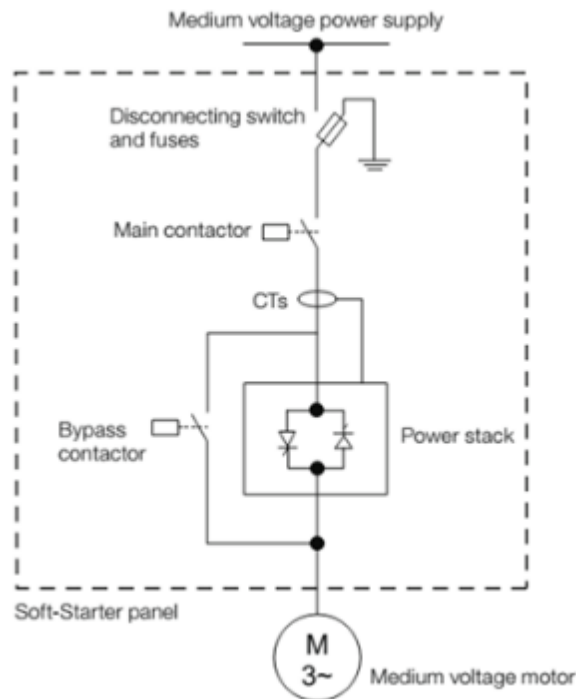


Рисунок 3.5 – Принципова схема силової частини пускового пристрою SSW7000, WEG

Пристрої забезпечують пуск одиночного двигуна, а також можливий пуск одним пристроєм кількох двигунів з почерговим підключенням його до двигунів, що пускаються.

Вони виконані за схемою з залежним тиристорним інвертором струму і забезпечують:

- пусковий момент двигуна до $1,3 M_{ном}$ ($M_{ном}$ – номінальний момент двигуна);
- частотне регулювання з плавним підвищенням швидкості, автоматичним підтриманням необхідного моменту на валу двигуна і струмом споживання не більше $1,5 I_{ном}$.

У пристроях серії УБПВД-С реалізовані функції логічного контролера і можливість програмного завдання налаштувань параметрів пристрою.

Користувач може здійснювати програмну корекцію регуляторів, вибирати криву пуску, обмеження струму, час розгону, формувати траєкторію гальмування.

Алгоритмічні рішення дискретного і параметричного керування насосними агрегатами в функції тиску в трубопроводі і відмінні риси розробленого пристрою УБПВД-С є оптимальними для застосування в системах плавного пуску і регулювання насосних агрегатів.

Система регулювання швидкості на базі пристрою УБПВД-С з залежним інвертором струму, у якому використовуються тиристори з фазовим керуванням, у 3–5 разів дешевша за перетворювачі частоти на базі IGBT або IGCT приладів, менш складна, а отже, надійніша і простіша в експлуатації.

Статичні перетворювачі частоти для м'якого пуску синхронних машин MEGADRIVE-LCI. Компанія ABB була піонером використання статичних перетворювачів для пуску синхронних двигунів. Технологія, що застосовується в приводі MEGADRIVE-LCI, забезпечує керування механізмами великої потужності, а також плавний пуск великих синхронних двигунів, зменшуючи негативний вплив на мережу і обладнання [26].

Силова частина виконана з діодним випрямлячем та інвертором з широтно-імпульсним модулюванням на повністю керованих тиристорах (GTO). Виготовляється потужністю до 72 МВт і вихідною напругою до 10 кВ.

Варіанти виконання силової частини стартера MEGADRIVE-LCI зображено на рисунку 3.6. На підставі аналізу науково-технічної літератури визначено основні теоретичні напрями та можливості керування процесом пуску, розглянуто основні схемотехнічні рішення пускових систем потужних електроприводів. Вивчення технічної документації сучасних пускових пристроїв показує, що вони перекривають діапазон потужностей до 72 МВт з напругою живлення 6 – 10 кВ. Найпоширенішим схемотехнічним рішенням пускових пристроїв є використання фазового регулювання напругою живлення за допомогою тиристорних регуляторів напруги, а для пуску електроприводів механізмів з важкими умовами пуску використовуються

пускові пристрої з перетворювачами частоти з векторними принципами керування.

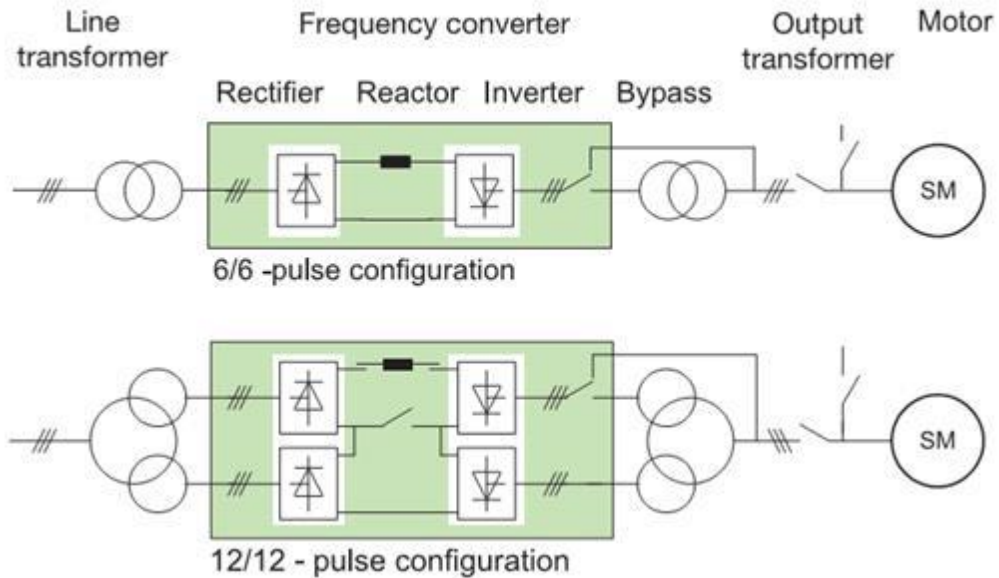


Рисунок 3.6 – Варіанти виконання силової частини пускового пристрою
MEGADRIVE-LCI, ABB

Установлено, що сучасні пристрої плавного пуску надають широкі можливості налаштування пускової діаграми, але у їх складі відсутні спеціалізовані модулі обладнання, які усувають невизначеність у питаннях вибору параметрів процесу пуску. Це суттєво знижує ефективність роботи пристроїв плавного пуску, не дозволяє використати потенціал пускових пристроїв повною мірою.

3.3 Пускові системи для потужних нерегульованих електроприводів

Обґрунтування доцільності застосування пускових пристроїв для нерегульованих потужних електроприводів – складне, нетривіальне завдання. Це обумовлено, насамперед, багаточинним впливом пускових процесів, відсутністю загальновизнаних 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.

Для прикладу розглянемо роботу компресорної станції умовного металургійного заводу, яке, 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. 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, 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 пов'язано, насамперед, з 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 [31], тому виробник компресора допускає максимум щотижневі пуски/зупинки компресора, а рекомендована виробником тривалість безперервної роботи турбокомпресорів складає не менше 25 діб [31].

Тож 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). 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 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). Зупинка технологічного обладнання, з одного боку, призводить до зменшення ресурсних витрат на час паузи, а, з іншого боку, призводить до необхідності виконання додаткового пуску, що створює додаткові ресурсні витрати, яких би не було за безперервної роботи обладнання.

