

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Факультет інженерії**

**Кафедра електричної інженерії**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**до кваліфікаційної магістерської роботи  
ступінь вищої освіти магістр**

галузі знань 14 Електрична інженерія

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

на тему Енергоощадний електропривод за системою  
«Перетворювач напруги – асинхронний двигун»

Виконав: студент групи ЕЕ-21дм

Попов В. С.

(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник

доц. Морнева М. О.

(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Завідувач кафедри

доц. Руднев Є. С.

(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент

доц. Іванов В. Г.

(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Київ 2022 р.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерії  
Кафедра Електричної інженерії  
Ступінь вищої освіти магістр  
Галузь знань 14 Електрична інженерія  
(шифр і назва)  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ЕІ**

доц. Руднев Є. С.  
“      ”      2022 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Попову Олександр Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Енергоощадний електропривод за системою  
«Перетворювач напруги – асинхронний двигун»

керівник проекту Морнева М. О. канд. техн. наук, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 12 ” 10 2020 р. № 127/15.23-С

2. Строк подання студентом проекту 22 листопада 2022 р.

3. Вихідні дані до проекту Вихідні дані визначені в переліку питань, що підлягають  
розробці в магістерській роботі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) енергозбереження в асинхронному електроприводі; розрахунок статичних характеристик АД при живленні від джерела напруги; залежності для побудови енергоефективних систем; моделювання енергозберігаючої системи електроприводу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) плакати, що пояснюють суть магістерської роботи в кількості 10 шт.

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	доц. Морнева М. О.		

7. Дата видачі завдання 05 вересня 2022 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Енергозбереження в асинхронному електроприводі		
2	Розрахунок статичних характеристик АД при живленні від джерела напруги		
3	Залежності для побудови енергоефективних систем		
4	Моделювання енергозберігаючої системи електроприводу		

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Попов О. О. \_\_\_\_\_  
( прізвище та ініціали )

Керівник проекту \_\_\_\_\_  
( підпис )

Морнева М. О. \_\_\_\_\_  
( прізвище та ініціали )

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Енергозбереження в асинхронному електроприводі.....	7
1.1 Основні шляхи підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів.....	7
1.2 Енергетична ефективність асинхронних електроприводів.....	12
1.3 Електропривод з тиристорним регулятором напруги.....	19
1.4 Системи електроприводів «Тиристорний перетворювач напруги - асинхронний двигун».....	28
1.5 Оптимізація втрат і ККД в системах ТПН–АД при змінненні параметрів усталеного режиму.....	35
1.6 Системи ТПН–АД.....	41
2 Розрахунок статичних характеристик АД при живленні від джерела напруги.....	49
3 Залежності для побудови енергоефективних систем.....	53
4 Моделювання енергозберігаючої системи електроприводу.....	55
4.1 Модель асинхронної машини.....	55
4.2 Функціональна схема системи ТПН-АД. Робота системи.....	58
4.3 Структурна схема системи і оптимізація.....	59
4.4 Моделювання системи ТПН-АД в MATLAB / Simulink.....	62
Висновки.....	69
Перелік посилань.....	70
Додатки.....	72

## ВСТУП

**Об'єктом дослідження** є електромагнітні, механічні і енергетичні процеси в асинхронному двигуні.

**Предметом дослідження** є електропривод за системою «тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун» в якій забезпечується оптимальне керування.

**Метою** роботи є розробка системи електроприводу, яка має покращені енергопоказники в порівнянні з нерегульованим електроприводом.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

- розрахунок статичних енергетичних характеристик асинхронного двигуна при живленні його змінною напругою різних рівнів при незмінній частоті;
- отримання залежностей напруги на двигуні від координат стану при яких забезпечується екстремальне значення енергопоказника;
- побудова системи електроприводу з використанням отриманих залежностей яка забезпечує автоматичну зміну напруги при зміні навантаження для забезпечення екстремального значення енергопоказника.

Зростаючі технологічні вимоги до якості виробничих процесів, необхідність впровадження високих технологій зумовлюють стійку тенденцію впровадження в різні галузі промислового і сільськогосподарського виробництва регульованих електроприводів.

Розвиток математичної теорії машин змінного струму, створення удосконалених силових напівпровідникових приладів і перетворювачів на їх основі, використання сучасних засобів управління, включаючи мікропроцесорні, дозволили створити високоякісні і надійні системи регульованих асинхронних електроприводів, які стають основним видом регульованого електроприводу. В 2002 р. на європейському ринку із загального числа проданих регульованих приводів електроприводи змінного струму склали 68%, електроприводи постійного струму - 15%, механічні та гідравлічні приводи - 17%. Тенденція зростання частки впроваджуваних регульованих асинхронних електроприводів об'єктивно збережеться і надалі, так як масовий

регульований електропривод може бути реалізований тільки на базі асинхронних двигунів. Це пов'язано з тим, що в діапазоні потужностей до 100 кВт їх виробляється в 40–50 разів більше, ніж двигунів постійного струму.

Широке використання регульованих електроприводів привело до того, що сучасний електропривод є не тільки енергосиловою основою, що дозволяє забезпечити виробничі механізми необхідною механічною енергією, але і засобом управління технологічними процесами, тому що завдання по реалізації якості виробничих процесів в даний час в більшості випадків покладаються на системи управління регульованими електроприводами в поєднанні з системами технологічної автоматики. У зв'язку зі зростанням цін на енергоносії, зокрема на електроенергію, і обмеженими можливостями збільшення потужності енергогенеруючих установок проблема енергозбереження, в тому числі зниження електроспоживання, набуває особливої актуальності.

Енергозбереження стало одним з пріоритетних напрямків технічної політики у всіх розвинених країнах світу. Це пов'язано, по-перше, з обмеженістю і непоновлюваністю основних енергоресурсів, по-друге, з безперервно зростаючими складнощами їх видобутку та вартістю, по-третє, з глобальними екологічними проблемами, які виникли на рубежі тисячоліть.

Енергозбереження є найбільш дешевим і безпечним способом збільшення енергогенеруючих потужностей, так як витрати на економію 1 кВт потужності обходяться в 4-5 разів дешевше, ніж вартість знову вводиться 1 кВт потужності.

Основні втрати (до 90%) припадають на сферу енергоспоживання, в якій повинні бути сконцентровані основні зусилля з енергозбереження електроенергії. Так як електроприводи споживають до 70% електроенергії, що виробляється, найбільш істотна економія електроенергії може бути досягнута при використанні регульованих електроприводів для управління технологічними процесами, що в поєднанні з можливостями автоматизації може забезпечити оптимальне використання електроенергії та інших ресурсів.

У зв'язку з тим що серед регульованих електроприводів домінуюче положення займають частотно-регульовані асинхронні електроприводи, їх масове застосування дозволяє вирішувати не тільки технологічні завдання, а й проблему енергозбереження.

## 1 ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

### 1.1 Основні шляхи підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів

В даний час основним типом регульованого електроприводу є частотно-регульований асинхронний електропривод - система «напівпровідниковий перетворювач частоти - асинхронний двигун» (НПЧ-АД). Однак поряд з цим електроприводом в деяких випадках для вирішення окремих виробничих завдань і енергозбереження знаходить застосування система «тиристорний перетворювач напруги - асинхронний двигун» (ТПН - АД), що забезпечує регулювання напруги першої гармоніки напруги, що підводиться до статора.

В експлуатації також є електроприводи на основі асинхронних двигунів з фазовим ротором, регульовані за рахунок зміни додаткових опорів в роторних ланцюгах, так звані системи реостатного регулювання - «пристрій реостатного регулювання - асинхронний двигун з фазовим ротором» (ПРР-АДФР). Особливо багато таких електроприводів входить до складу підйомно-транспортних механізмів. З урахуванням наведених вище способів і систем керування асинхронними електроприводами можна окреслити такі напрями зниження споживання енергії АД.

Перший напрям пов'язаний зі зниженням втрат в електроприводі при виконанні ним заданих технологічних операцій по заданих тахограми і з певним режимом навантаження. Це електроприводи, що працюють в пускогальмівних режимах (крани, ліфти, головні приводи слябінгів і блюмінгів, допоміжні позиційні механізми прокатних станів і т.д.) або тривалих режимах з повільно змінним навантаженням (насоси, вентилятори, компресори, транспортери і т.д.). У таких електроприводах за рахунок зниження втрат електроприводу в сталих і перехідних режимах можлива значна економія електроенергії. У кінематично пов'язаних електроприводах (рольганги,

багатодвигунні приводи візків і т.д.) рівномірний розподіл навантажень між двигунами дозволяє також мінімізувати втрати в них.

Другий напрямок пов'язаний зі зміною технологічного процесу на основі переходу до більш досконалих методів регулювання електроприводу і параметрів цього технологічного процесу. При цьому відбувається зниження споживання енергії електроприводом. Як приклад можна привести електроприводи турбомеханізмів (насосів, вентиляторів, турбокомпресорів), поршневих насосів та компресорів, транспортерів, систем регулювання співвідношення паливо-повітря і ін. При цьому, як правило, ефект не обмежується економією електроенергії в електроприводі, у багатьох випадках можлива економія ресурсів (води, твердого та рідкого палива і т.д.).

Для обох названих напрямів характерним є те, що в них знижується споживання енергії саме в електроприводі: в першому випадку за рахунок зниження втрат енергії, у другому за рахунок використання менш енерговитратного з боку електроприводу управління технологічним процесом.

Можна назвати і третій напрямок, що забезпечує реалізацію енергозберігаючих технологій. Відомо, що є ряд технологічних процесів, де електропривод порівняно невеликої потужності управляє потоком енергії, потужність якого в десятки і сотні разів перевищує потужність електроприводу. До таких об'єктів можна віднести дугові сталеплавильні печі постійного і змінного струму, вакуумні дугові печі, рудо-відновлювальні печі, установки індукційного нагріву і т.д. На них електроприводи потужністю в кілька кіловат можуть управляти процесом, який споживає десятки і навіть сотні мегават. Очевидно, що від досконалості електроприводу, його швидкості та точності, ступеня автоматизації процесу багато в чому залежить ефективне використання таких значних обсягів енергії. Цей напрямок не пов'язаний зі зменшенням потоку енергії через електропривод, частіше споживання енергії електроприводом навіть збільшується.



Сформулюємо шляхи енергозбереження в асинхронному електроприводі.

В рамках першого напрямку для зниження втрат енергії в асинхронному електроприводі можна використовувати наступні шляхи.

1. Обґрунтований вибір встановленої потужності двигуна, що відповідає реальним потребам керованого механізму. Це завдання пов'язано з тим, що коефіцієнт завантаження багатьох двигунів становить 50% і менше, що говорить або про низьку кваліфікацію розробників, або про недосконалість використаної методики розрахунку потужності електроприводу. Очевидно, що двигун заниженою потужності швидко виходить з ладу через перегрів, а двигун з великим запасом потужності перетворює енергію неефективно, тобто з високими питомими втратами в самому двигуні через низький ККД і в мережі живлення через низький коефіцієнт потужності. Тому перший шлях полягає в удосконаленні методик вибору потужності двигуна і перевірки його по нагріванню, а також в підвищенні кваліфікації розробників, проектувальників і обслуговуючого персоналу. На практиці зустрічаються випадки, коли двигун, який вийшов з ладу замінюється відповідним по висоті вала або його діаметру, а не по потужності. Існуючі методики вибору потужності двигуна і перевірки його по нагріванню можуть розглядатися лише як перше наближення. Необхідна розробка більш досконалих методик, заснованих на точному обліку режимів роботи електроприводу, зміні його енергетичних показників, теплових процесів в двигуні, стану ізоляції і т.д. Зрозуміло, це передбачає широке використання обчислювальної техніки і спеціального програмного забезпечення. Необхідна розробка більш досконалих методик, заснованих на точному обліку режимів роботи електроприводу, зміні його енергетичних показників, теплових процесів в двигуні, стану ізоляції і т.д. Зрозуміло, це передбачає широке використання обчислювальної техніки і спеціального програмного забезпечення. Необхідна розробка більш досконалих методик, заснованих на точному обліку режимів роботи електроприводу, зміні його енергетичних показників, теплових процесів в двигуні, стану ізоляції і т.д.

Зрозуміло, це передбачає широке використання обчислювальної техніки і спеціального програмного забезпечення.

2.Перехід на більш економічні двигуни, в яких за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза і міді), застосування більш досконалих матеріалів і технологій підвищені номінальні значення ККД і коефіцієнта потужності. Цей шлях, незважаючи на високу вартість таких двигунів, стає очевидним, якщо врахувати, що за даними західноєвропейських експертів, вартість електроенергії, споживаної щорічно середнім двигуном, в 5 разів перевершує його вартість. За час служби двигуна, а це десятки років, економія енергії значно перевищить капітальні витрати на таку модернізацію. Як вже зазначалося раніше, цей шлях поки не отримав належного визнання у вітчизняній практиці.

3.Перехід до більш досконалої з енергетичної точки зору системі електроприводу. Втрати енергії в перехідних режимах помітно змінюються при використанні реостатного регулювання, систем ТПН – АД і НПЧ – АД з мінімальними втратами при застосуванні частотно-регульованих електроприводів. Тому в рамках кожної з перерахованих систем є більш-менш вдалі в енергетичному і технологічному плані варіанти. Завданням проектувальника є грамотний і всебічно обгрунтований вибір конкретного технічного рішення.

4.Використання спеціальних технічних засобів, що забезпечують мінімізацію втрат енергії в електроприводі. Так як значна частина асинхронних електроприводів працює в умовах коли навантаження повільно змінюється (електроприводи турбомеханізмів, конвеєрів і т.д.), відхилення навантаження електроприводу від номінального погіршує енергетичні показники електроприводу. В даний час до таких засобів можна віднести пристрої регулювання напруги на двигуні відповідно до рівня його навантаження. Як правило, це або спеціальні регулятори напруги на основі ТПН, що включаються між мережею і статором двигуна, або перетворювачі частоти, в яких передбачений так званий режим енергозбереження. У першому випадку ТПН

виконує крім функції енергозбереження не менш важливі функції управління режимами пуску і гальмування іноді регулює швидкість або момент, здійснює захист, діагностику, т.і. Підвищує технічний рівень приводу в цілому. У другому випадку режим енергозбереження розглядається як додаткова опція перетворювача частоти і є лише в деяких типах перетворювачів. З урахуванням багатофункціональності застосування таких пристроїв виявляються економічно доцільними для приводів зі змінним навантаженням навіть при їх відносно високій вартості. У другому випадку режим енергозбереження розглядається як додаткова опція перетворювача частоти і є лише в деяких випускаються типах перетворювачів.

5. Удосконалення алгоритмів керування електроприводом в системах ТПН – АД і НПЧ – АД на основі енергетичних критеріїв оцінки його якості, тобто вдосконалення відомих рішень, розробка ефективних технічних засобів для їх здійснення і пошук нових рішень, оптимальних в енергетичному сенсі.

В рамках другого напрямку зниження споживання енергії вирішальне значення має перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого і підвищення рівня автоматизації за рахунок включення в контур регулювання ряду технологічних параметрів (тиску, витрати, температури і т.д.). Так як цей напрямок пов'язано зі зниженням споживання енергії електроприводом за рахунок зміни технологічного процесу, з'являється можливість регулювати які раніше не регулювали технологічні параметри або змінювати спосіб їх регулювання.

Для третього напрямку зниження споживання енергії характерні вдосконалення системи електроприводу в поєднанні з автоматизацією технологічного процесу і правильний вибір відповідного за якістю регулювання електроприводу з уже наявних або розробка нових, більш якісних систем.