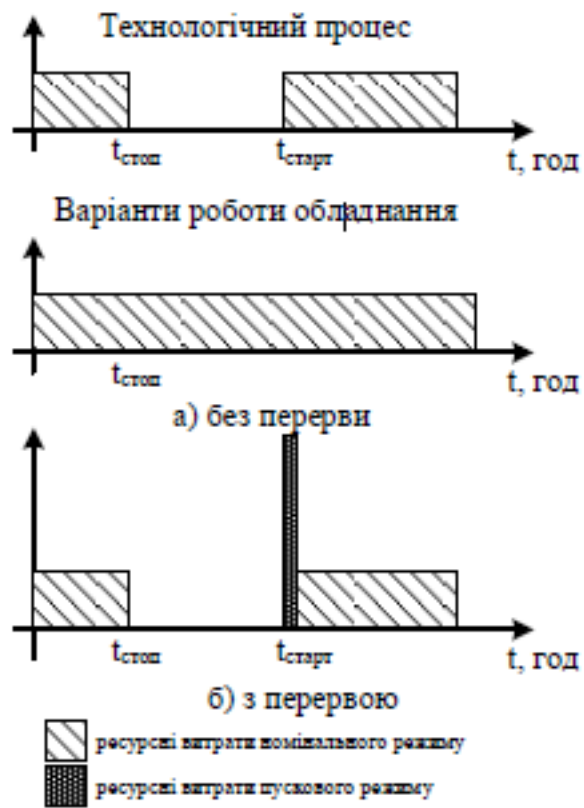


Рисунок 3.7 – Варіанти роботи електромеханічного обладнання у разі виникнення перерви технологічного процесу

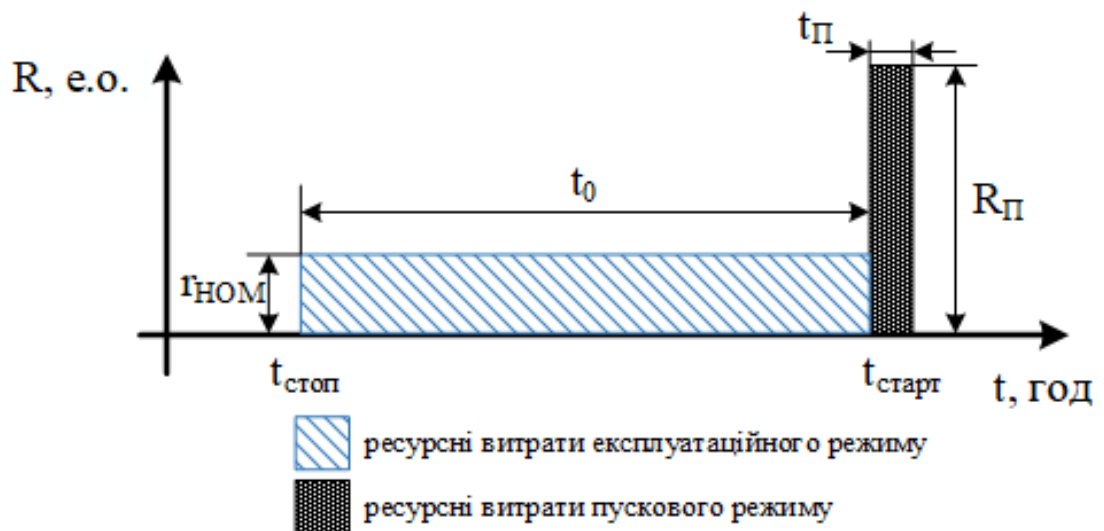


Рисунок 3.8 – До порівняння експлуатаційних витрат експлуатаційного та пускового режимів

Позначимо тривалість зупинки технологічного процесу символом t_0 , тривалість повторного пуску обладнання – символом t_{Π} , при цьому, тривалість прямого пуску позначимо символом $t_{\Pi 0}$. 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 :

$$R_E = r_{НОМ} \cdot t_0.$$

У разі зупинки устаткування цієї складової ресурсних витрат немає, але з'являється пускова складова ресурсних витрат R_{Π} . Якщо здійснюється прямий запуск електроприводу технологічного обладнання, то час запуску буде мінімальним і дорівнюватиме $t_{\Pi 0}$, а пускові ресурсні витрати – максимальними, і дорівнюватимуть $R_{\Pi 0}$. 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:

$$R_E > R_{\Pi},$$

де R_E – ресурсні витрати за час зупинки устаткування.

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

обладнано майже усі потужні механізми гірничо-металургійного комплексу України.

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 рисунку 3.9.

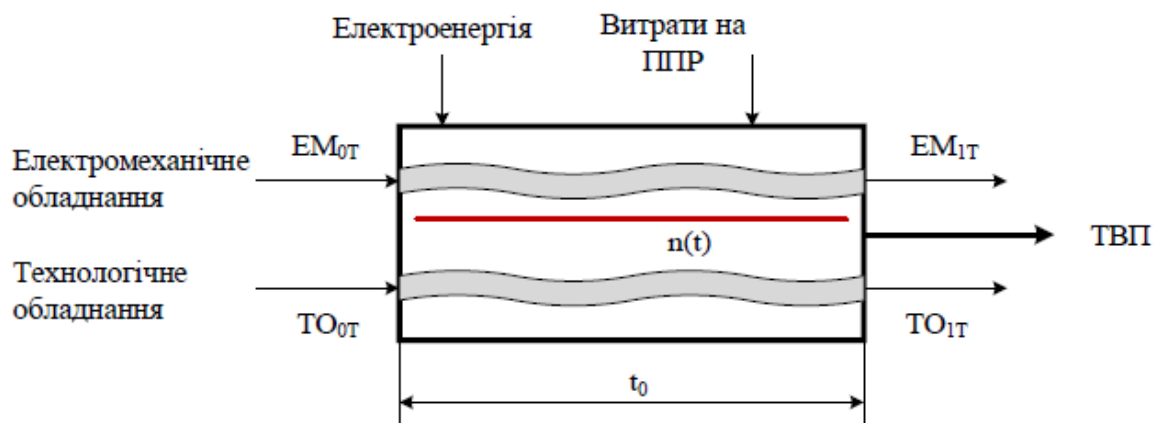


Рисунок 3.9 – Схема ресурсних витрат процесу пуску потужних електроприводів:

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 урахувувати як складову загальної вартості електромеханічного обладнання $EM_{0П}$, $EM_{1П}$.

Використання системи керованого пуску суттєво впливає на значення окремих складових ресурсних витрат. Як вже зазначалось, 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.

Таким чином, ресурсні витрати та СРПП процесу пуску потужних електроприводів можна зобразити такою схемою (рис. 3.10).

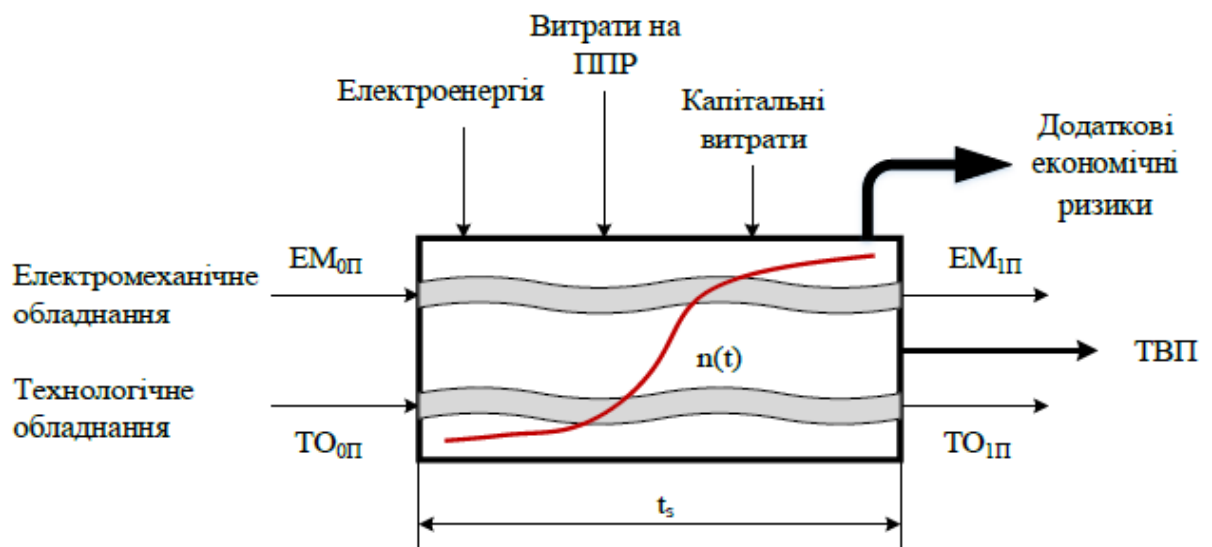


Рисунок 1.10 – Схема ресурсних витрат процесу пуску потужних електроприводів:

$EM_{0П}$, $EM_{1П}$ – вартість електромеханічного обладнання на початку та по завершенні пуску; $(EM_{0П} - EM_{1П})$ – зношування електромеханічного обладнання за період пуску; $TO_{0П}$, $TO_{1П}$ – вартість технологічного обладнання на початку та по завершенні пуску; $(TO_{0П} - TO_{1П})$ – 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.

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. Визначимо мінімально допустиму тривалість технологічної перерви, за якої доцільно зупинити нерегульований електропривод з подальшим прямим пуском:

$$t_0 > R_{\text{ПО}}/r_{\text{НОМ}}$$

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 $t_{\text{П}}$,

порівняно з тривалістю прямого пуску $t_{\Pi 0}$. Висловлена гіпотеза може бути описана виразом:

$$R_{\Pi} = R_{\Pi 0} / f(t_{\Pi} / t_{\Pi 0}),$$

де функція f має монотонно зростати зі збільшенням аргументу.

Наближений вираз для визначення ресурсних витрат керованого запуску:

$$R_{\Pi} = R_{\Pi 0} (t_{\Pi} / t_{\Pi 0})^{\alpha}$$

В результаті математичних перетворень 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):

$$t_{\Pi} > t_{\Pi 0} \cdot (R_{\Pi 0} / r_{\text{НОМ}} \cdot t_0)^{1/\alpha}.$$

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 $(5 \div 7) I_{\text{НОМ}}$, отримаємо наступне співвідношення: $6000 = (5 \dots 7)^{\alpha}$, звідки знайдемо орієнтовний діапазон значень для параметра α :

$$4,5 < \alpha < 5,4.$$

Виконаний розрахунок мінімально необхідної тривалості пуску компресорної установки залежно від обсягу ресурсних витрат на прямий пуск $R_{\Pi 0}$ і тривалості перерви в роботі обладнання t_0 . Отримана поверхня, розрахована для таких числових значень параметрів: $R_{\text{НОМ}} = 1$ е. о./год; $2 < t_0$

< 10 (годин); $t_{п0} = 30$ сек (1/120 години); $R_{п0} = 6000$ е.о.; $\alpha = 5$, зображена на рисунку 3.11.

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. Уточнення моделі прискореного зношування обладнання не впливає на структуру запропонованої методики, але дозволяє уточнити отримані числові значення мінімальної за умови безбитковості тривалості процесу пуску.

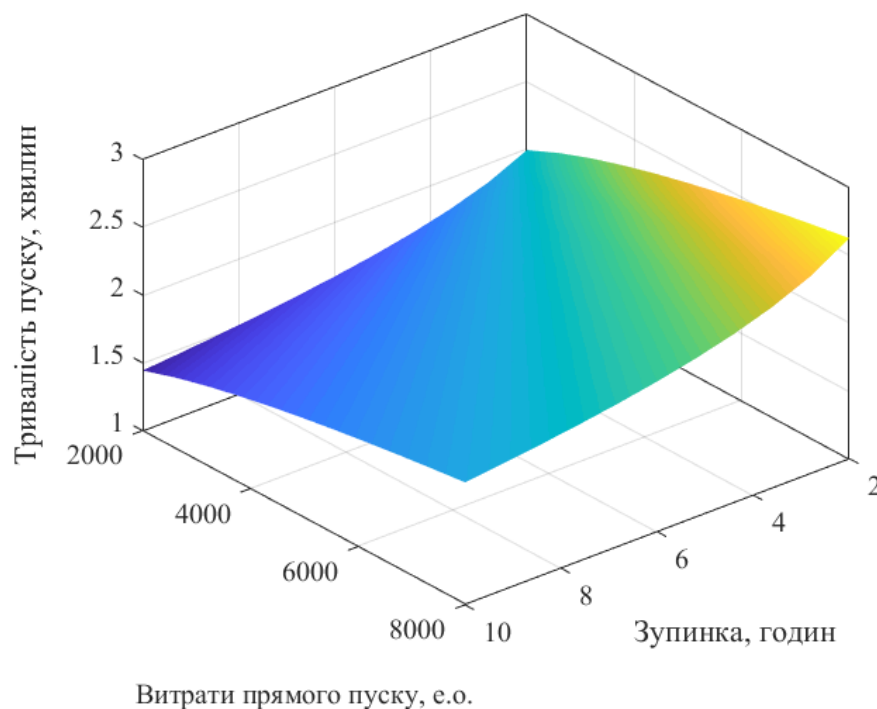


Рисунок 3.11 – Залежність мінімальної за умови безбитковості тривалості процесу пуску від величини ресурсних витрат на прямий пуск $R_{п0}$ і тривалості перерви в роботі обладнання t_0

3.4 Покращення енергоефективності електроприводів

Загальноприйнятим принципом керування процесом пуску з використанням напівпровідникових перетворювачів є плавне збільшення напруги на затискачах електродвигуна, щоб плавно зрушити і розігнати

електродвигун до його номінальних обертів. Складніші пристрої цього типу дозволяють, за необхідності, сформувати під час включення пристрою короткочасний (до 0,1 с) «поштовх» – імпульс номінальної напруги тривалістю t_T секунд, щоб забезпечити гарантоване рушання електродвигуна (рис. 3.12).

Основні параметри пускової діаграми – початкова напруга U_0 і час пуску t_s . Пристрої з такою силовою схемою використовують для пуску електроприводів з невеликим навантаженням, оскільки рушійний момент двигуна змінюється пропорційно квадрату прикладеної до статора напруги.

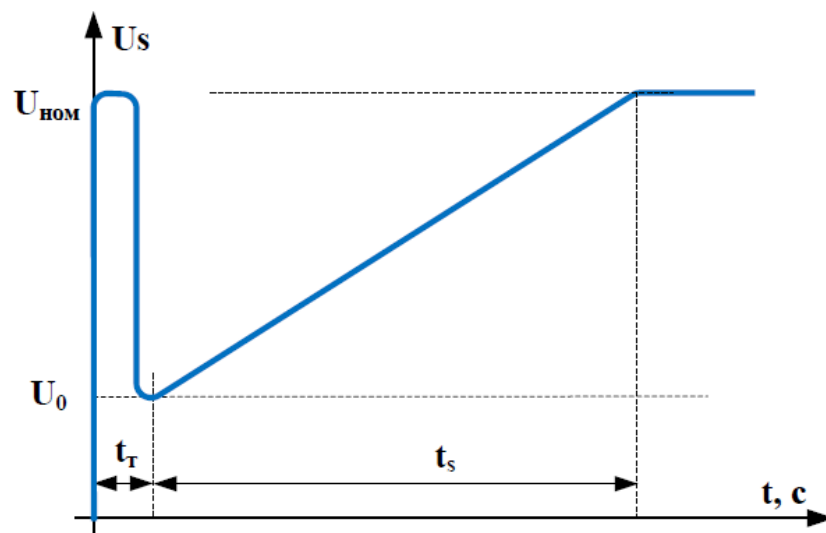
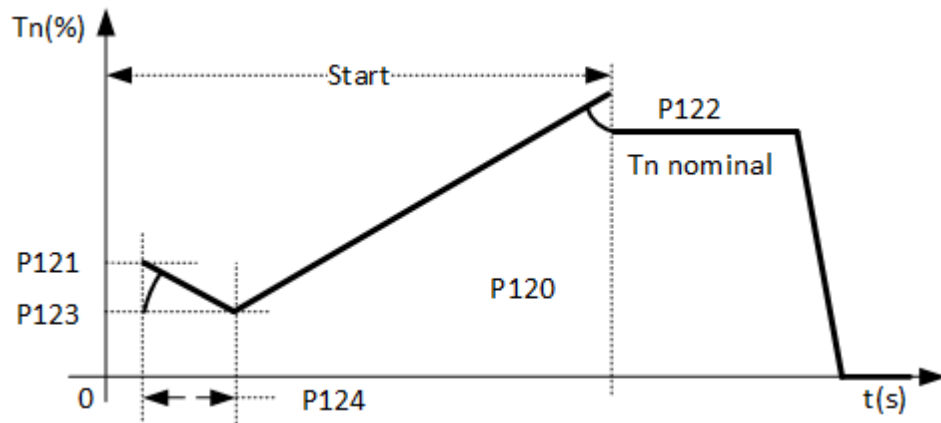
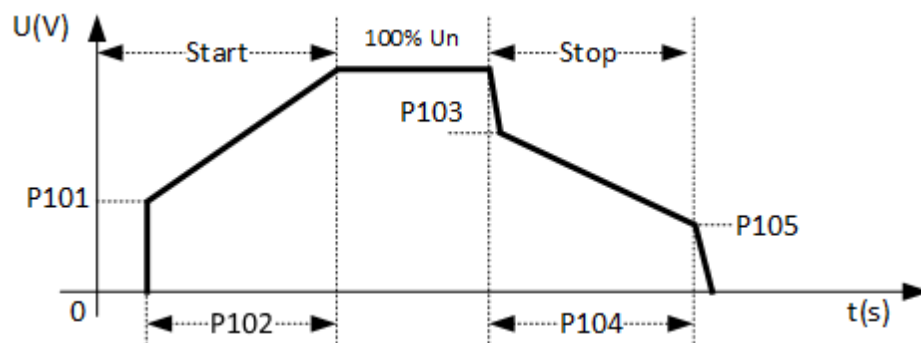


Рисунок 3.12 – Діаграма регулювання напруги тиристорного регулятора для плавного пуску електродвигуна

Для пуску електроприводів механізмів з важкими умовами пуску використовують пускові пристрої, які використовують силові схеми з перетворювачами частоти та системи скалярного або векторного керування рушійним моментом. Такі пристрої дозволяють створювати складніші діаграми керування пуском. На рисунку 3.13 наведено варіанти пускових діаграм, які можуть бути реалізовані у пусковому пристрої SSW7000, WEG [35].