Зауважимо, що при реалізації конкретних проектів виявляється, як правило, не один, а кілька можливих шляхів енергозбереження, тому для отримання максимального ефекту необхідний комплексний підхід до вирішення завдання енергозбереження в електроприводі.

Розглянемо деякі з перерахованих шляхів підвищення енергетичної ефективності асинхронного електроприводу.

## 1.2 Енергетична ефективність асинхронних електроприводів.

Деякі сучасні напівпровідникові перетворювачі (ТВП та НПЧ) у вигляді додаткової функції містять так званий режим енергозбереження. Розглянемо можливість цього режиму на прикладі перетворювача частоти зі скалярним керуванням.

Засобом додаткового енергозбереження при частотному управлінні асинхронним двигуном є розробка такого алгоритму управління, який оптимізував би магнітний потік. Оптимізація магнітного потоку дозволяє трохи знизити споживану потужність шляхом зниження рівня напруги при роботі в сталому режимі. У перехідних режимах слід використовувати регулювання з номінальним потоком, так як робота з оптимальним за умовами енергозбереження магнітним потоком пов'язана з істотним зменшенням перевантажувальної здатності двигуна, що не дозволяє досягти необхідного динамічного моменту.

Для того щоб оцінити ефективність оптимізації магнітного потоку, можна скористатися Г-подібною схемою заміщення асинхронного двигуна в статичних режимах для аналізу усталених режимів роботи АД. Завдання полягає в тому, щоб при заданому моменті навантаження і заданій швидкості ротора визначити такі значення частоти і амплітуди напруги, при яких забезпечується мінімум втрат в двигуні. Так як при фіксованих моменті і швидкості механічна потужність не змінюється, то мінімум втрат відповідає мінімуму споживаної потужності і максимуму ККД двигуна. Отримання аналітичного виразу для амплітуди і частоти напруги утруднено через складність системи рівнянь асинхронного електроприводу, яка включає векторні величини і комплексні опору, залежні від ковзання і швидкості обертання магнітного поля. Замість цього наведемо результати чисельного рішення цих рівнянь без урахування

можливого змінення параметрів схеми заміщення. Алгоритм рішення виглядає наступним чином:

- задається момент навантаження  $M_c$  і кутова швидкість  $\omega$ ;
- задається діюче значення напруги  $U_1$ , прикладеної до двигуна;
- чисельно знаходиться така швидкість  $\omega_0$ , яка при розрахунок електромагнітного моменту  $M$  дає результат  $M = M_c$ ;
- розраховуються сумарні втрати енергії в двигуні;
- в процесі розрахунку визначається точка з мінімумом втрат енергії і всі параметри, що відповідають цій точці.

Проаналізуємо деякі результати моделювання за вказаним алгоритмом для двигуна типу 4A160S2, що має  $P_{ном} = 15$  кВт. На рис. 1.1 показані залежності втрат від амплітуди напруги і моментів навантаження при  $\omega = \omega_{ном}$  (а) і  $\omega = 0,5\omega_{ном}$  (б). Як видно на рис. 1.1, а, можливість зниження втрат є лише при моментах опору  $M_c < 0,6M_{ном}$ . Очевидно, що при зниженні швидкості діапазон моментів навантаження, в якому доцільно знижувати напругу, зменшується (див. рис. 1.1, б). В цьому випадку не розглядається можливість збільшення напруги, так як воно призведе до насичення магнітного ланцюга.

Можливості економії споживаної потужності при різних швидкостях і моментах двигуна типу 4A160S2 зведені в табл. 1.1, а на рис. 1.2 показана діаграма, яка наочно ілюструє економію споживаної потужності в залежності від швидкості і моменту статичного навантаження двигуна типу 4A160S2. Очевидно, що можливості економії знижуються при збільшенні моменту навантаження і зменшення швидкості. У точці  $M_c = 0,05M_{ном}$ ,  $\omega = \omega_{ном}$  можна додатково заощадити 3,6% номінальної потужності. Якщо порівняти потужність, споживану в даному режимі до і після введення оптимізації, то отримана економія складе 40%. Однак вираз економії споживаної потужності у відсотках від номінальної потужності дає більш наочне уявлення про можливий ефект.

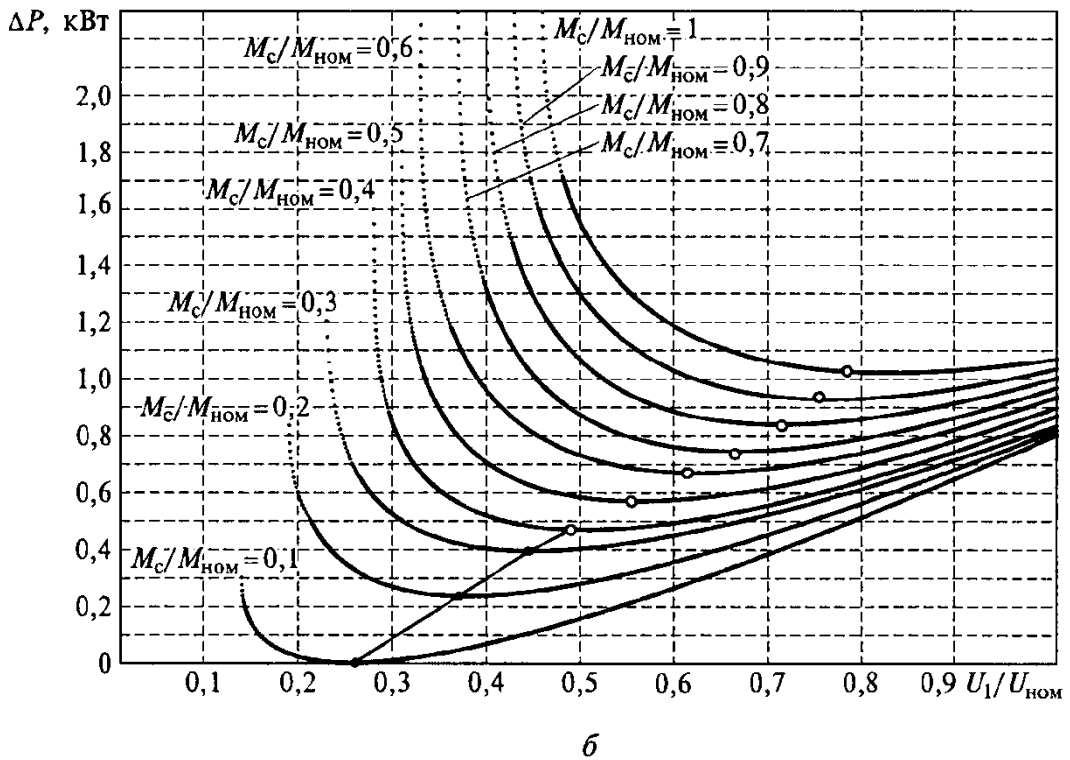
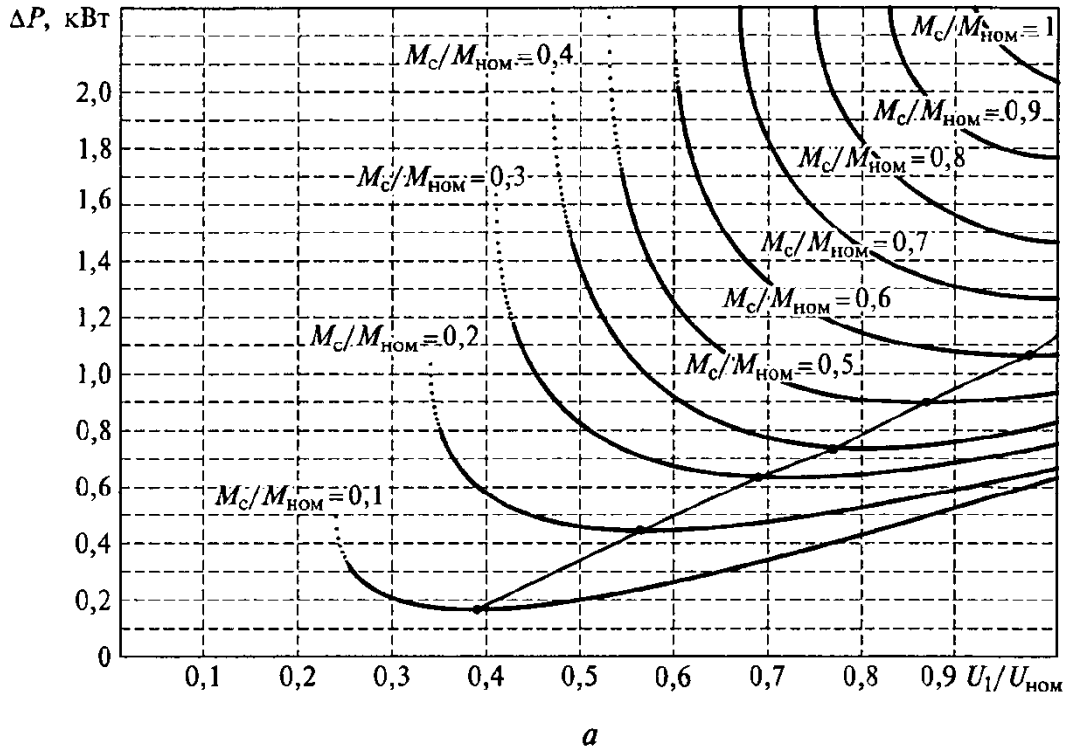


Рисунок 1.1 - Залежність втрат  $\Delta P$  в АД типу 4А160S2 від амплітуди напруги при постійній швидкості і різних моментах навантаження при  $\omega = \omega_{\text{ном}}$  (а) і  $\omega = 0,5\omega_{\text{ном}}$  (б)

Таблиця 1.1 - Економія споживаної потужності двигуна типу 4A160S2 в залежності від швидкості і моменту статичного навантаження  $\Delta P / P_{\text{НОМ}}, \%$

M <sub>c</sub> / M <sub>НОМ</sub> , %	$\omega / \omega_{\text{НОМ}}, \%$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	0,26	0,36	0,52	0,75	1,05	1,41	1,85	2,37	2,96	3,61
10	0,12	0,2	0,34	0,53	0,78	1,1	1,49	1,95	2,47	3,07
15	0,03	0,09	0,19	0,34	0,55	0,82	1,16	1,56	2,03	2,57
20	0	0,02	0,08	0,18	0,35	0,58	0,86	1,21	1,63	2,11
25	0	0	0,01	0,08	0,2	0,38	0,61	0,91	1,26	1,69
30	0	0	0	0,01	0,08	0,21	0,4	0,64	0,94	1,31
35	0	0	0	0	0,02	0,09	0,23	0,42	0,67	0,98
40	0	0	0	0	0	0,02	0,1	0,25	0,43	0,69
45	0	0	0	0	0	0	0,02	0,11	0,25	0,43
50	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,12	0,26
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,12
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02

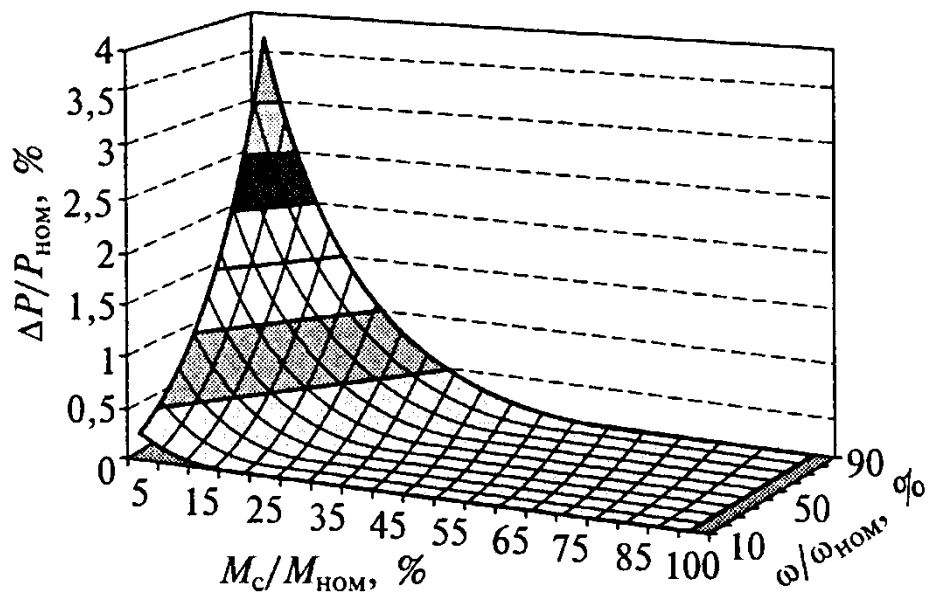


Рисунок 1.2 - Діаграма економії споживаної енергії двигуном типу 4A160S2

Аналогічні розрахунки були проведені для двигуна типу 4A80A4, який має  $P_{ном} = 1,1$  кВт. У точці  $M_c = 0,05M_{ном}$ ,  $\omega = \omega_{ном}$  можна заощадити до 13% номінальної потужності. При розрахунку в цій же точці для двигуна типу 4АН250М4 ( $P_{ном} = 110$  кВт) отримано 2,4% економії. Це підтверджує відомий факт збільшення ефективності енергозберігаючого режиму зі зменшенням потужності двигуна.

Енергозберігаючий режим може бути здійснений наступними способами:

- 1) підтримкою сталості  $\cos\phi_1$ ;
- 2) підтриманням постійного ковзання;
- 3) управлінням з використанням моделі двигуна;
- 4) за допомогою пошукових алгоритмів.

Перераховані способи оптимізації, крім останнього, використовують інформацію про параметри двигуна, які, як правило, невідомі. Завантажувати систему скалярного управління завданнями ідентифікації не представляється доцільним. Тому найбільш надійним і незалежним від властивостей конкретного об'єкта управління методом оптимізації є пошукові алгоритми, які при розрахунку використовують тільки значення струмів і напруг.

У цьому випадку оптимальний режим досягається шляхом мінімізації споживаної потужності, розрахованої за формулою

$$P_1 = 3U_1I_1\cos\phi_1. \quad (1.1)$$

В процесі роботи система управління ітеративно (східчасто) змінює рівень напруги для відшукання точки найнижчий рівень споживання електроенергії. Критерієм пошуку може також служити максимум  $\cos\phi_1$  або мінімум споживаного струму. Відшукання максимуму  $\cos\phi_1$  не дає переваг перед мінімізацією потужності з точки зору обчислювальної складності, так як  $\cos\phi$  розраховується також через вектори струму і напруги. Перевага в даному випадку полягає в тому, що максимум  $\cos\phi$  виражений більш явно, ніж мінімум потужності, і він легше локалізується. Недоліком є невідповідність максимального і оптимального  $\cos\phi$ . Перевага мінімізації струму полягає в спрощенні реалізації алгоритму. Однак це спрощення несуттєво, так як на



практиці доводиться використовувати процедури обробки та фільтрації сигналів з датчиків струму. Додаткове введення в розрахунок вектора напруги не призводить до помітного ускладнення, так як можна використовувати задане значення цього вектора при здійсненні векторної ШІМ. Розрахунок косинусоїдальної функції також проводиться порівняно просто навіть при використанні щодо нескладних мікроконтролерів. Крім того, регулювання по мінімуму струму не відповідає регулюванню по мінімуму потужності.

При реалізації енергозберігаючого алгоритму виникає проблема зниження перевантажувальної здатності двигуна при зменшенні напруги живлення. Система управління повинна відновлювати магнітний потік при механічному збуренні, тобто реагувати на збільшення струму. Критичний момент в даному випадку пропорційний квадрату напруги і може бути розрахований за формулою

$$M_{\kappa} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + \omega_{0\sigma}^2 (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2} \right)} \quad (1.2)$$

Таким чином, найбільш прийнятним методом оптимізації енергоспоживання для перетворювачів зі скалярним керуванням слід визнати метод мінімізації споживаної потужності.

Як приклад на рис. 1.3 представлені характеристики процесу пуску і пошуку оптимального напруги при роботі АД в сталому режимі при  $\omega$ ном ( $P1^*$ ,  $U1^*$ ,  $I1^*$ ,  $\omega^*$  і  $\omega0^*$  дані в відносних одиницях, за базові величини прийняті їх номінальні значення).

Пошуковому алгоритму може знадобитися кілька десятків секунд для виявлення оптимальної точки, що робить його непридатним до використання в механізмах циклічної дії з малими циклами. Це обумовлює доцільність застосування алгоритму пошуку мінімуму споживаної потужності в електроприводах, які тривалий час працюють з постійними навантаженнями, значно меншими номінальних.

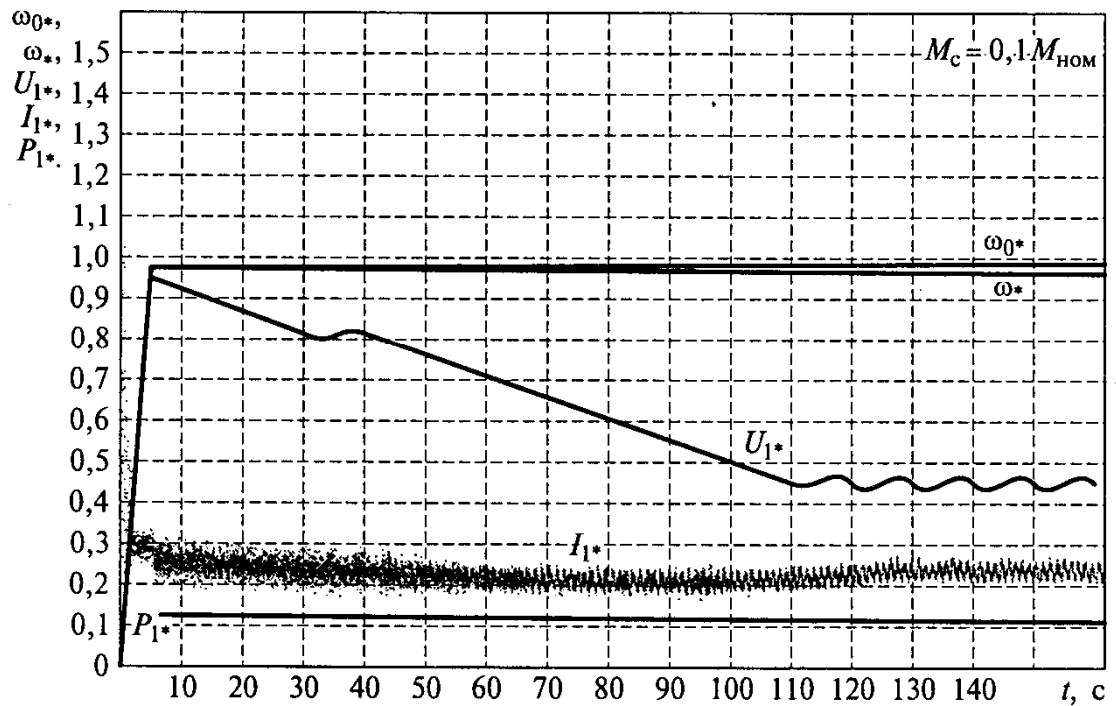


Рисунок 1.3 - Характеристики процесу пошуку оптимального напруги при роботі АД в сталому режимі при  $\omega_{ном}$

Турбомеханізм характеризується суттєвим зменшенням моменту навантаження зі зниженням швидкості, що, з одного боку, є перевагою з точки зору стійкості до зниження перевантажувальної здатності, а з іншого - не дозволяє отримати високу ефективність енергозберігаючого режиму, так як максимум економії досягається при максимальній швидкості і мінімумі моменту навантаження.

Можливість зниження напруги на статорі при зниженні навантаження на двигуні є також і в системі ТПН - АД.

### 1.3 Електропривод з тиристорним регулятором напруги

Поряд з перетворювачами частоти в регульованому асинхронному електроприводі іноді використовується тиристорний регулятор напруги (ТРН) (рис. 1.4). Він змінює амплітуду напруги, що підводиться до статора без зміни частоти, і використовується головним чином для управління пуском (м'які пускачі) і здійснення ряду інших корисних функцій.

Принцип дії тиристорного регулятора напруги розглянемо на прикладі регулювання напруги на однофазному навантаженні змінного струму зН за допомогою однофазного ТРН. Силова частина ТРН (рис. 1.4, а) утворена двома тиристорами  $VS1$  і  $VS2$ , включеними в ланцюг навантаження за зустрічно-паралельною схемою, яка забезпечує протікання струму в навантаженні в обидва напівперіодах напруги мережі  $U1$ . Управління тиристорами здійснюється за допомогою системи імпульсно-фазового управління (СІФУ), яка подає на тиристори імпульси управління  $U\alpha$  і забезпечує їх зсув на кут управління  $\alpha$  відповідно до величини зовнішнього сигналу управління  $Uy$ .

Якщо на тиристори  $VS1$  і  $VS2$  не подаються імпульси управління від СІФУ, то вони закриті і напруга на навантаженні  $U_{рег}$  дорівнює нулю. При подачі на тиристори імпульсів управління в момент їх природного відкриття (кут управління  $\alpha = 0$ ) вони повністю відкриваються (рис. 1.4, б) і до навантаження буде докладено напругу мережі  $U1 = U_{рег}$  за вирахуванням невеликого (1 ... 3 В) падіння напруги на тиристорах.

Якщо здійснювати подачу імпульсів управління на тиристори з деякою затримкою щодо моменту їх природного відкриття (кут управління  $\alpha \neq 0$ ), то до навантаження буде прикладатися частина напруги мережі (рис. 1.4, б). Змінюючи кут управління  $\alpha$  від нуля до  $\pi$ , можна регулювати напругу на навантаженні від повної напруги мережі до нуля при незмінній частоті цієї напруги.

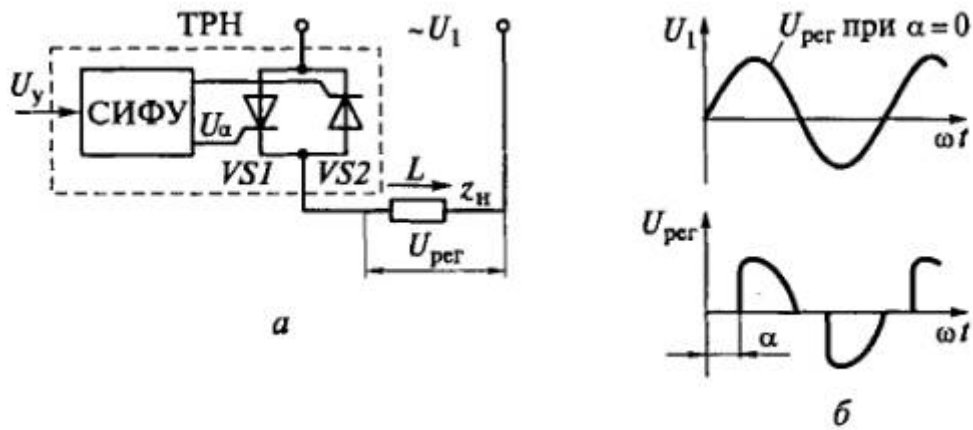


Рисунок 1.4 - Схема (а) і криві напруги (б) однофазного тиристорного регулятора напруги

При активному навантаженні ТРН крива струму  $I$  в навантаженні буде повторювати криву напруги на ній, а при активно-індуктивному характері навантаження буде від неї відрізнятися. Форма напруги на навантаженні є несинусоїдною. Несинусоїдальну напругу можна подати як сукупність кількох синусоїдальних напруг (гармонік). Частота зміни першої з них (основної гармоніки) дорівнює частоті напруги живлення, а частоти інших гармонік більше, ніж першої. Зазвичай 1-а гармоніка має найбільшу амплітуду і по ній ведуться всі основні розрахунки.

Закриття тиристорів в непродуктивний півперіод відбувається за рахунок напруги мережі (так звана природна комутація тиристорів), що дозволяє використовувати в схемах ТРН найбільш прості, надійні і дешеві одноопераційні тиристири.

На основі однофазної схеми (див. рис. 1.4, а) побудовані ТРН для регулювання напруги на трифазному навантаженні (рис. 1.5, а). Приклад силової частини схеми для регулювання напруги на статорі трифазного асинхронного двигуна АД, що складається з шести тиристорів  $VS1 \dots VS6$ , наведено на рис. 1.5, б. За рахунок додавання в цю схему двох пар тиристорів створюються реверсивні схеми електроприводу, а за допомогою відповідного управління ТРН можуть забезпечувати і динамічне гальмування двигунів.

У схемах ТРН замість однієї пари зустрічно-паралельно включених тиристорів може застосовуватися напівпровідниковий прилад - симистор, що забезпечує протікання струму в навантаженні в обидва півперіоди напруги живлення і має такий же принцип дії, що і тиристор. Його застосування скорочує число електронних приладів вдвічі і спрощує схему СІФУ, хоча він і менш надійний в роботі.

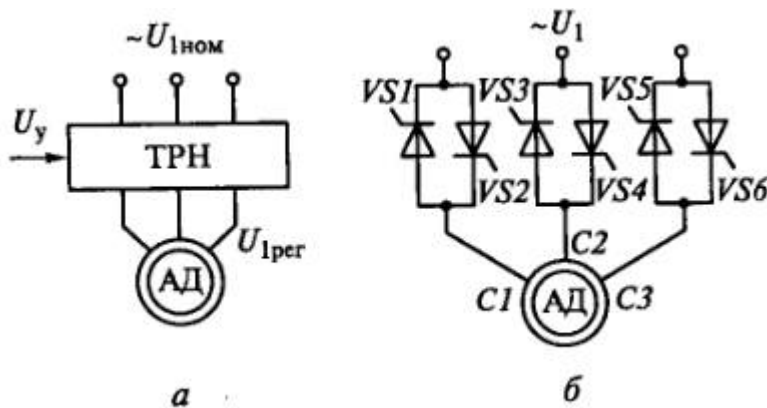


Рисунок 1.5 - Схеми включення тиристорного регулятора напруги на трифазне навантаження:  
а - загальна; б - силовий частини

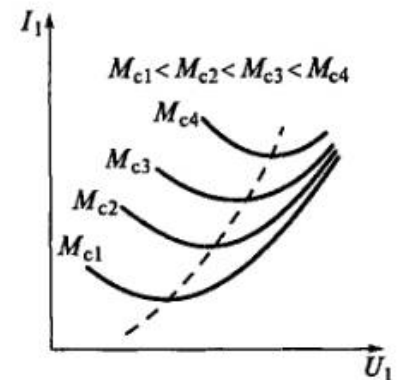


Рисунок 1.6 - U-подібні характеристики асинхронного двигуна

Тиристорні регулятори напруги знаходять широке застосування в електроприводах змінного струму, де за рахунок регулювання напруги на статорі асинхронних двигунів забезпечуються регулювання струмів і моментів двигунів в перехідних режимах, симетрування струмів в фазах, ряд захистів двигуна і деякі інші опції. Одна з них пов'язана з підвищенням енергетичних показників роботи асинхронних електроприводів при малих навантаженнях. Тиристорні регулятори напруги, які виконують цю функцію, отримали назву регуляторів економічності, або економайзерів.

Можливість енергозбереження цим способом ілюструють залежності струму статора  $I_1$  від прикладеної до двигуна напруги  $U_1$  (рис. 1.6) при різних моментах навантаження  $M_c \mid < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$ . Ці залежності іноді називають U-подібними характеристиками двигуна. Як видно з графіків, при кожному

навантаженні двигуна є така напруга, при якій струм мінімальний. Зниження струму відбувається за рахунок зменшення його реактивної складової. За рахунок цього забезпечуються зниження втрат енергії в двигуні, підвищення його ККД і коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$ .

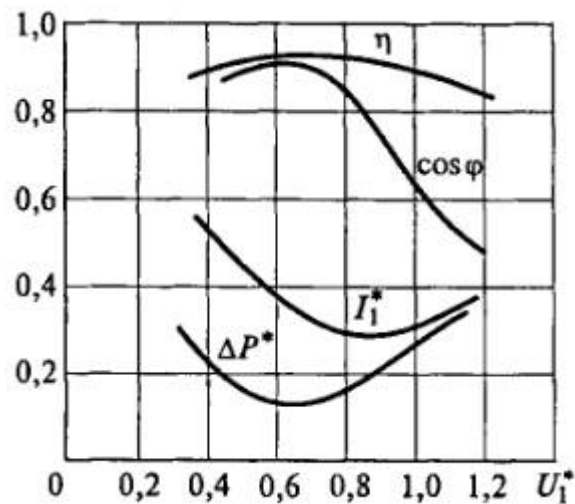


Рисунок 1.7 - Залежності струму статора, втрат потужності, ККД і коефіцієнта потужності від напруги

На рис. 1.7 показані побудовані для двигуна 4A180M4 потужністю 30 кВт залежності ККД п.,  $\cos\varphi$ , відносних струму статора  $I_1^*$  і втрат потужності в двигуні  $\Delta P^*$  від відносної напруги  $U_1^*$  при моменті навантаження  $M_c$ , рівному 20% від номінального. З кривих видно, що найкращих значень ці показники сягають при напругах, рівних 0,6 ... 0,8 номінального значення.

Досягнення екстремальних значень зазначених змінних може бути забезпечено за допомогою двох можливих схем включення асинхронного двигуна.

На рис. 1.8 приведена одна з них - схема з так званим екстремальним регулятором, що дозволяє мінімізувати споживання двигуном струм при різних навантаженнях  $M_c$ . Схема містить асинхронний двигун АД, ТРН зі схемою управління СУ, датчики струму ДТ і напруги ДН, функціональний перетворювач ФП і інерційну ланку ІЗ. За рахунок вибору характеристики ФП забезпечується мінімізація споживання струму при різних навантаженнях

двигуна, а інерційну ланку ІЗ спільно з негативним зворотним зв'язком по напрузі усуває можливі автоколивання в системі.

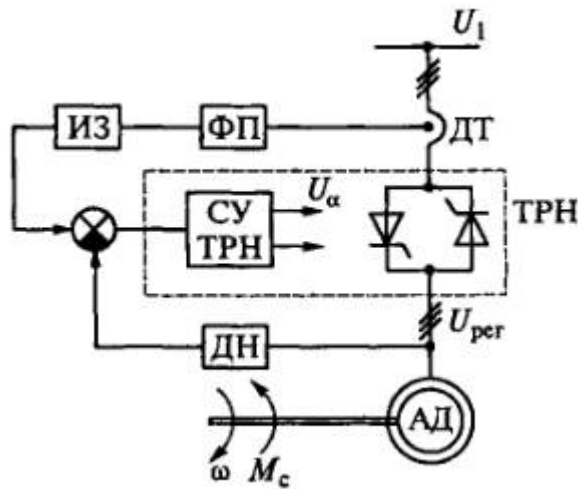


Рисунок 1.8 - Структурна схема електроприводу з екстремальним регулятором

Показано, що екстремальні значення змінних двигуна забезпечуються при певних (оптимальних) його ковзаннях, які повинні підтримуватися постійними при будь-яких навантаженнях. Ці ковзання  $s_{\text{опт}}$  визначаються за формулами:

- при мінімізації струму статора –

$$s_{\text{опт}} = R'_2 / X_\mu; \quad (1.3)$$

- при мінімізації втрат потужності –

$$s_{\text{опт}} = (R'_2 \sqrt{(X_\mu^2 / R_\mu + R_1) / (R'_2 + R_1)}) / X_{\text{к.з}}; \quad (1.4)$$

- при мінімізації активної споживаної потужності –

$$s_{\text{опт}} = R'_2 \sqrt{1 + X_\mu^2 / (R_\mu R_1)} / X_\mu; \quad (1.5)$$

- при максимізації коефіцієнта потужності –

$$s_{\text{опт}} = R'_2 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\mu X_{\text{к.з}}}) / (X_\mu X_{\text{к.з}}), \quad (1.6)$$

де  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_\mu$  - відповідно активні опори статора, наведене ротора і контуру намагнічування;  $X_\mu$ ,  $X_{к.з.}$  - відповідно індуктивні опору контуру намагнічування і короткого замикання.