а) Налаштування пускової діаграми крутного моменту для механізмів з квадратичним крутним моментом



б) налаштування пускової діаграми напруги статора для пуску та гальмування електродвигуна насоса

Рисунок 3.13 – Варіанти налаштування діаграм керування пуском за допомогою пристрою SSW7000, WEG

Складніший та функціональніший пусковий пристрій SSW7000 вимагає задання значно більшої кількості параметрів пускової діаграми. Аналіз технічної документації пристроїв плавного пуску різних виробників показує, що жоден з виробників не надає методики для обчислення параметрів пускової діаграми для конкретного застосування виробничого механізму. За вибір цих параметрів і економічні наслідки такого налаштування відповідає експлуатаційний персонал.

Особливості та числові показники протікання процесу пуску залежать від значної кількості параметрів: обсяги навантаження, характеристик мережі

живлення, моменту інерції та інших параметрів, які можуть змінюватися у процесі експлуатації виробничого обладнання, що вимагатиме періодичного переналаштування пускових діаграм. На сьогодні реалізовано розімкнене керування процесом пуску, а налаштування пускових пристроїв здійснюється для обмеження значень таких суто технічних показників, як пусковий струм або зниження напруги мережі живлення на допустимому рівні. Процес пуску потужних електроприводів створює складний вектор впливу на електромеханічну систему та її технологічне оточення. Це дозволяє визначити проблему підвищення ефективності роботи процесів пуску як комплексне завдання підвищення ефективності використання усіх видів ресурсів. До того ж, на сучасному етапі розвитку теорії керованого пуску, як визначено вище, не розв'язана проблема визначення кількісних оцінок характеристик зношування обладнання і додаткових ризиків підприємства та їх ціннісних характеристик. Отже, слід констатувати проблему відсутності необхідних математичних моделей процесу пуску, які б дозволяли визначати кількісні та ціннісні характеристики усіх видів ресурсів процесу пуску, що дозволило б перейти до безпосереднього аналізу його ефективності.

Потенціал подальшого розвитку систем керованого пуску та покращення їх характеристик, пов'язаний з удосконаленням конструкції їхньої силової частини на поточному етапі розвитку силової електроніки майже вичерпано. Подальше покращення експлуатаційних показників і характеристик систем керованого пуску можливе унаслідок створення методології кількісного оцінювання впливу пускових процесів, постановки та розв'язання завдання ефективного використання ресурсів, розробки пристроїв, що розв'язують таку задачу та їх інтегрування у склад сучасного обладнання систем керування пуском потужних електроприводів енергоємних виробництв.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено аналіз конструктивних особливостей та роботи електричних машин постійного та змінного струму. Визначені основні шляхи покращення ефективності використання електроприводів на їх базі. Одним із таких шляхів є заміна електродвигунів на сучасні, з більшим ККД. Іншим шляхом є створення ефективної системи пуску.

Було визначено найважливіші чинники впливу процесів пуску потужних електроприводів на надійність і залишковий технічний ресурс електромеханічного та технологічного обладнання. Розглянуто фактори прискореного зношування елементів електроприводів під дією неномінальних чинників впливу. До ресурсних витрат процесу пуску віднесено енергоспоживання, зношування обладнання та додаткові економічні ризики підприємства від локального зниження якості напруги живлення. Завдання керування процесом пуску сформульовано як комплексне завдання ефективного використання всіх видів ресурсів, що використовуються та утворюються процесом пуску. Зроблено припущення, що збільшення експлуатаційних навантажень призводить до непропорційно значного збільшення зношування та скорочення технічного ресурсу технологічного та електромеханічного обладнання. Можна зазначити, що важливими проблемами, які розв'язуються з використанням пристроїв керованого пуску, є зменшення зношування усіх видів обладнання, а також зменшення додаткових економічних ризиків процесів пуску через зменшення локальних показників якості електроенергії на затискачах загального джерела живлення. залежності складових ресурсних витрат процесу пуску для найпоширеніших типів електроприводів від впливу керування мають близький характер. Збільшення тривалості пуску супроводжується зростанням енергоспоживання та зменшенням зношування обладнання та додаткових економічних ризиків. Установлено, що залежність інтегральної експертної оцінки ресурсних витрат

має єдиний мінімум у області визначення впливу керування, що створює передумови для оптимізації пускових процесів.

Пусковий процес потужних електроприводів створює складний механізм впливу на електромеханічну систему та її технологічне оточення. Це дозволяє охарактеризувати проблему підвищення ефективності роботи пускових пристроїв як комплексне завдання підвищення ефективності використання ресурсів у процесі пуску.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вольдек А. И. Электрические машины/А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Брускин Д. Э. Электрические машины: В 2-х ч. Ч. 1/ Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов – М.: Высш. шк., 1987. – 319 с.
3. Брускин Д. Э. Электрические машины: В 2-х ч. Ч. 2./ Д. Э. Брускин, А. Е. Захарович, В. С. Хвостов – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
4. Куценко Ю.М. Электричні машини і апарати: навчальний посібник/ Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2012. – 449 с.
5. Назарьян Г. Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов / Г. Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.
6. Загірняк М. В. Электричні машини: підручник/ М. В. Загірняк, Б. І. Невзілін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
7. Глебов И.А., Щулаков Н.В., Крутяков Е.А. Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин, Л: Наука. Ленинг. отд., 1988, с. 197.
8. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий, К.: Техніка, 1989, с. 287.
9. Гречко Э.Н., Родькин Д.И., Черный А.П., Тытюк В.К., Павленко В.Е. Исследование и пути повышения эффективности пусковых систем синхронных двигателей в электроприводах промышленных механизмов:, Киев: преп. / АН Украины. Ин-т проблем энергосбережения, 93-1, 1993, с. 48.
10. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ под ред. Л.Г.Мамиконянца., М.:Энергоатомиздат, 1984, с. 240.
11. Морозов А.А., Черный А.П. Ценообразование при ремонте электродвигателей систем привода, Проблеми створення нових машин і технологій: наукові праці КДПУ № 1(8), 2000, с. 217-219
12. Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Луганськ: Ноулідж, 2010, с. 670.
13. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин, Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1976, с. 248.

14. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Надёжность электрических машин: учебник для студ. высш. учеб. заведений, О. Гольдберга, Ред., М.: Изд.центр «Академия», 2010, с. 288.
15. Ванеев Б.Н., Главный В.Д., Гостищев В.М., Сердюк Л.И. Надежность асинхронных электродвигателей: Под ред Б.Н. Ванеева, К.:Техніка, 1983, с. 143.
16. Кесслер А. Расчет нагрева асинхронных двигателей при тяжелом пуске и торможении противовключением. Электричество, № 6, 1963.
17. Захарченко П. И., Ширнин И. Г., Ванеев Б. Н., Гостищев В. М. Обеспечение надежности асинхронных двигателей. Донецк: УкрНИИВЭ, 1998, с. 324.
18. Черный А.П., Синчук О.Н., Осадчук Ю.Г. Стратегия мобильных систем мониторинга и энергетической диагностики электроприводов в промышленности. Електротехнічні і енергозберігаючі системи, № 1/2007(1), 2007, с. 36-41.
19. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода, М.:Энергия, 1968, с. 264.
20. Ривин Е. И. Самовозбуждение колебаний при разгоне механической системы асинхронным двигателем. ИАН СССР, Энергетика и автоматика., т. 3, 1960.
21. Копылов И.П. К определению динамических энергетических показателей при несинусоидальном и несимметричном напряжении. Изв. АН Энергетика, № №2, 2001, с. 31-38.
22. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока, М. - Л.: Госэнергоиздат, 1963, с. 744.
23. Фархадзаде Э.М., Гулиев Г.Б. Расчет показателей несинусоидального режима узла нагрузки. Электричество. №8, с. 20-26, 2002.
24. Церазов А.Л., Якименко Н.И. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей. М.: Госэнергоиздат, 1963, с. 120.