Значення струму статора при оптимальному ковзанні може бути обчислено за такою формулою:

$$I_{1 \min} = \sqrt{2M_c \omega_0 / 3X_\mu}, \quad (1.7)$$

де  $M_c$  - момент навантаження двигуна;  $\omega_0$  - швидкість холостого ходу.

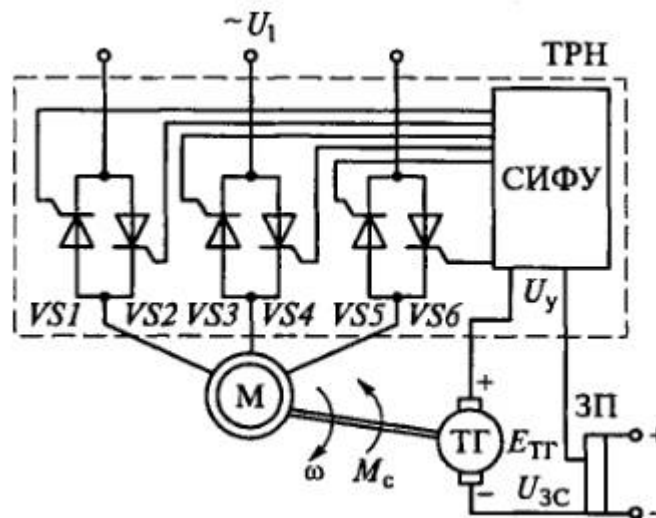


Рисунок 1.9 - Схема замкнутої системи ТРН - АД зі зворотним зв'язком за швидкістю

Необхідний рівень оптимального ковзання може бути реалізований в замкнутій за швидкістю системі ТРН-АД, схема якої приведена на рис. 1.9. На схемі позначено: ТГ - тахогенератор, ЗП - потенціометр завдання необхідної швидкості (ковзання) двигуна. Схема забезпечує підтримку швидкості зі і тим самим ковзання з певною точністю при змінах моменту навантаження  $M_c$ .

Як приклад проведені розрахунки по цим формулам стосовно до двигуна 4A200L6Y3, має наступні номінальні дані:  $P_{ном} = 30$  кВт; ковзання  $s_{ном} = 0,021$ ; ток статора  $I_{1ном} = 55,8$  А; ККД  $\eta_{ном} = 90,5\%$ ;  $\cos\phi_{ном} = 0,9$ . Результати розрахунків при моменті навантаження 29 Н м, що дорівнює 10% номінального моменту, наведені в табл. 1.3.



Таблиця 1.2 - Дані по оптимізації енергетичних параметрів

Спосіб оптимізації	$s_{opt}$	$\Delta P$ , кВт	$I_1$ , А	$P_1$ , кВт	$\cos\varphi$
Мінімум втрат потужності $\Delta P$	0,012	0,219	13,1	3,22	0,835
Мінімум струму статора $I_1$	0,006	0,271	11,8	3,29	0,678
Мінімум активної потужності $P_1$	0,014	0,223	13,9	3,21	0,858
Максимум $\cos\varphi$	0,024	0,278	17,2	3,24	0,881
Без оптимізації при $U = U_{ном} = const$	0,002	0,649	15,1	3,68	0,319

Результати розрахунків показують, що за рахунок регулювання напруги можливо приблизно в 2,5 -3 рази зменшити втрати потужності і підвищити  $\cos\varphi$ .

До появи доступних перетворювачів частоти в нашій країні робилися спроби використовувати ТРН для регулювання швидкості асинхронних двигунів насосів, що працюють в тривалому режимі.

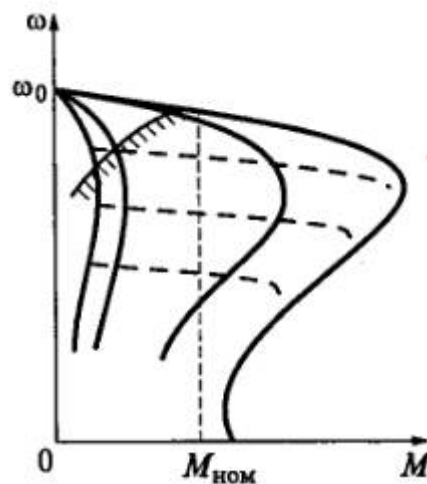


Рисунок 1.10 - Механічні характеристики асинхронного двигуна при регулюванні напруги на статорі

Теоретично таке регулювання, зване параметричним, можливо, оскільки механічні характеристики в розімкнутій системі мають вигляд, показаний на рис. 1.10 суцільними лініями, а при використанні негативного зворотного зв'язку по швидкості (див. рис. 1.9) - штриховими. Однак таке рішення пов'язане з технічним обмеженням, яке здійснює його практично недоцільним.

Втрати в роторному ланцюзі в номінальному режимі, які можна вважати допустимими, складають

$$\Delta P_{2\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}}; \quad (1.8)$$

втрати при регулюванні швидкості складають

$$\Delta P_{2\text{рег}} = M_{\text{доп}} \omega_0 s_{\text{рег}}. \quad (1.9)$$

прирівнявши  $\Delta P_{2\text{рег}} = \Delta P_{2\text{ном}}$ , отримаємо:

$$M_{\text{доп}} = M_{\text{ном}} s_{\text{ном}} / s_{\text{рег}}. \quad (1.8)$$

З формули (1.9) випливає, що допустиме навантаження різко падає зі зменшенням швидкості. При  $s_{\text{ном}} = 0,03$  зниження швидкості всього на 15% ( $s_{\text{рег}} \approx 0,15$ ) вимагає зниження моменту в 5 разів (рис. 1.10, лінія із зарубками).

У зв'язку з викладеним обмеженням використання ТРН в тривалому режимі навіть при сприятливій «вентиляторної» характеристиці навантаження ( $M_c \sim \omega^2$ ) робить необхідним завищення потужності двигуна в 2,5 - 3 рази (збільшення  $M_{\text{ном}}$ ), використання ротора з підвищеним опором ( $s'_{\text{ном}} > s_{\text{ном}}$ ), застосування спеціальних засобів (вентилятор – «наїзник») для видування теплових втрат з двигуна. Це робить зовні привабливий спосіб регулювання швидкості неконкурентоспроможним.

#### 1.4 Системи електроприводів «Тиристорний перетворювач напруги - асинхронний двигун»

Найбільш поширена силова структура ТПН-АД, схема якої приведена на рис. 1.3, складається з шести тиристорів, включених попарно зустрічно-паралельно в статорні ланцюга трифазного асинхронного двигуна. Такий перетворювач призначений для регулювання 1-й, або основний, гармоніки живить двигун напруги зміною кута відкриття тиристорів  $\alpha$  в діапазоні від  $\alpha = \varphi$  до  $\alpha = 180^\circ$ . В цьому випадку діюча фазна напруга першої гармоніки змінюється від  $U_1 = U_{1ном}$  (де  $U_{1ном}$  - діюча фазна номінальна напруга мережі живлення;  $\varphi$  - кут відставання струму від напруги при синусоїдальному живленні) до  $U_1 = 0$  [6]. Частота змінної напруги основної гармоніки залишається незмінною і дорівнює частоті мережі, тобто  $f_1 = f_{1ном}$ . При такому управлінні синхронна швидкість асинхронного двигуна і критичне ковзання не змінюються, але регулюється момент двигуна  $M = f(U_1^2)$ .

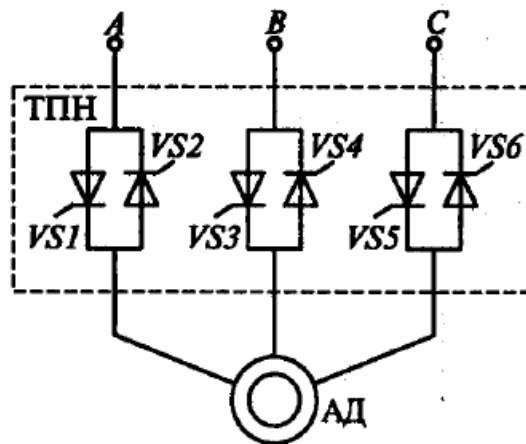


Рисунок 1.11 - Схема силової структури системи ТПН-АД

Відзначимо, що робота асинхронного двигуна на регульовальних характеристиках при:  $U_1 < U_{1ном}$  відбувається в режимі переривчастого струму. В цьому випадку в спектрі несинусоїдального періодичного струму при з'єднанні обмоток статора зіркою без нульового проводу в періодичному несинусоїдному струмі крім основної гармоніки присутні непарні гармоніки: 5-а,

7-а, 11-а, 13-я і т.д. При такому способі управління здійснюється дискретний вплив на асинхронний двигун і протягом періоду напруги живлення 0,02 с при  $f_1 = 50$  Гц відбувається чергування схем підключення статорних ланцюгів двигуна до трифазної мережі в наступній послідовності: трифазне підключення, двофазне підключення різних фаз, відключення всіх фаз двигуна. У зв'язку з цим навіть в сталому режимі спостерігаються пульсації моменту двигуна з частотою 300 Гц (схема ТПН на рис. 1.3 має пульсність  $p = 6$ ) і, якщо бути точним, статичний режим являє собою квазістатичний, або сталий динамічний, режим. Однак, як показано в [6], пульсуюча складова моменту практично не впливає на коливання швидкості і динаміку електроприводу і досить враховувати тільки гладку складову моменту, створювану основною гармонікою, тобто середній момент двигуна на розрахунковому інтервалі  $M_{ср}$ , який дорівнює  $M_c$ . Вищі гармоніки збільшують втрати в асинхронному двигуні, зростання яких оцінюється введенням в розрахункові формули втрат коефіцієнтів  $k_{п1}$  і  $k_{п2}$ . Для точного аналізу усталених режимів не можна користуватися однофазною схемою заміщення асинхронного двигуна для визначення значення 1-й гармоніки, питомої ваги вищих гармонік і коефіцієнта потужності асинхронного електроприводу. Розрахунок зазначених та інших показників може бути точно виконаний при використанні диференціальних рівнянь асинхронної машини (1.3) з урахуванням алгоритму перемикання тиристорів при  $\omega = \text{const}$  і  $a = \text{const}$ . При регулюванні  $U_1$  за рахунок ТПН втрати в елементах асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при роботі в сталому режимі визначаються наступним чином [6]:  $f_{1ном}$

$$\begin{aligned} \Delta P_{1м} &= k_{п1}^2 \Delta P_{1м.ном} M_{с*} \left[ A \frac{S_{ном}}{S} + (1 - A) \frac{S}{S_{ном}} \right]; \\ \Delta P_{2м} &= k_{п2}^2 \Delta P_{2м.ном} M_{с*} \frac{S}{S_{ном}}; \\ \Delta P_{1с} &= \Delta P_{1с.ном} M_{с*} \left[ B \frac{S_{ном}}{S} + (1 - B) \frac{S}{S_{ном}} \right]. \end{aligned}$$

(1.11)

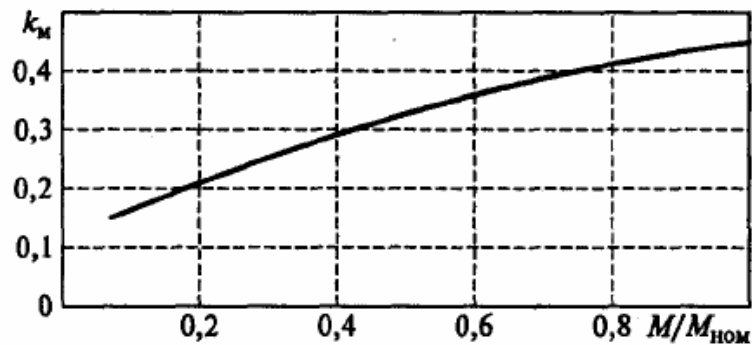


Рисунок 1.12 - Залежність  $k_m = f(M)$  для двигуна МТ012-6 з закороченому ротором при  $\omega = 0,6\omega_{ном}$

У формулах (1.11) замість швидкості використовується ковзання двигуна, що більш доцільно.  $S = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ .

Значення  $k_m$  може бути точно розраховане тільки із застосуванням ЕОМ при використанні математичного опису асинхронної машини по рівняннях (1.3) і (1.4) з урахуванням алгоритму перемикання тиристорів. На рис. 1.14 приведена залежність  $k_m = f(M)$  для двигуна МТ012-6 з закороченому ротором при відносній швидкості. При розглянутому способі управління робота асинхронного двигуна на регульовальних характеристиках при зменшенні розвивається моменту (зростанні кута  $\alpha$ ) пов'язана зі значним зниженням коефіцієнта потужності, так як з ростом  $\alpha$  збільшується фазовий зсув 1-й гармоніки струму  $\varphi_1$  і зменшується, що входить в формулу (2.5), але зростає питома вага вищих гармонік струму, що призводить до зниження  $k_m$ . Цей факт і показаний на рис. 1.14. При  $\omega = 0,6\omega_{ном}$  в діапазоні зміни моменту від 0 до  $M_{ном}$  асинхронний двигун працює в зоні переривчастих струмів. При визначенні ККД електроприводу в системах ТПН-АД можна не враховувати механічні та додаткові втрати і втрати в сталі ротора через їхню малість у порівнянні з іншими складовими втрат. Тоді формула для визначення ККД набуває такого вигляду:  $\omega = 0,6\omega_{ном} \cos \varphi_1$   $\omega = 0,6\omega_{ном}$

$$\eta = \frac{M_c \omega}{M_c \omega + \Delta P_{1M} + \Delta P_{2M} + \Delta P_{1c}} \quad (1.12)$$

При розрахунку  $\eta$  за формулою (2.20) з використанням рівнянь (2.19) необхідно підставити в (2.19) значення  $S$ , відповідні обраної швидкості.

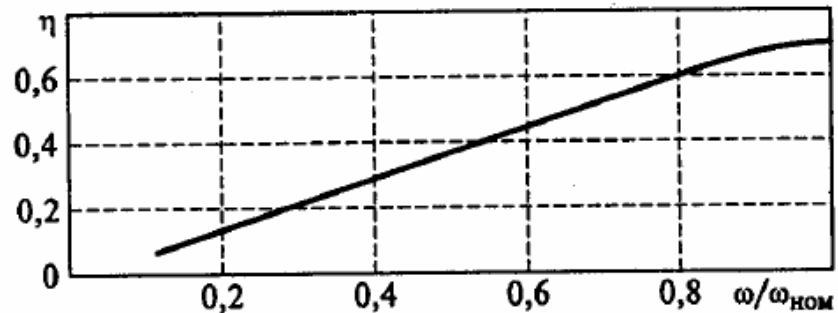


Рисунок 1.13 - Залежність ККД від швидкості двигуна при управлінні від ТПН для двигуна МТФ111-6 з закороченому ротором

На рис. 1.16 приведена залежність ККД від швидкості двигуна при управлінні від ТПН для МТФ111-6 з закороченому ротором. При розрахунку залежності прийнято, що  $\kappa_{n1} = \kappa_{n2} = \kappa_n = 1,1$ ;  $A = 0,861$ ;  $B = 0,97$ .

Енергія втрат в сталих режимах може бути визначена з використанням формул (2.19) шляхом множення потужності втрат  $\Delta P_{1M}$ ,  $\Delta P_{2M}$ ,  $\Delta P_{1c}$  (при обраній швидкості  $\omega$  і відповідному їй ковзанні  $S$ ) на час роботи з усталеною швидкістю  $t_u$ .

Особливістю використання асинхронних короткозамкнених двигунів в системах ТПН-АД є те, що відносні втрати в роторі перевищують відносні втрати в інших елементах машини [6]. Тому встановлена потужність асинхронного двигуна ( $P_{ном}$ ) повинна бути обрана таким чином, щоб у всьому діапазоні регульованих (знижених) швидкостей потужність втрат в роторі  $\Delta P_{2M}$  була менше номінальної потужності втрат  $\Delta P_{2M.ном}$ . Тоді для забезпечення нормального теплового режиму двигуна необхідно, щоб виконувалося така умова:

$$\Delta P_{2M} \leq \Delta P_{2M, \text{НОМ}}, \quad (1.13)$$

з якої випливає, що допустимий по нагріванню відносний момент двигуна  $M_{\text{доп}^*} = M_{\text{доп}}/M_{\text{НОМ}}$

при тривалому режимі роботи повинен бути:

$$M_{\text{доп}^*} = M_{\text{доп}}/M_{\text{НОМ}} \leq S_{\text{НОМ}}/k_{п2}^2 S. \quad (1.14)$$

Для ілюстрації ступеня зниження  $M_{\text{доп}^*}$  при регулюванні швидкості (ковзання) в табл. 1.1 наведені значення  $M_{\text{доп}^*}$  при зміні швидкості двигуна від  $\omega_{\text{НОМ}}$  до 0 (ковзання від  $S_{\text{НОМ}}$  до 1). При розрахунках прийнято значення  $k_{п2}^2 = 1,1$ ;  $S_{\text{НОМ}} = 0,04$ .

З рівняння (2.22) і табл. 1.1 випливає, що тривале регулювання швидкості асинхронного електроприводу в системі ТПН- АД при  $M_c = \text{const}$  практично неможливо, так як зі зростанням ковзання (при зниженні швидкості) в порівнянні з номінальними багаторазово зростають втрати в статорі і в роторі. В цьому випадку для забезпечення роботи короткозамкненого асинхронного двигуна без перегріву необхідно збільшення в кілька разів, а іноді і на порядок, номінальної потужності двигуна в порівнянні з максимальною потужністю статичного навантаження [6]. З урахуванням погіршення тепловіддачі самовентильованих електроприводів при зниженні швидкості залежність буде ще менш сприятливою.  $M_{\text{доп}^*} = f(S)$

Таблиця 1.3 - Залежність відносного моменту  $M_{\text{доп}^*}$  от  $\omega/\omega_{\text{НОМ}}$  и  $S$

$\omega/\omega_{\text{НОМ}}$	1	0,937	0,833	0,625	0,416	0,208	0
$S$	0,04	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$M_{\text{доп}^*}$	1	0,36	0,182	0,091	0,06	0,045	0,036

Залежності  $k_m = f(M)$  і  $\eta = f(\omega)$  (Див. рис. 1.14, 1.16) також підтверджують низьку енергетичну ефективність регульованих електроприводів по системі ТПН-АД, робота яких пов'язана з підвищеною

витратою електроенергії і низьким ККД. Однак існує ряд виробничих завдань, для вирішення яких за технологічними вимогами доцільно застосування систем ТПН-АД. У цих випадках їх використання дозволяє одночасно знижувати споживання електроенергії, виконуючи функцію енергозбереження [6]. Варіанти доцільного застосування систем ТПН-АД для управління асинхронним електроприводом з метою енергозбереження будуть розглянуті в гл. 3. Точний розрахунок пускотормозних режимів і визначення втрат енергії перехідних процесах в системах ТПН-АД не можна виконувати по статичним залежностям, так як електромагнітні перехідні процеси вносять істотні корективи в динамічні характеристики асинхронних електроприводів і впливають на енергоспоживання. Однак при використанні замкнутих по швидкості САУ, коли забезпечується рівномірно прискорений рух при розгоні електроприводу і двигун працює при, що послаблює вплив електромагнітних перехідних процесів, можна для попередніх розрахунків і порівняльного аналізу з іншими типами регульованих електроприводів визначати втрати енергії з використанням формул (2.19) для розрахунку потужності втрат в окремих елементах машини. У цьому випадку, з огляду на формули (2.15) і (2.16),  $U_1 < U_{1ном} \omega = 0 \partial \omega = \omega_y$ ,

$$\begin{aligned} \Delta W_{1м} &= \frac{k_{п1}^2 \Delta P_{1м.ном} M_* \omega_0}{\epsilon} \left[ \frac{1-A}{2S_{ном}} (1-S_y^2) - AS_{ном} \ln S_y \right]; \\ \Delta W_{2м} &= \frac{k_{п2}^2 \Delta P_{2м.ном} M_* \omega_0}{\epsilon} (1-S_y^2); \\ \Delta W_{1с} &= \frac{\Delta P_{1с.ном} M_* \omega_0}{\epsilon} \left[ \frac{1-B}{2S_{ном}} (1-S_y^2) - BS_{ном} \ln S_y \right], \end{aligned} \quad (1.15)$$

де  $S_y = \frac{\omega_0 - \omega_y}{\omega_0}$ ;  $M_*$  - відносне значення моменту двигуна в перехідному режимі,  $M_* =$  (як було сказано вище, приймається, що значення  $M_* = \text{const}$ ).  $M/M_{ном}$



Значення  $M$  залежить від необхідного динамічного моменту  $M_{\text{дин}}$ , виду моменту статичного навантаження (активний або реактивний) і визначається з тих же міркувань, які викладені в підрозділ. 2.2. Загальні втрати енергії в двигуні в перехідному режимі, що реалізується в системі ТПН-АД, визначаються як сума складових втрат, обчислених за формулами (1.15):

$$\Delta W_{\text{п.п}} = \Delta W_{1\text{м}} + \Delta W_{2\text{м}} + \Delta W_{1\text{с}} \quad (1.16)$$

Уточнений розрахунок перехідних процесів і динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна особливо в розімкнутих системах повинен здійснюватися з використанням системи диференціальних рівнянь асинхронної машини при змінному швидкості обертання, алгоритму перемикання тиристорів ТПН і часового закону зміни кута відкриття вентилів. Математичні моделі систем ТПН-АД досить повно відпрацьовані із застосуванням аналогових пристроїв [12, 13] і на основі ЦВМ з використанням методів чисельного рішення нелінійних диференціальних рівнянь [14, 15]. Такі моделі, зокрема з цифровим імітаційним моделюванням, будуть використані при аналізі можливостей спрямованого формування пускогадмівних режимів для отримання бажаних динамічних характеристик, при дослідженні прямого пуску - при підключенні асинхронного двигуна до номінальної напруги мережі,  $\alpha = f(t)$  порівняно з прямим пуском, зокрема при часовому законі формування  $U_1$  в перехідних процесах.

1.5 Оптимізація втрат і ККД в системах ТПН - АД при змінненні параметрів усталеного режиму

Електроприводи більшості виробничих механізмів мають завищену потужність, що перевищує в 2 -3 рази необхідну. Крім того, електроприводи деяких механізмів (пресів, ковальського обладнання, верстатів, металургійних агрегатів і ін.) По технологічних особливостях частину часу працюють з недовантаженням.

Зазначені особливості дозволяють знизити енергоспоживання недовантажених АД при роботі в зоні номінальної швидкості [7, 8, 9, 10], забезпечивши його роботу за рахунок ТПН на регульовальній  $U_1 < U_{1ном}$ , а не на природній, характеристиці (де  $U_1$  - діюче значення 1-й гармоніки напруги, прикладеного до двигуна;  $U_{1ном}$  - діюче значення номінальної напруги мережі). Цей режим ілюструє рис. 1.17, де показані природна (7) і регульовальна (2) характеристики АД при управлінні від ТПН;  $M_{ном}$  - номінальний момент двигуна;  $M_c$  - момент статичного навантаження;  $S_1, S_2$  - ковзання на природній і регульовальній характеристиці при заданому  $M_c$ .

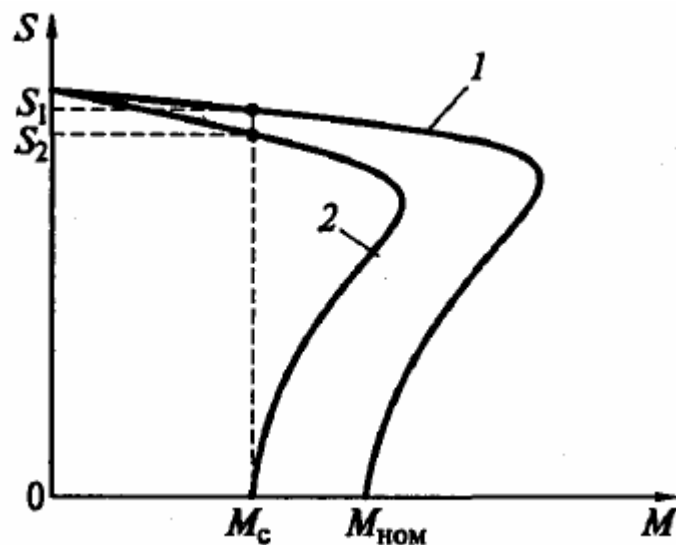


Рисунок 1.14 - Природна (1) і регульовальна (2) характеристики АД

Електромагнітні втрати в двигуні розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{1м} + \Delta P_{2м} + \Delta P_{1с}. \quad (1.17)$$

Значення  $\Delta P_{1м}$ , і  $\Delta P_{2м}$ ,  $\Delta P_{1с}$  при роботі на регульовальній характеристиці в системі ТПН-АД визначаються за допомогою формули (2.10) при підстановці відносного значення статичного моменту. При роботі АД на природній характеристиці [8] вирази для визначення складових втрат набувають такий вигляд:  $M_{с*} = M_c / M_{ном}$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{1м} &= [A + (1 - A)M_{c*}^2] \Delta P_{1м.ном}; \\
\Delta P_{2м} &= M_{c*}^2 \Delta P_{2м.ном}; \\
\Delta P_{1с} &= [B + (1 - B)M_{c*}^2] \Delta P_{1с.ном}.
\end{aligned}
\tag{1.18}$$

Як впливає з (1.18), при роботі АД на природній характеристиці при зміні  $S$  від 0 до  $S = S_{ном}$  втрати  $\Delta P_{эм}$  залежать тільки від статичного моменту. При роботі на регульовальній характеристиці  $U_1 < U_{1ном}$   $\Delta P_{эм} = f(M_{c*}, S)$ , як впливає з (2.10), що дозволяє визначити значення  $S_{опт}$ , що доставляє мінімум функції  $\Delta P_{эм} = f(M_{c*}, S)$ . Хоча в вирази для складових (2.10) входять коефіцієнти  $k_{n1}$  и  $k_{n2}$  пов'язані нелінійною залежністю з  $S$  і, діапазон їх зміни для структури ТПН, що складається з трьох пар тиристорів, включених зустрічно-паралельно, незначний [6], що дозволяє при визначенні  $S_{опт}$  прийняти їх постійними і рівними один одному  $k_{n1} = k_{n2} = k_n$ . Тоді

$$S_{опт} = S_{ном} \sqrt{\frac{Ak_{п}^2 \Delta P_{1м.ном} + B \Delta P_{1с.ном}}{(1 - A)k_{п}^2 \Delta P_{1м.ном} + k_{п}^2 \Delta P_{2м.ном} + (1 - B) \Delta P_{1с.ном}}}.
\tag{1.19}$$

Розрахунки показують, що змінення  $k_n^2$  в діапазоні 1 ... 1,2 не робить істотного впливу на значення  $S_{опт}$ . Як впливає з формули (3.3), значення  $S_{опт}$  не залежить від, що дозволяє задавати АД і підтримувати відповідну  $S_{опт}$  швидкість при змінному моменті навантаження  $M_{c*}$ .

Очевидно, оптимізація енергоспоживання найбільш просто реалізується при наявності в системі датчика швидкості і створенні з використанням силової структури ТПН-АД системи автоматичного регулювання швидкості. Схема САР швидкості системи ТПН-АД показана на рис. 1.18. В цьому випадку задана швидкість  $\omega_3 = \omega_0(1 - S_{онм})$ , тобто електропривод буде працювати в процесі регулювання швидкості при  $S_{опт}$ , значення якого не буде змінюватися, якщо в системі управління використовується дворазово інтегруюча САР швидкості. Для різних типів асинхронних двигунів  $S_{опт} = (0,5 \dots 0,9) S_{ном}$  і визначається в основному коефіцієнтом  $A$ , тобто значенням струму холостого ходу, тому значення  $S_{опт}$ , що наближаються до  $S_{ном}$ , мають двигуни краново-

металургійних серій, що відрізняються підвищеним повітряним зазором і струмом. Двигун може працювати з оптимальним ковзанням, якщо  $M_{c*} = S_{opt}/S_{ном}$ . В цьому випадку дещо знижується швидкість в порівнянні з роботою на природній характеристиці, зменшуються втрати в міді і сталі статора і зростають втрати в міді ротора, однак їх перерозподіл таке, що електромагнітні втрати при  $S_{opt}$  менше, ніж при  $S_1$ . Різниця у втратах  $\Delta P_{эм}$  тим більше, чим менше  $M_{c*}$  в порівнянні з відношенням  $S_{opt}/S_{ном}$  і більше  $A \approx (\frac{I_0}{I_{1ном}})^2$ , тому найбільше зниження втрат при роботі в зоні максимальної швидкості може бути забезпечено у двигунів краново-металургійних серій, що мають більше значення моменту  $M_{c*}$  при якому може бути досягнуто зниження енергоспоживання, і збільшене значення  $A$  в порівнянні з двигунами єдиних серій. Так, при роботі в сталому режимі з  $M_{c*} = 0,05$  значення  $\Delta P_{эм}$  для двигунів краново-металургійних серій може бути знижено в 5 -8 раз, а для двигунів єдиної серії - в 3 -6 раз. Електромагнітний ККД двигуна

$$\eta_{эм} = \frac{P_{мех}}{P_{мех} + \Delta P_{эм}}, \quad (1.20)$$

де  $P_{мех} = M_c \omega_y$  - механічна потужність на валу АД;  $\omega_y$  - стала швидкість, відповідна роботі з ковзанням.  $S_1, S_{opt}, S_{ном}$

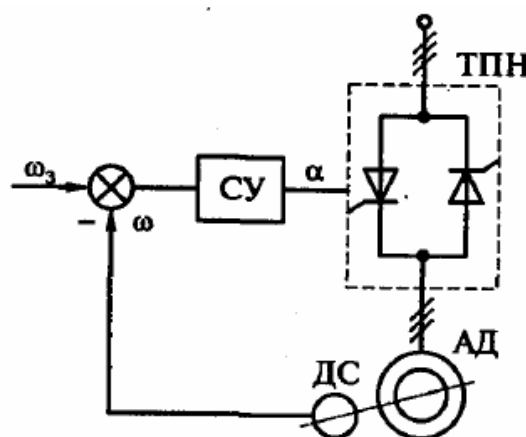


Рисунок 1.15 - Схема САР швидкості системи ТПН-АД

ДС - датчик швидкості; СУ - система управління;  $\alpha$  - кут відкриття вентилів;  $\omega_3, \omega$  - відповідно задана, реальна швидкість АД

Значення ККД може зрости відповідно в 2 – 3 або 1,5 – 2 рази. Для підтвердження цих висновків в табл. 1.2. наведені окремі складові втрат, електромагнітні втрати  $\eta_{эм}$  і двигунів різних типів при максимальній сталої швидкості з різними значеннями  $\omega_y$  і відповідними цієї швидкості ковзаннями  $S_y$ . Крім розгляду випадків, коли  $S_y = S_1$  і  $S_y = S_{опт}$  визначені втрати і для випадку, коли двигун працює на регульовальних характеристиках при  $S_y = S_{ном}$ .