25. Огарь В.О., Василенко А. Л. Математическая модель асинхронного двигателя с учетом несимметрии магнитной системы. Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика, № 1(1), 2011, с. 342-343.
26. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем, Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008, с. 246.
27. Черный А.П. Структура системы функциональной диагностики электрических машин электроприводов. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», Донецьк: ДонНТУ, № Вип. 67, 2003, с. 109-112.
28. Черный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, № Вип. 15, 2004, с. 160-168.
29. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, № Вип. 4/2005(33) , 2005, с. 43-46.
30. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов, изд. 2-е, перераб. и доп., М.: Энергоатомиздат, 1998, с. 704.
31. Елисеев В.А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу., М.: Энергоатомиздат, 1983, с. 616.
32. Щолоков О.Г. Синтез релейных систем керування електроприводів постійного струму з від'ємним в'язким тертям у навантаженні, Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.09.03 / НТУ "ХП" – Харків, 2002, с. 21.
33. Гладырь А.И. Трогание и пуск как фазы единого процесса. Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов Кременчугского

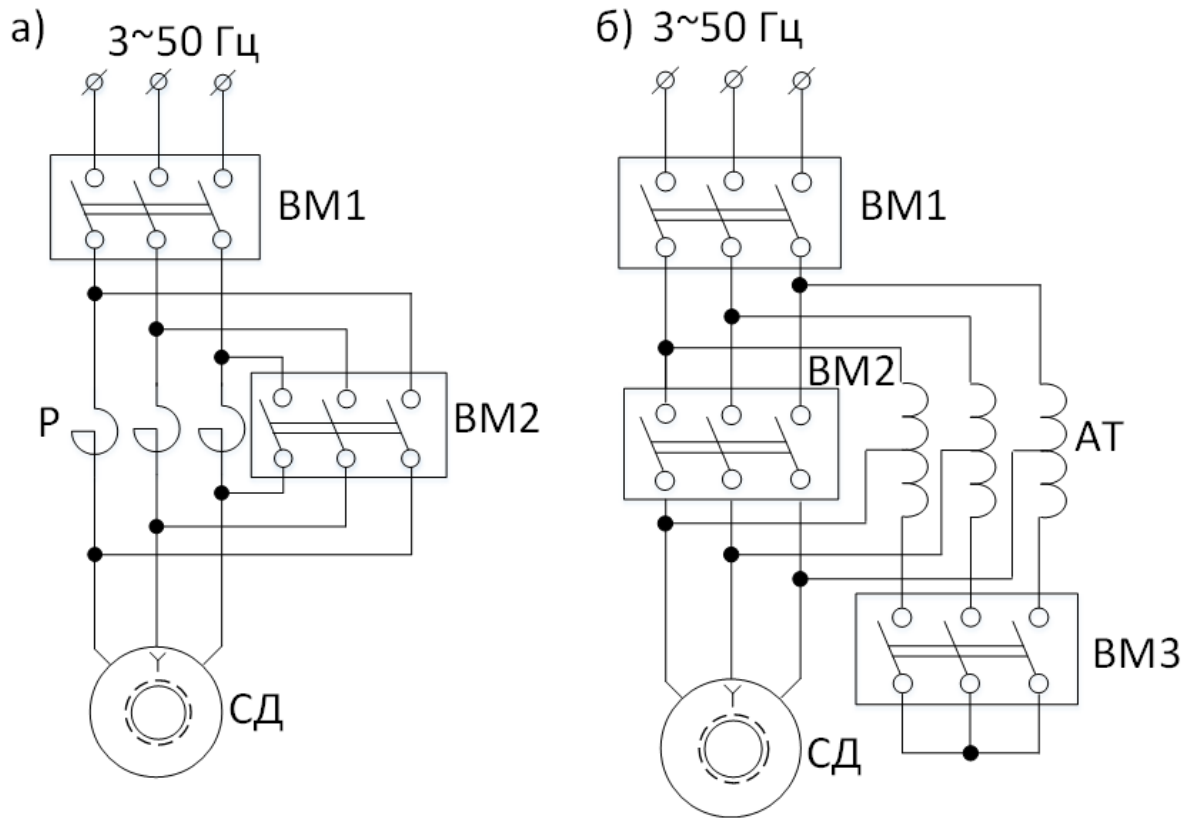
государственного политехнического университета.– Кременчуг: КГПУ, № 1(10), 2001, с. 24-29.

34. Гладырь А.И. Определение механических характеристик турбомеханизмов. Проблемы создания новых машин и технологий. – Кременчуг: КГПИ., № Вып. 2/(5), 1998, с. 148-152.

35. Гладырь А.И. Экспериментальные пусковые характеристики насосного агрегата с учетом момента трогания. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: – Кременчуг: КГПУ, № 2(19), 2003, с. 247-249.

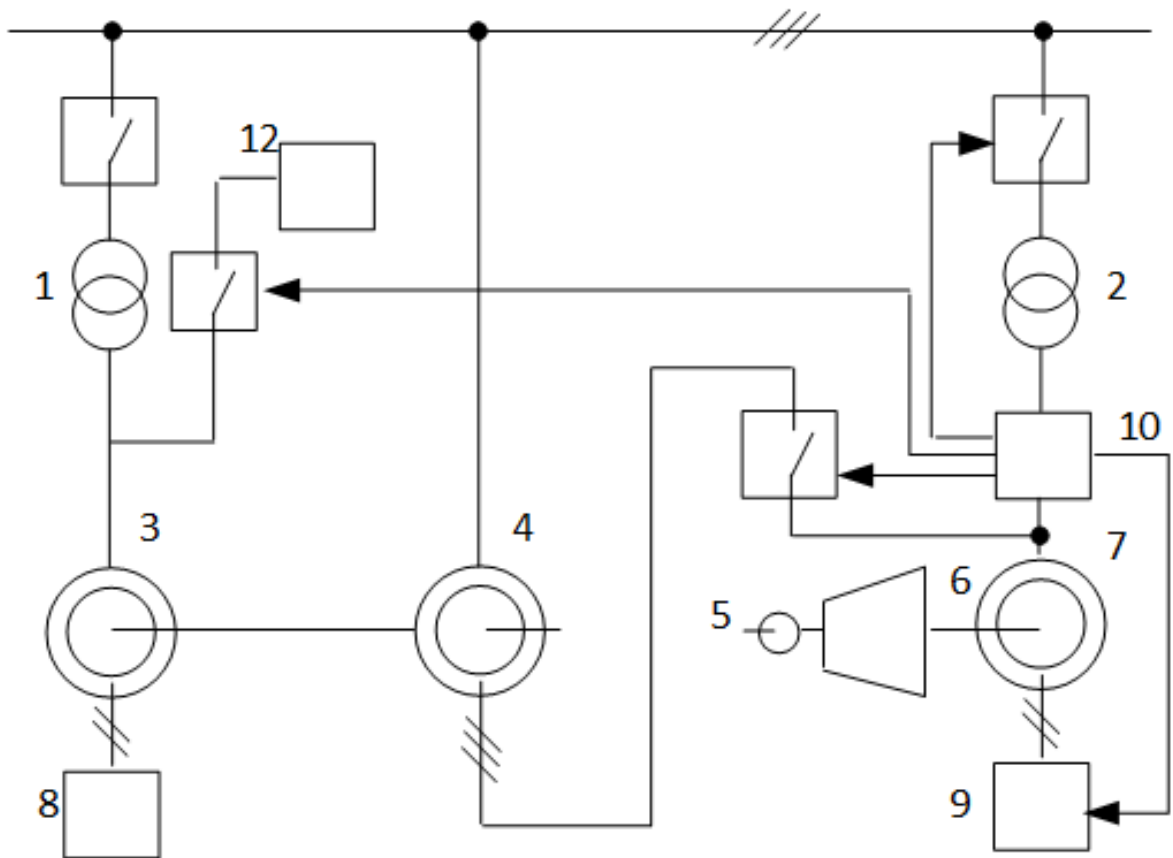
Додаток А
Демонстраційні матеріали до дипломної роботи

СХЕМИ ПУСКУ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ПОНИЖЕННЯМ
НАПРУГИ МЕРЕЖІ