Таблиця 1.4. Залежність втрат і ККД АД від ustalених режимів від ковзання

Тип и характе- ристики двигателя	$S_y$	Параметр									
		$\Delta P_{1м}$	$\Delta P_{2м}$	$\Delta P_{1с}$	$\Delta P_{эм}$	$\eta_{эм}$	$\Delta P_{1м}$	$\Delta P_{2м}$	$\Delta P_{1с}$	$\Delta P_{эм}$	$\eta_{эм}$
		$M_{св} = 0,5 M_{ном}$					$M_{св} = 0,05 M_{ном}$				
МТКФ012-6: $P_{ном} = 2,2$ кВт; $S_{ном} = 0,12$ ; $S_{опт} = 0,105$	$S_1$	376	75	128	579	0,669	313	7	128	448	0,217
	$S_{опт}$	294	134	73	501	0,690	39	17	7	63	0,64
	$S_{ном}$	290	154	65	509	0,680	38	20	6	64	0,630
4А100L6У3: $P_{ном} = 2,2$ кВт; $S_{ном} = 0,05$ ; $S_{опт} = 0,032$	$S_1$	129	30	75	234	0,828	74	3	74	151	0,433
	$S_{опт}$	128	42	59	229	0,830	17	5	6	28	0,800
	$S_{ном}$	152	61	39	252	0,813	19	7	4	30	0,750

Значення втрат  $\Delta P_{1м}$  і  $\Delta P_{2м}$ , наведені в табл. 1.2, обчислені для  $S_{опт}$  і  $S_{ном}$  з  $k_{n1}$  і  $k_{n2}$  з урахуванням коефіцієнтів, що залежать при заданій швидкості від відносини моментів двигуна на природній і регульовальній характеристиках [6]. Як видно з табл. 1.5 для двигунів краново-металургійних серій, коли  $S_{опт} \approx S_{ном}$ , значення втрат і ККД при  $S_{опт}$  і  $S_{ном}$  досить близькі, що дозволяє в ряді випадків здійснювати режими з мінімізацією втрат в машині, задаючи і підтримуючи в САР швидкості  $\omega_3 = \omega_{ном}$  ( $S_y = S_{ном}$ ). Кількість зекономленої електроенергії в даному випадку залежить від типу АД, його потужності, часу роботи на швидкості  $\omega_y$  і моменту статичного навантаження.

Так, якщо асинхронний двигун МТКФ012-6, що має  $P_{ном} = 2,2 \text{ кВт}$ , забезпечує, працюючи в повторно-короткочасному режимі, 60 включень на годину при роботі на сталій швидкості  $\omega_y$  протягом  $t_y = 30 \text{ с}$  і працює протягом року 8000 год ( $\Gamma = 8000 \text{ год}$ ), то при роботі на регульовальній характеристиці з ковзанням  $S_2 = S_{ном}$  вдасться заощадити за рік 280 кВт-год електроенергії при  $M_c = 0,5M_{ном}$ ; 880 кВт-год при  $M_c = 0,25M_{ном}$ ; 1530 кВт-год при  $M_c = 0,05M_{ном}$  в порівнянні з роботою АД на природній характеристиці при  $s_1$ . Зниження втрат може бути також забезпечено при роботі нерегульованого приводу в тривалому режимі при керуванні механізмами безперервної дії, наприклад вентиляторами, коли АД обраний зі значним запасом по потужності (коефіцієнт завантаження не перевищує 0,3 ... 0,4). У цьому випадку робота при зниженій напрузі ( $U_1 < U_{1ном}$ ), може бути реалізована протягом всього часу роботи (8760 год на рік). Використання датчика швидкості не завжди доцільно і можливо, так як викликає додаткові труднощі при створенні САР швидкості за схемою, показаною на рис. 1.18. Позбавлена цього недоліку схема асинхронного електроприводу з регулюванням напруги статора двигуна в функції кута  $\varphi_1$  показана на рис. 3.3, так як енергоефективний асинхронний електропривод побудований без застосування датчика швидкості [10]. У ній ковзання (швидкість) вимірюється опосередковано за кутом зсуву  $\varphi_1$  між першими гармоніками напруги і струму статора, так як в зоні малих ковзань залежність між кутом  $\varphi_1$  і ковзанням практично лінійна. Вихідна напруга ТПН (див. рис. 3.3) за рахунок зміни кута відкриття вентилів регулюється системою управління (СУ), яка порівнює задане значення кута  $\varphi_{1з}$  з фактичним його значенням  $\varphi_1$ , виміряним опосередковано датчиком кута (ДУ). Як задане значення  $\varphi_{1з}$  задається кут  $\varphi_1$ , відповідний ковзанню  $S_{ном}$ . Миттєві значення напруги і струму статора вимірюються за допомогою датчиків струму (ДТ) і напруги (ДН). Так як на виході ТПН присутні вищі гармоніки [6], то за датчиками струму і напруги встановлюються фільтри ( $\Phi$ ), що виділяють перші гармоніки струму і напруги.

Відзначимо, що економія електроенергії при застосуванні системи ТПН-АД не настільки значна, щоб забезпечити швидку окупність ТПН, включеного в статорні ланцюга АД. Використання ТПН в більшості випадків викликано технологічними вимогами, виробничих механізмів (транспортерів, насосів, вентиляторів, ліфтів, конвеєрів та ін.), Що вимагають плавного пуску і обмеження ударних моментів, прискорень і ривків, що виникають при прямому підключенні асинхронних двигунів до номінальної напруги мережі (докладніше в підрозділ. 3.3.3). Тому ТПН, що використовуються за умовами технології, дозволяють одночасно вирішувати завдання зниження енергоспоживання практично без додаткових витрат.

### 1.6 Системи ТПН-АД

Системи ТПН-АД, забезпечуючи плавний пуск асинхронних двигунів (системи Soft-Start), можуть застосовуватися і для зниження енергоспоживання при роботі недовантажених двигуна в зоні номінальної швидкості. У цьому випадку за рахунок збільшення кута відкриття вентилів, що входять в ТПН, знижується перша гармоніка напруги і асинхронний двигун при заданому моменті статичного навантаження, одержуючи живлення переривчастим струмом, працює на регульовальній характеристиці при швидкості дещо меншій, ніж на природній характеристиці. Такий режим призводить до зменшення сумарних втрат в АД і споживаної активної потужності [11]. Розрахунок балансу потужності електроприводу проводиться на основі аналізу миттєвих значень струмів і напруг статора, отриманих з рішення рівнянь повної моделі системи ТПН-АД, а також передбачається, що симетричний двигун живиться від мережі нескінченної потужності і падіння напруги на тиристорах не враховується. Розрахунок активної потужності, споживаної електроприводом  $P$ , яка при зазначених припущеннях дорівнює активної потужності двигуна  $P_1$  здійснюється за формулою

$$P = P_1 = 3 \frac{1}{T} \int_0^T u_1 i_1 dt, \quad (1.21)$$

де  $T$  - період напруги статора,  $T = 2\pi$ ;  $u_1$  - миттєве значення фазної напруги статора;  $i_1$  - миттєве значення фазного струму статора. Визначимо повну потужність, споживану двигуном  $S_1$  і електроприводом в цілому  $S$ , за такими формулами:

$$S_1 = 3 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_1^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt} = 3U_1 I_1; \quad (1.22)$$

$$S = 3 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_c^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt} = 3U_{1ном} I_1, \quad (1.23)$$

де  $u_c$  - миттєве значення фазної напруги мережі;

$U_1$  - діюче значення фазної напруги статора;

$I_1$  - діюче значення фазного струму статора;

$U_{1ном}$  - номінальне значення фазної напруги мережі.

Тепер можна розрахувати реактивну потужність, споживану двигуном  $Q_1$  і системою електроприводу  $Q$ :

$$\begin{aligned} Q_1 &= \sqrt{S_1^2 - P_1^2}; \\ Q &= \sqrt{S^2 - P^2}. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Звернемо увагу, що потужність, обчислена за формулами (3.71), містить як власне реактивну потужність за всіма гармонікам спектра, так і потужність спотворення, величина якої, як правило, мала, і в оціночних розрахунках нею можна знехтувати. Розрахунок складових потужності необхідно проводити в загальноприйнятій для асинхронних двигунів системі відносних одиниць. На рис. 1.19 наведені графіки характеристик реактивної і активної потужностей, розраховані для різних двигунів. При розрахунку швидкість двигуна приймалася незмінною і рівної номінальній. Реактивна потужність, споживана



системою електроприводу, як видно на рис. 1.19, істотно більше реактивної потужності двигуна.

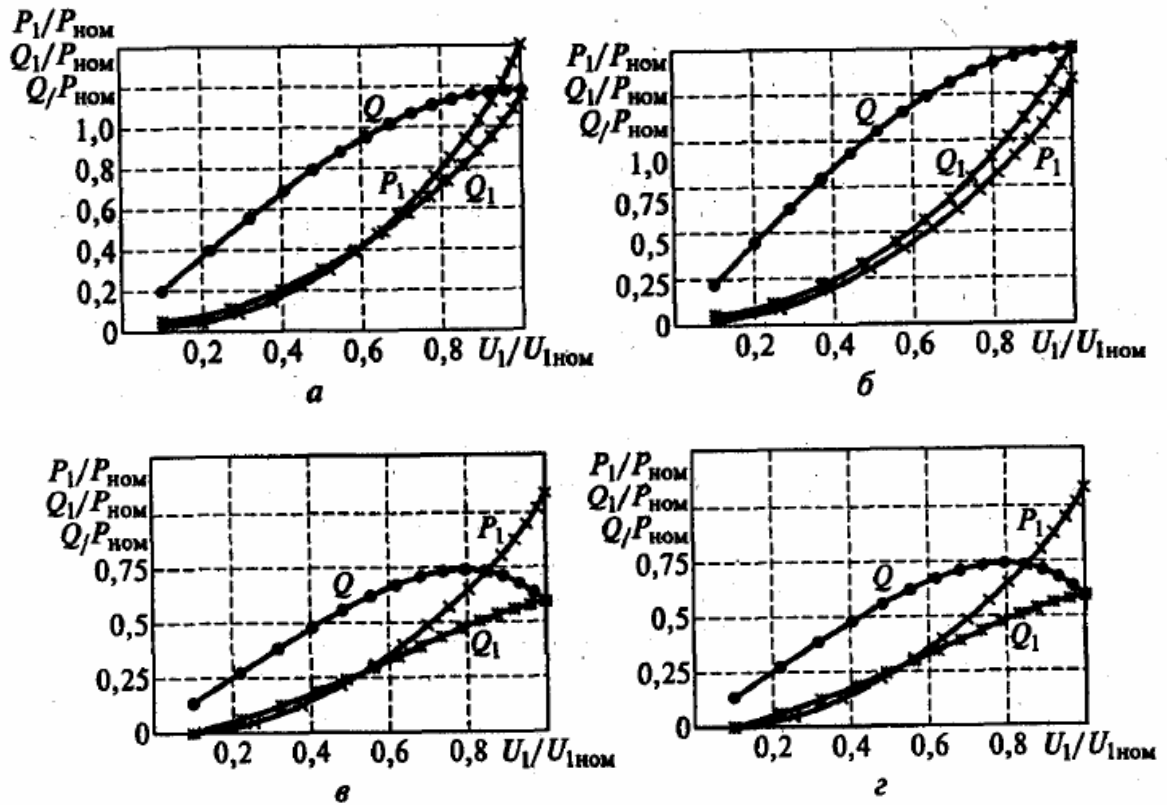


Рисунок 1.16 - Характеристики активної і реактивної потужностей в системі ТПН - Пекло для двигунів типів 4A80B4 (а), МТКF012-6 (б), 4A200L6 (в) і 4A315M6 (г)



Рисунок 1.17 - Залежність кута зсуву від кута відкриття тиристорів для двигуна типу 4A200L6

Для з'ясування причин, що призводять до збільшення реактивної потужності системи електроприводу щодо потужності, споживаної двигуном, необхідно провести розрахунок потужностей по першим гармонікам напруг і струмів, а методом гармонійного аналізу напруги статора розрахувати залежності кута зсуву першої гармоніки напруги на статорі щодо напруги мережі в функції кута відкриття тиристорів при різних швидкостях. На рис. 1.20 показана залежність кута зсуву від кута відкриття тиристорів для двигуна типу 4A200L6. Як впливає з графіків на рис. 1.20, найбільші зміщення 1-й гармоніки мають місце в області номінального ковзання. Зміна зсуву 1-й гармоніки в залежності від швидкості пояснюється ефектом зміна кута навантаження двигуна і відповідним зміщенням зони нечутливості перетворювача, в якій кут відкриття тиристорів менше кута навантаження двигуна. Так як при номінальній швидкості двигун має кут навантаження, близький до мінімального, і, отже, перетворювач в цій області має мінімальну зоною нечутливості, то і зміщення 1-й гармоніки при регулюванні кута відкриття тиристорів настає раніше. Через те, що зміщення 1-й гармоніки напруги визначається кутом навантаження двигуна, повний кут системи буде дорівнює сумі кутів навантаження двигуна і зміщення 1-й гармоніки напруги статора. При відомих кутах навантаження системи розрахунок реактивної потужності можна провести за такими формулами: перетворювач в цій області має мінімальну зоною нечутливості, то і зміщення 1-й гармоніки при регулюванні кута відкриття тиристорів настає раніше. Через те, що зміщення 1-й гармоніки напруги визначається кутом навантаження двигуна, повний кут системи буде дорівнює сумі кутів навантаження двигуна і зміщення 1-й гармоніки напруги статора. При відомих кутах навантаження системи розрахунок реактивної потужності можна провести за такими формулами: перетворювач в цій області має мінімальну зоною нечутливості, то і зміщення 1-й гармоніки при регулюванні кута відкриття тиристорів настає раніше. Через те, що зміщення 1-й гармоніки напруги визначається кутом навантаження двигуна, повний кут системи буде дорівнює сумі кутів навантаження двигуна і

зміщення 1-й гармоніки напруги статора. При відомих кутах навантаження системи розрахунок реактивної потужності можна провести за такими формулами: ( $\omega = \omega_{ном}$ )

$$\begin{aligned} Q_1 &= 3U_{11}I_{11} \sin \varphi_{11}; \\ Q &= 3U_{1ном}I_{11} \sin \varphi_1, \end{aligned} \quad (1.25)$$

де  $U_{11}$ - діюче значення 1-й гармоніки фазної напруги статора;

$I_{11}$ - діюче значення 1-й гармоніки фазного струму статора;

$\varphi_{11}$ - фазовий зсув 1-й гармоніки струму статора по відношенню до 1-й гармоніці напруги статора;

$\varphi_1$  - фазовий зсув 1-й гармоніки струму статора по відношенню до напруги мережі.

Як зазначається в [16], значення  $Q$  і  $Q_1$  розраховані за формулами (3.71) і (3.72), в основному збігаються. Відмінності спостерігаються при низьких швидкостях і малих напругах через те, що при цьому найбільш високий відсоток вищих гармонік в порівнянні з 1-й і тому більшою мірою проявляється вплив коефіцієнта спотворення. Як зазначалося, кут зсуву 1-й гармоніки, а отже, і реактивна потужність системи ТПН-АД визначаються швидкістю двигуна через кут навантаження, що пояснює розходження характеристик як для різних швидкостей, так і для різних типів двигунів. Дійсно, АД серії 4А мають мінімальний кут навантаження в області номінальної швидкості. При цьому з ростом потужності двигуна поліпшується і, як наслідок, зростає можливий діапазон зміни кута зсуву 1-й гармоніки і реактивної потужності. Машини типу МТКФ, маючи менший  $\cos\varphi$  у порівнянні з двигунами серії 4А при номінальній швидкості, мають і менший діапазон зсуву 1-й гармоніки. Крім того, мінімум кута навантаження для двигунів типу МТКФ завжди знаходиться в зоні швидкостей менше номінальної. Таким чином, споживання реактивної потужності перетворювачем з двигуном типу МТКФ в робочій зоні менше в порівнянні з системою на основі двигунів серії 4А. Для підтвердження результатів розрахунку були зняті експериментальні залежності реактивної

потужності АД і системи ТПН- АД в функції напруги для типів 4A80B4 і МТКF012-6. Швидкість системи підтримувалася незмінною.

Експериментальні характеристики активної і реактивної потужностей для двигунів типів 4A80B4 і МТКF012-6 наведені на рис. 1.21.

Зіставлення експериментальних даних з розрахунковими підтверджує загальний характер залежності реактивної потужності системи від фазового зсуву 1-й гармоніки і вказує на необхідність врахування даного ефекту при оцінці енергетичних показників системи ТПН-АД. Отримані результати підтверджують, що тиристорний перетворювач напруги є споживачем реактивної потужності. При цьому частка реактивної потужності, яка припадає на ТПН, досить відчутна. Більш того, при деяких напружених, менших номінального, і незмінною швидкості реактивна потужність системи ТПН-АД може перевершувати реактивну потужність при повному напрузі. Основною причиною цього явища слід визнати ефект зміщення 1-й гармоніки при регулюванні напруги статора. Так як гармонійний склад напруги визначається як кутом відкриття тиристорів, так і швидкістю двигуна (через вплив проти-ЕРС), систему ТПН-АД при аналізі споживаної реактивної потужності слід розглядати спільно з урахуванням конкретних параметрів двигуна.

Ефект зміщення 1-й гармоніки безумовно погіршує властивості системи ТПН-АД. Проте це явище не виключає використання ТПН як засобу енергозбереження. Дійсно, ефект від енергозберігаючого режиму найбільш відчутний при роботі двигуна на холостому ході. При цьому (див. рис. 1.16) істотно знижується споживання як активної, так і реактивної енергії в порівнянні з номінальним режимом. Однак необхідно дослідження умов оптимізації енергоспоживання системи ТПН-АД з урахуванням балансу реактивної потужності. У каталогах фірм, що випускають системи Soft-Start, не наводяться відомості про вплив ТПН на живильну мережу і заходах, спрямованих на обмеження цього впливу.

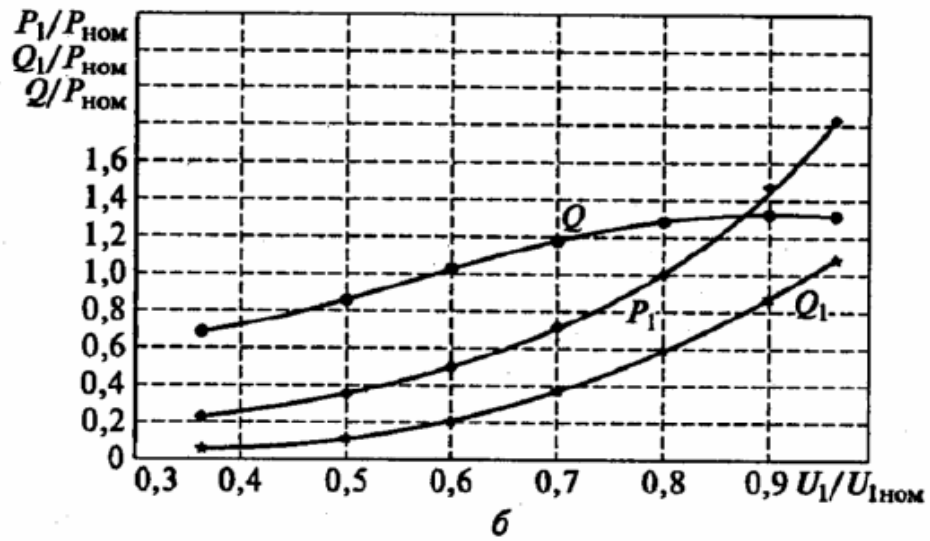
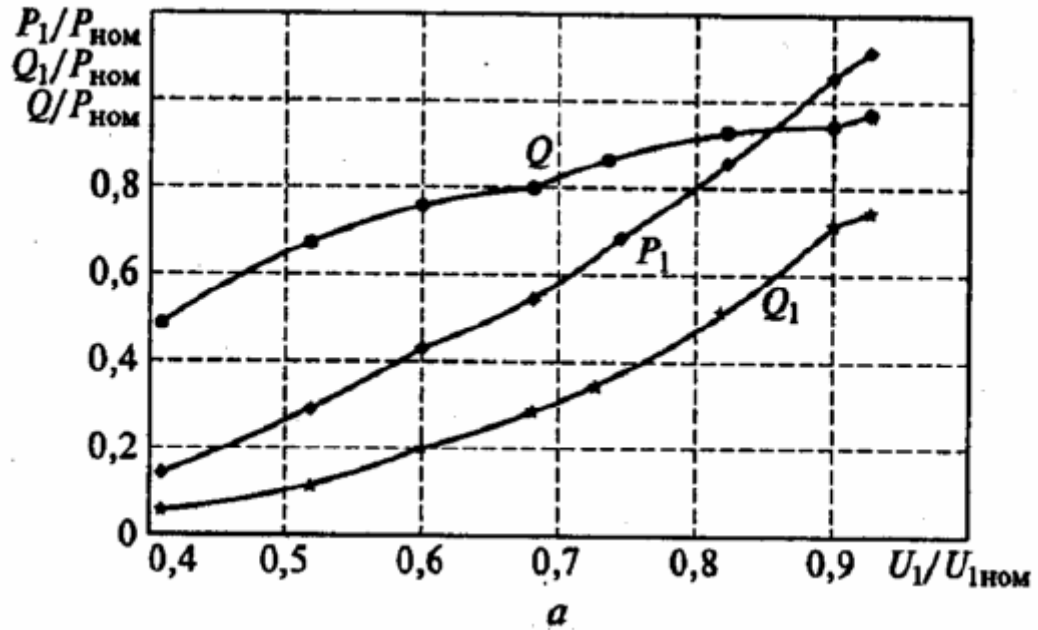


Рисунок 1.18 - Экспериментальні характеристики активної і реактивної потужностей в системі ТПН - АД різних двигунів: а - типу 4А80В4 при  $\omega = 0,95\omega_{ном}$ ; б - типу МТКФ012-6 при  $\omega = 1,1\omega_{ном}$

## 2 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АД ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ДЖЕРЕЛА НАПРУГИ

Статичні енергетичні характеристики АД будуються на основі сімейства механічних характеристик і показників векторної діаграми АД розрахованих по Т-подібній схемі заміщення АД, яка виходить при класичних припущеннях. Так для фіксованого ковзання ( $s$ ) і напруги статора ( $U_1$ ) на підставі Т-подібної схеми заміщення (рис. 2.1) електричні координати стану в комплексній формі можна розрахувати за такими формулами:

$$\begin{aligned} Z_{AD} &= r_1 + jx_1 + \frac{jx_m(jx_2s+r_2)}{jx_2s+r_2}; \\ I_1 &= \frac{U_1}{Z_{AD}}; E_0 = U_1 - (r_1 + jx_1)I_1 \\ I_0 &= \frac{E_0}{jx_m}; I_2 = \frac{E_0}{jx_2 + \frac{r_2}{s}} = \frac{sE_0}{r_2 + jx_2s'} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де  $r_1, r_2, x_1, x_2$  - активні та індуктивні опори розсіювання статора (1) і ротора (2);

$x_m$  - індуктивний опір намагнічування.

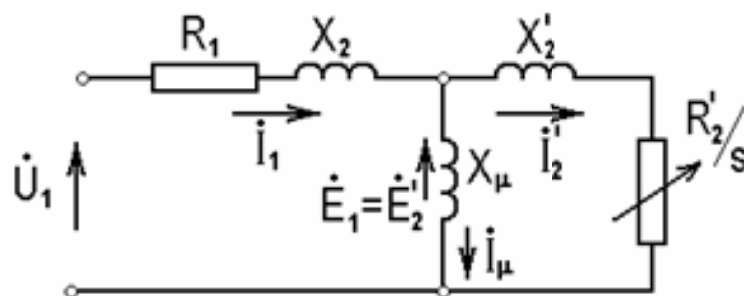


Рисунок 2.1 - Схема заміщення АД

На основі значень струмів в комплексному вигляді, отриманих з (2.1), електромагнітний момент машини розраховується наступним чином:

$$M_e = \frac{3}{2} Z_p L_m (I_m(I_s) \times R_e(I_r) - R_e(I_s) \times I_m(I_r)) \quad (2.2)$$

Таким чином, задаючись різними значеннями ковзань при конкретних значеннях напруг по (2.1), (2.2) розраховуються точки сімейства механічних характеристик АМ. Отримане сімейство наведено на рисунку 2.2. Розрахунок реалізований в пакеті MATLAB і оформлений у вигляді скрипт-програми.

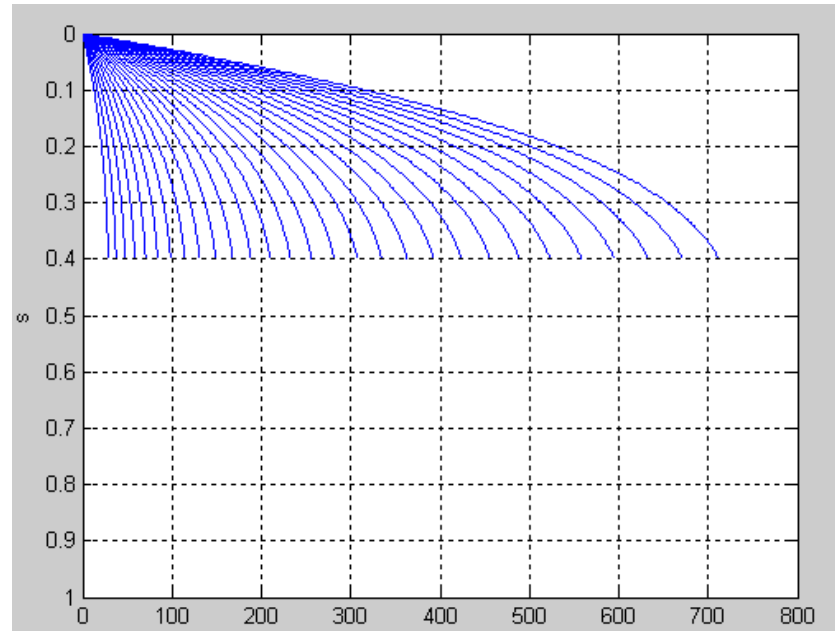


Рисунок 2.2 - Механічні характеристики АМ при різній нарузі статора з номінальною частотою

На основі комплексів електричних координат можна розрахувати енергетичні показники:

- втрати в міді

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 3(|I_1|^2 \times r_1 + |I_2|^2 \times r_2);$$

- коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{мех}} + \Delta P} : P_{\text{мех}} = M_e \times \omega = M_e \times \frac{\omega}{\omega_0 (1 - S)}$$

- коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{I_m |I_s|}{|I_s|} \text{ при } U_s = jU_1$$

Як результат розрахунку також виходить набір даних для побудови сімейств «електричних» характеристик АМ. Однак отримані сімейства є

залежностями координат стану як функцій від ковзання при фіксованих напругах. Енергетичні ж характеристики зручніше представляти у вигляді сімейств залежностей від напруги при незмінних моментах. Щоб не вдаватися до ітераційної процедури розрахунку напруги при фіксованому ковзанні для отримання необхідного значення моменту ці значення напруг пропонується визначати на базі «пакета» отриманих даних, інтерполювавши їх в необхідних значеннях електромагнітного моменту. Так, для зазначеного двигуна отримані сімейства залежностей енергопоказників як функцій від напруги при фіксованих моментах наведені на рисунку 2.3, де наведені такі енергопоказники: ККД,  $\cos\phi$ , сумарні електричні втратив машині

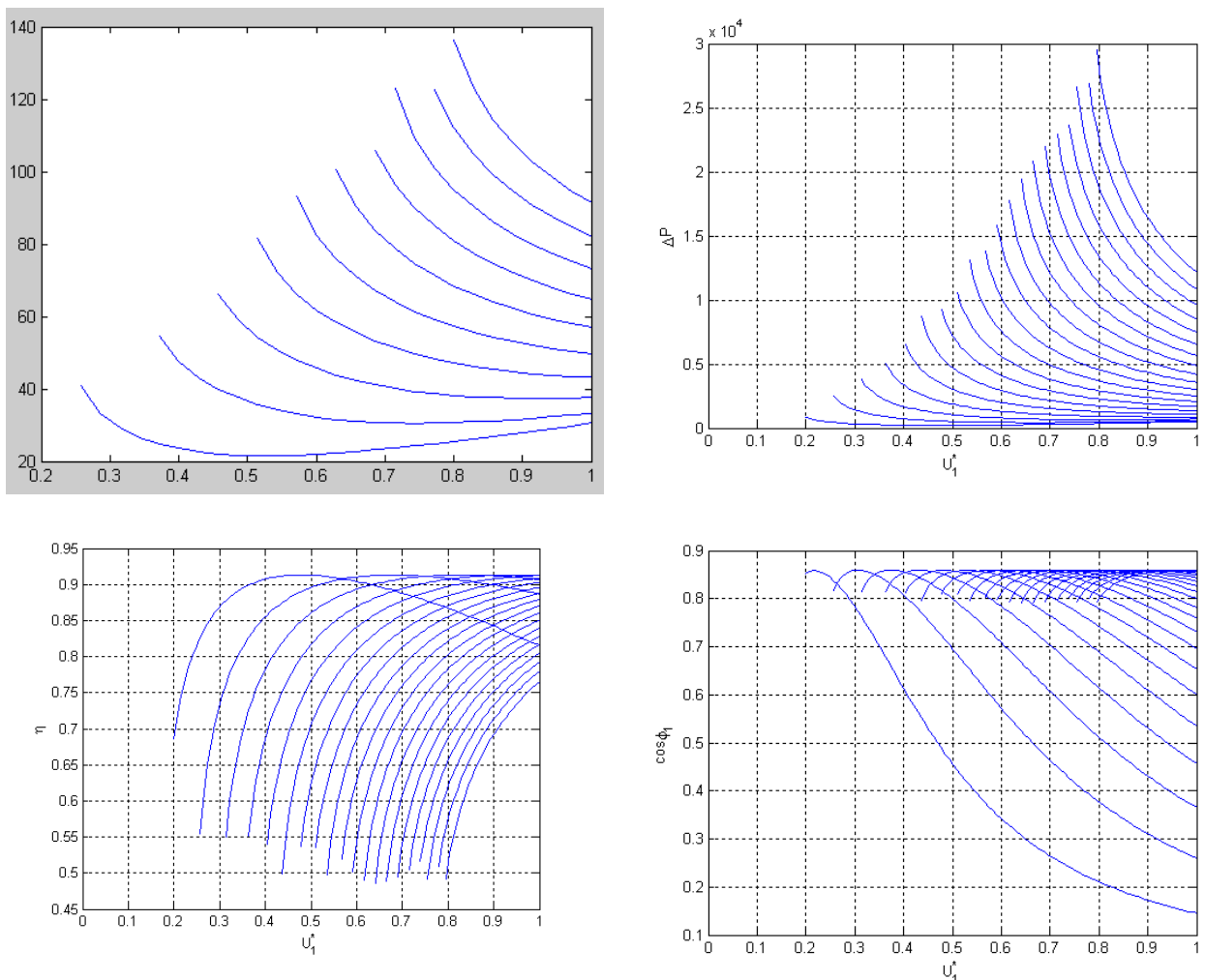


Рисунок 2.3 - Енергетичні характеристики АМ



## 3 ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ

З сімейств статичних характеристик бачимо, що для обраного двигуна є можливість здійснити управління із забезпеченням мінімуму струму статора або мінімуму споживаної реактивної потужності. Відповідні екстремали представлені на рисунку 3.1.