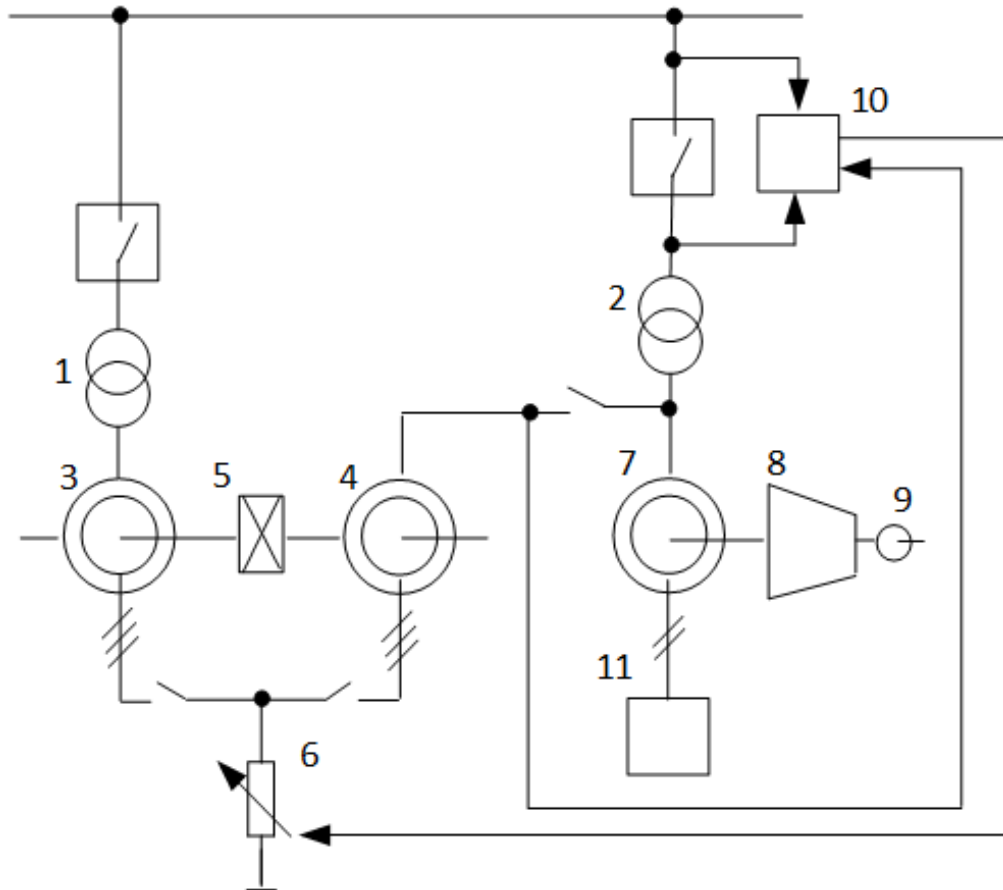
а – реакторний; б – автотрансформаторний

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ПУСКУ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОМАШИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА



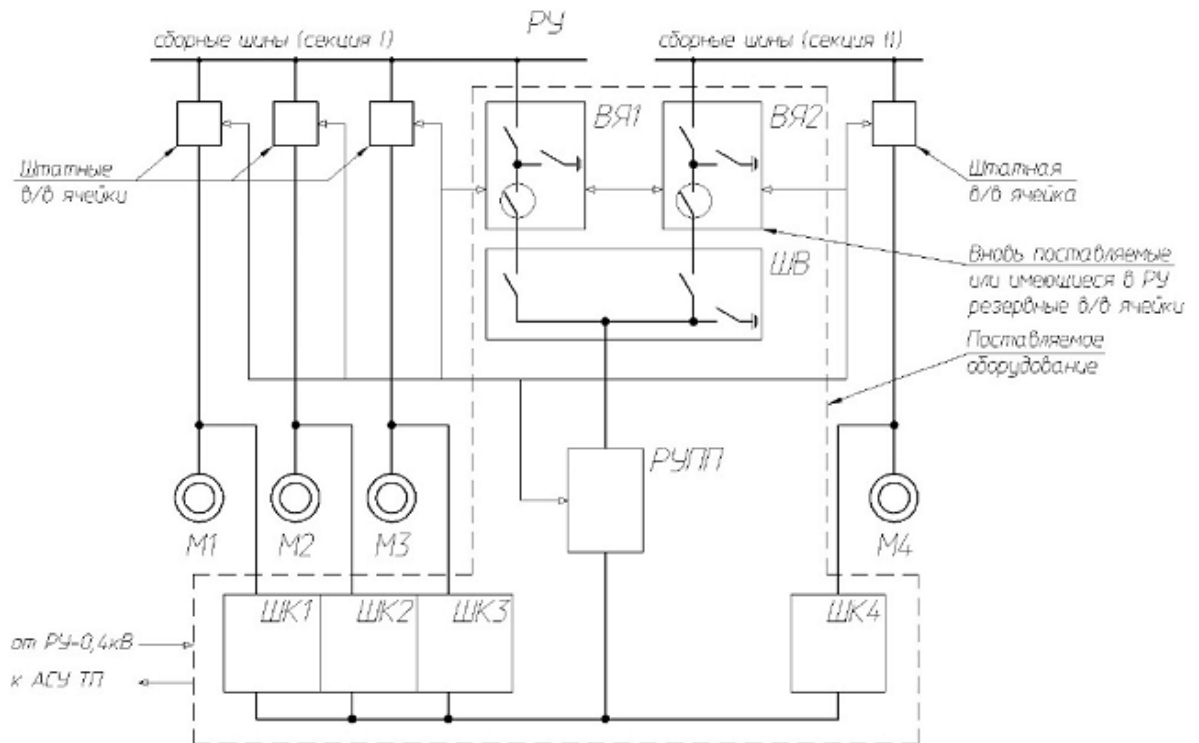
- 1, 2 – трансформатор;
- 3 – асинхронний двигун;
- 4 – синхронний генератор;
- 5 – валоповоротний пристрій;
- 6 – компресор;
- 7 – головний синхронний двигун;
- 8 – пусковий реостат;
- 9 – збудник головного двигуна;
- 10 – синхронізувальний пристрій

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ПУСКУ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА МЕТОДОМ УНГЕРА-КЛАРКА

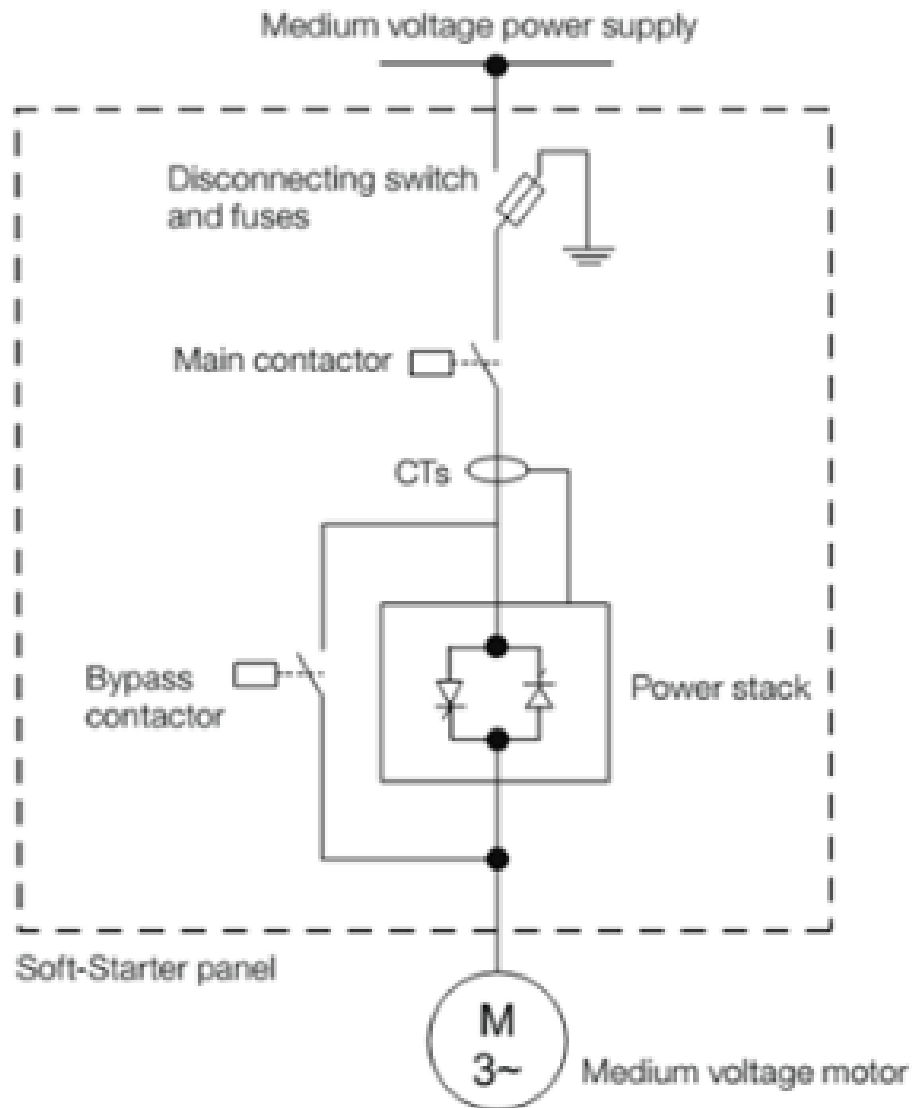


- 1, 2 – трансформатор;
- 3 – асинхронний двигун;
- 4 – асинхронний генератор;
- 5 – редуктор;
- 6 – пусковий реостат;
- 7 – головний синхронний двигун;
- 8 – компресор;
- 9 – валоповоротний пристрій;
- 10 – синхронізувальний пристрій;
- 11 – пристрій збудження синхронного двигуна

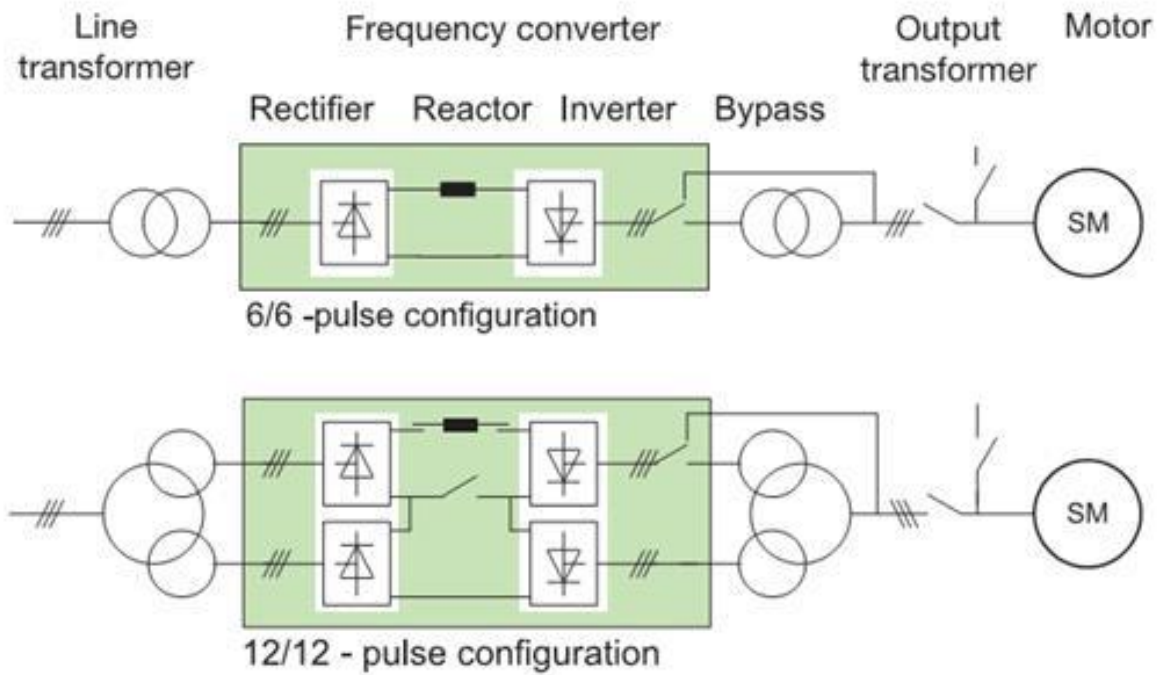
ПРИНЦИПОВА СХЕМА СИЛОВОЙ ЧАСТИНИ ПУСКОВОГО ПРИБОЮ СЕРИИ РУПІ (УКРАЇНА)



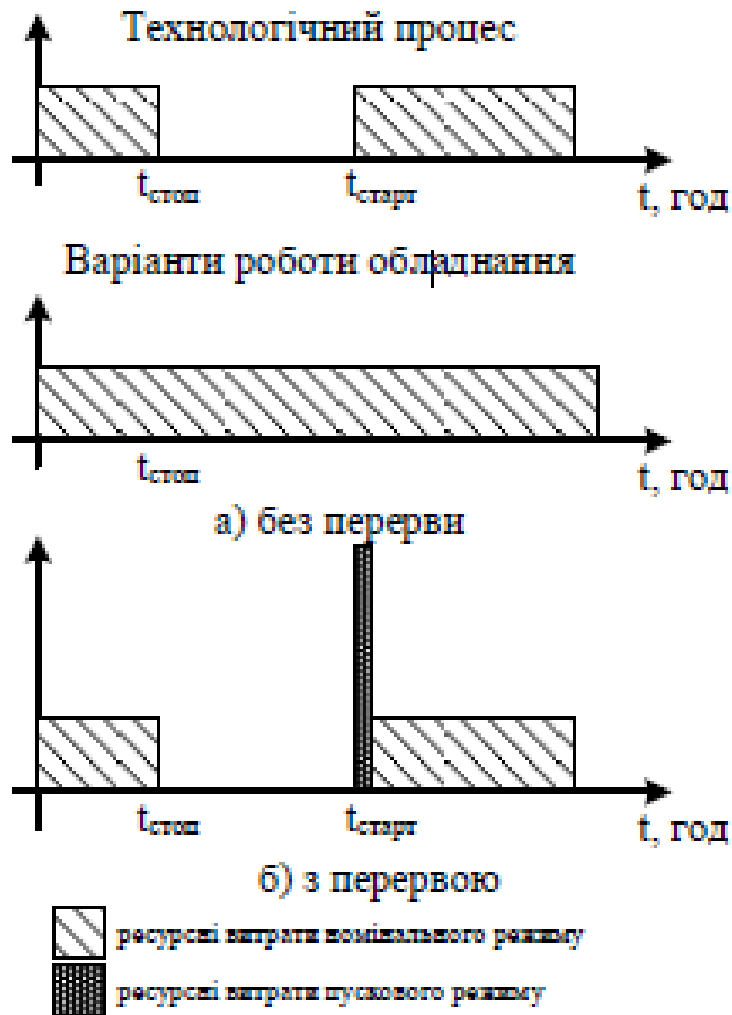
ПРИНЦИПОВА СХЕМА СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ПУСКОВОГО ПРИБОРУ
SSW7000, WEG



ВАРІАНТИ ВИКОНАННЯ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ПУСКОВОГО ПРИБОРУ MEGADRIVE-LCI, ABB



ВАРІАНТИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ ПЕРЕРВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ



До порівняння експлуатаційних витрат експлуатаційного та пускового режимів

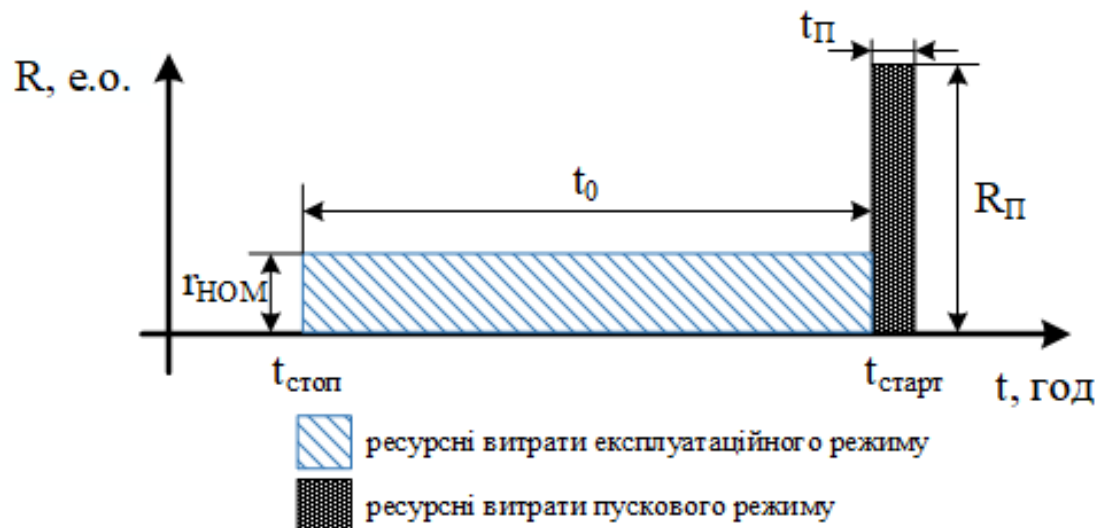


СХЕМА РЕСУРСНИХ ВИТРАТ ПРОЦЕСУ ПУСКУ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

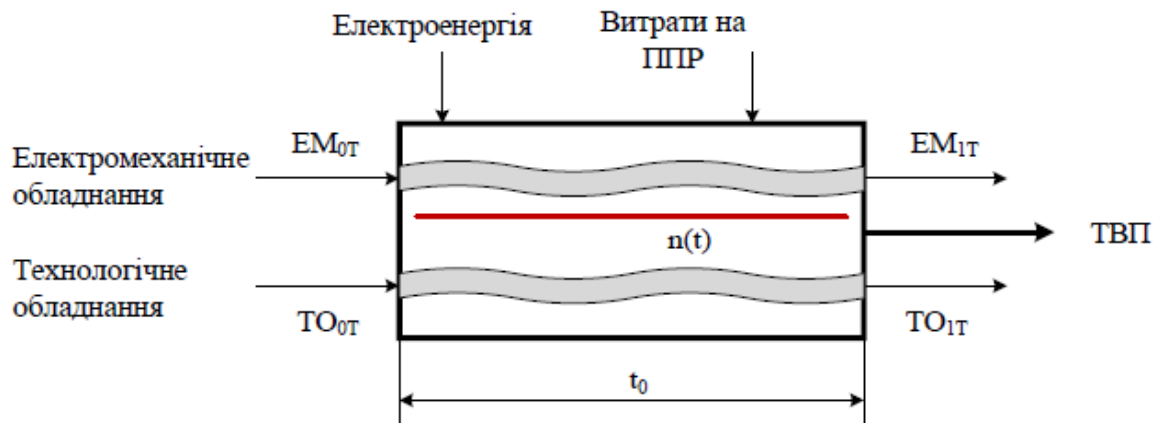
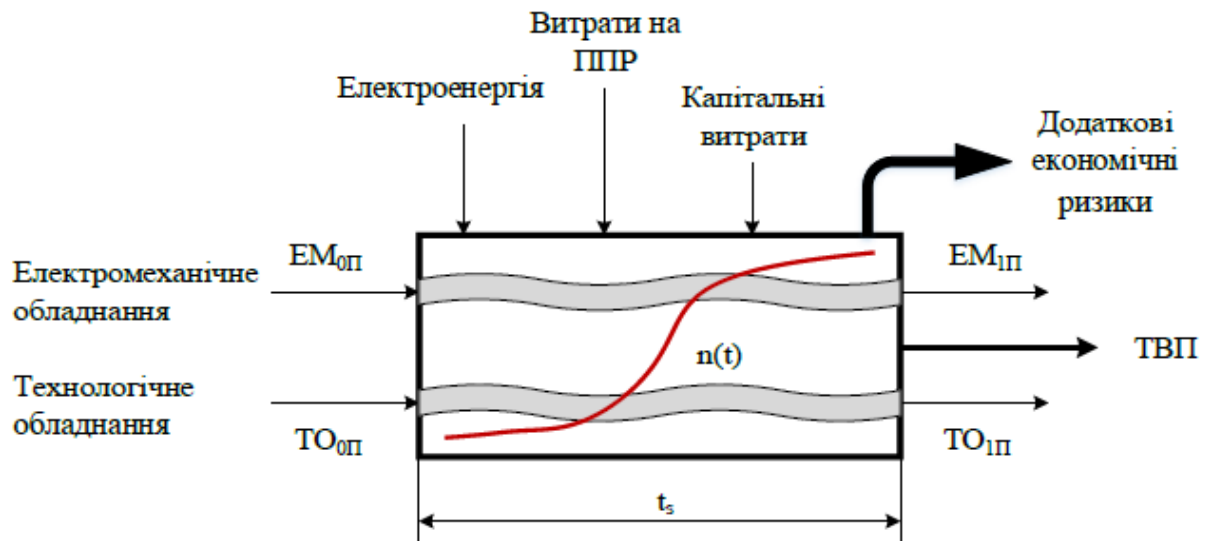
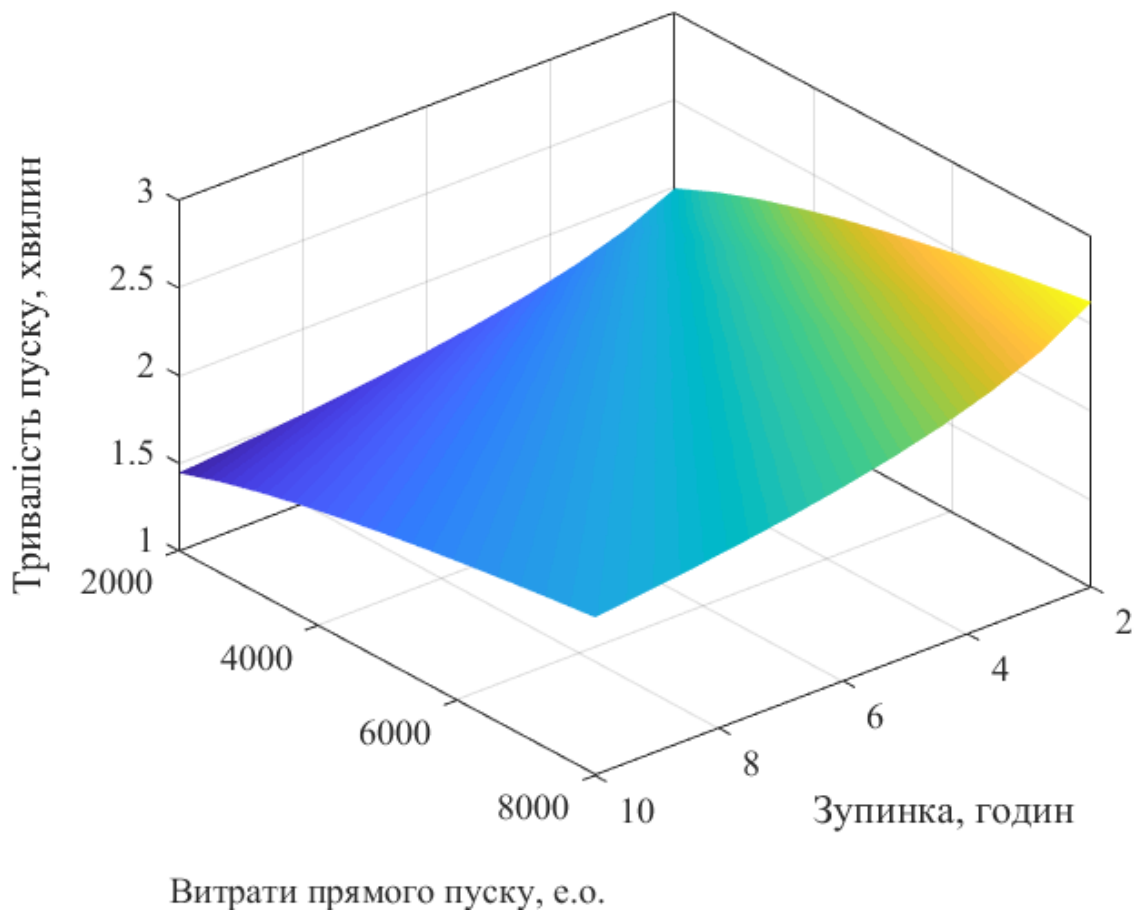


СХЕМА РЕСУРСНИХ ВИТРАТ ПРОЦЕСУ ПУСКУ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ



ЗАЛЕЖНІСТЬ МІНІМАЛЬНОЇ ЗА УМОВИ БЕЗЗБИТКОВОСТІ
ТРИВАЛОСТІ ПРОЦЕСУ ПУСКУ ВІД ВЕЛИЧИНИ РЕСУРСНИХ ВИТРАТ
НА ПРЯМИЙ ПУСК $R_{п0}$ І ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕРВИ В РОБОТІ
ОБЛАДНАННЯ T_0



ДІАГРАМА РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА
ДЛЯ ПЛАВНОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