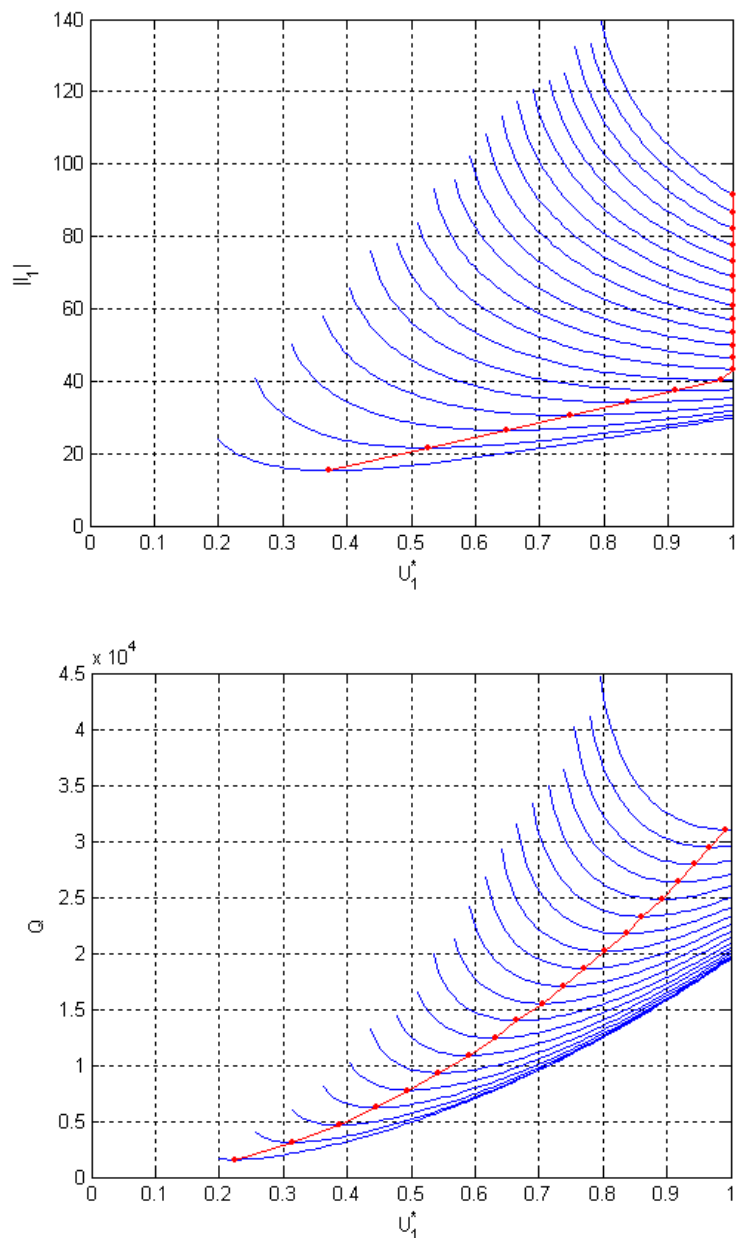


Рисунок 3.1 - Екстремали енергопоказників на сімействах характеристик

Для використання даних результатів при побудові систем ЕП необхідно отримані екстремалі перерахувати як залежності напруги або швидкості від координат стану електроприводу (моменту, струму швидкості). Перерахунок проведено на основі матриці даних отриманих при розрахунку статичних характеристик. Отримані залежності представлені на рис. 3.2.

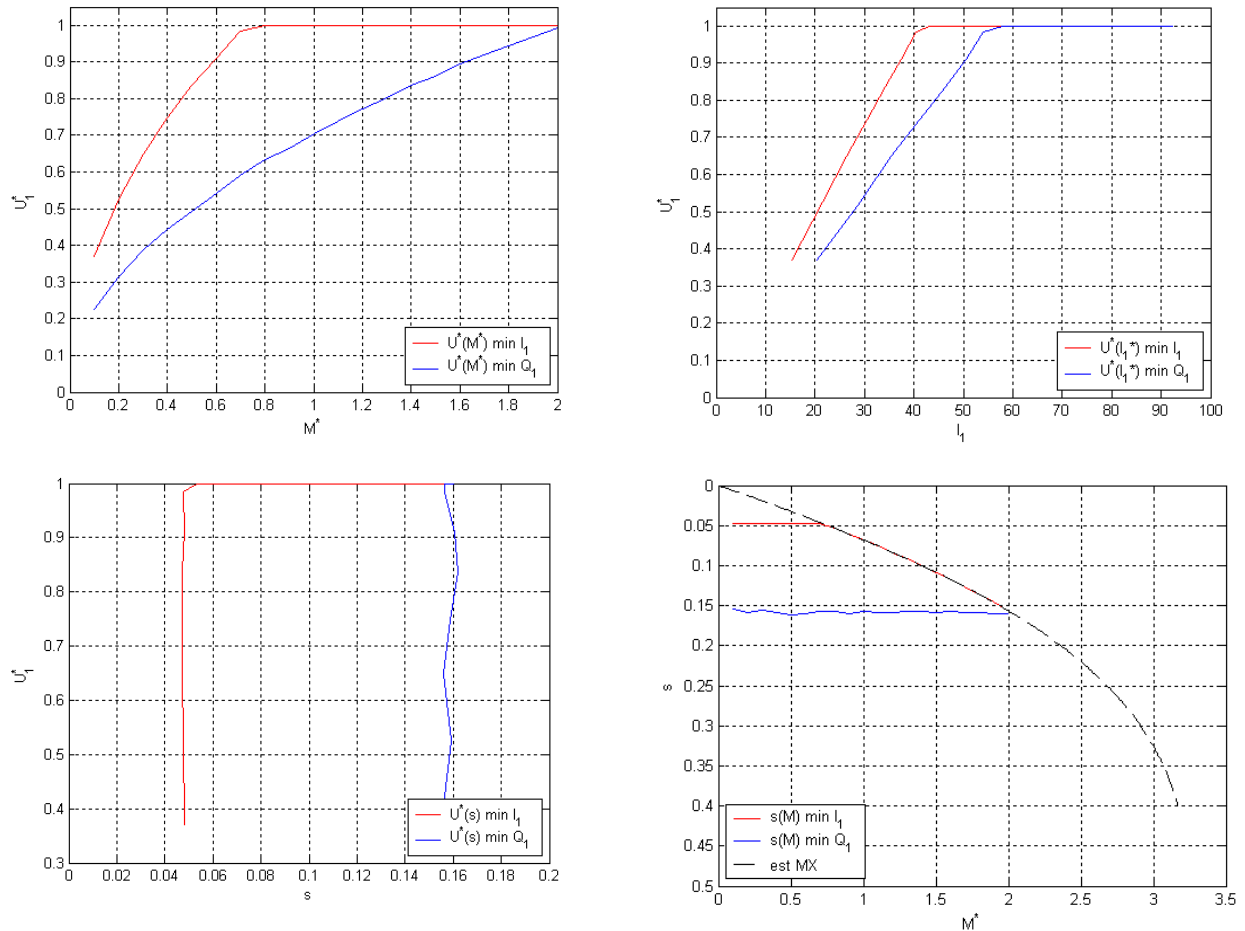


Рисунок 3.2 - Залежності напруги і ковзання від координат стану АМ при яких забезпечується екстремальний характер енергопоказників

З залежностей рис. 3.2 робимо висновок, що робота при забезпеченні екстремуму енергопоказника досягається при роботі двигуна з постійною швидкістю. Тому система забезпечення мінімуму струму або реактивної потужності система електроприводу повинна будуватися як система стабілізації швидкості.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 4.1 Модель асинхронної машини

Опис АМ розглядається при класичних припущеннях про магнітної і електричної симетрію обмоток, лінійність кривої намагнічування, нехтуючи зубцовими ефектами.

Опис АМ в ортогональній загальній просторовій системі координат (u, v), яка обертається зі швидкістю  $\omega_k$  наступний:

$$\begin{cases} U_{su} = R_s i_{su} + \frac{d\psi_{su}}{dt} - \omega_k \psi_{sv} \\ U_{sv} = R_s i_{sv} + \frac{d\psi_{sv}}{dt} - \omega_k \psi_{su} \\ U_{ru} = R_r i_{ru} + \frac{d\psi_{ru}}{dt} - (\omega_k - \omega_e) \psi_{rv} \\ U_{rv} = R_r i_{rv} + \frac{d\psi_{rv}}{dt} - (\omega_k - \omega_e) \psi_{ru} \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $R_s, R_r$  - активні опори обмоток статора і ротора;

$\omega_e$  - електрична швидкість обертання ротора,  $\omega_e = z_p \omega$ ;

$z_p$  - кількість пар полюсів.

Проекції потокозчеплення статора і ротора

$$\begin{cases} \psi_{su} = L_s i_{su} + L_m i_{ru} \\ \psi_{sv} = L_s i_{sv} + L_m i_{rv} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\begin{cases} \psi_{ru} = L_m i_{su} + L_r i_{ru} \\ \psi_{rv} = L_m i_{sv} + L_r i_{rv} \end{cases} \quad (4.3)$$

де  $L_s, L_r, L_m$  - індуктивності статора, ротора і намагнічування,

$$L_s = L_m + L_{1\sigma}; \quad L_r = L_m + L_{2\sigma}$$

Електромагнітний момент

$$M_e = \frac{3}{2} z_p L_m (i_{sv} \cdot i_{ru} - i_{su} \cdot i_{rv}). \quad (4.4)$$

Для побудови структури моделі, призначеної для дослідження АМ при частотному управлінні з статора, запишемо наведене опис:

в нерухомій системі просторових координат ( $\alpha, \beta$ ;  $\omega_k = 0$ );

ротор розглядаємо короткозамкненим, тобто  $U_{ru} = 0$ ,  $U_{rv} = 0$ ;

опис отримаємо в координатах стану  $(i_s - \psi_r)$ .

Доповнивши отриманий з (4.1) - (4.4) опис рівнянням руху, матимемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ U_{s\alpha} - (R_s + K_r^2 R_r) i_{s\alpha} + K_r \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} + \omega_e K_r \psi_{r\beta} \right]; \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ U_{s\beta} - (R_s + K_r^2 R_r) i_{s\beta} + K_r \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + \omega_e K_r \psi_{r\alpha} \right]; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} + R_r K_r i_{s\alpha} - \omega_e \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + R_r K_r i_{s\beta} - \omega_e \psi_{r\alpha}; \\ M_e = \frac{2}{3} z_p K_r (i_{s\beta} \psi_{r\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{r\beta}); \quad \omega_e = z_p \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_c), \end{array} \right. \quad (4.5)$$

де  $K_r$  - коефіцієнт магнітного зв'язку ротора,  $K_r = \frac{L_m}{L_r}$ ;

$\sigma$  - коефіцієнт розсіювання за Блонделем,  $\sigma = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}$ ;

Складові напруги статора при  $\omega_k = 0$ :

$$U_{s\alpha} = U_{\phi m} \cdot \sin(\int \omega_{0e} dt); \quad U_{s\beta} = -U_{\phi m} \cdot \cos(\int \omega_{0e} dt), \quad (4.6)$$

Де  $U_{\phi m}$  - амплітуда фазного напруги живлення статора;

$\omega_{0e}$  - електрична швидкість обертання поля,  $\omega_{0e} = 2\pi f$ .

Струм ротора і потокозчеплення статора в проекціях на осі  $\alpha$  і  $\beta$  виражаються алгебраїчно:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r} (\psi_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}); \\ i_{r\beta} = \frac{1}{L_r} (\psi_{r\beta} - L_m i_{s\beta}); \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \psi_{s\alpha} = K_r \psi_{r\alpha} + \sigma L_s i_{s\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = K_r \psi_{r\beta} + \sigma L_s i_{s\beta}; \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Роторні координата стану  $(\psi_r, i_r)$  В просторовій системі, пов'язаної з ротором (d, q) можна отримати з проекцій в нерухомій системі  $\alpha, \beta$  координатним перетворенням:  $\psi_r, i_r$

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{rd} = \psi_{r\alpha} \cos \sigma_e + \psi_{r\beta} \sin \sigma_e \\ \psi_{rq} = -\psi_{r\alpha} \sin \sigma_e + \psi_{r\beta} \cos \sigma_e \end{array} \right. \quad (4.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{rd} = i_{r\alpha} \cos \sigma_e + i_{r\beta} \sin \sigma_e \\ i_{rq} = -i_{r\alpha} \sin \sigma_e + i_{r\beta} \cos \sigma_e \end{array} \right. \quad (4.9)$$

де  $\sigma_e$  - електричний кут положення ротора,

$$\sigma_e = \int \omega_e dt = \int z_p \omega dt.$$

Модулі узагальнених векторів (амплітуди фазних значень) електричних координат положення виходять в будь-який ортогональній просторовій системі по теоремі Піфагора, наприклад модуль струму статора:

$$|I_s| = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}. \quad (4.10)$$

За описом (4.5), (4.7), (4.8) складається структура моделі АМ. Для зручності при подальшому використанні цю структуру рекомендується звернути в підсистему з вхідними сигналами  $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, M_c$ , а вихідними - сигналами проєкцій електричних координат стану (статорних на осі  $\alpha, \beta$ , роторних на осі  $d, q$ ), електромагнітного моменту ( $M_e$ ) і швидкості ( $\omega$ ).

Структура буде мати велику кількість зв'язків. Спростити її уявлення можна застосовуючи блоки передачі сигналу Goto і From. Розрахунок модулів векторів по (4.10) також доцільно реалізовувати окремими підсистемами. Один з варіантів структури АМ, який відображає опис (4.5) наведено на рисунку 4.1.

Формування сигналів напруги живлення по (3.6) також слід реалізувати у вигляді підсистеми, входами якої є сигнали  $\omega_{oe}, U_{\phi m}$ , а виходами -  $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ .

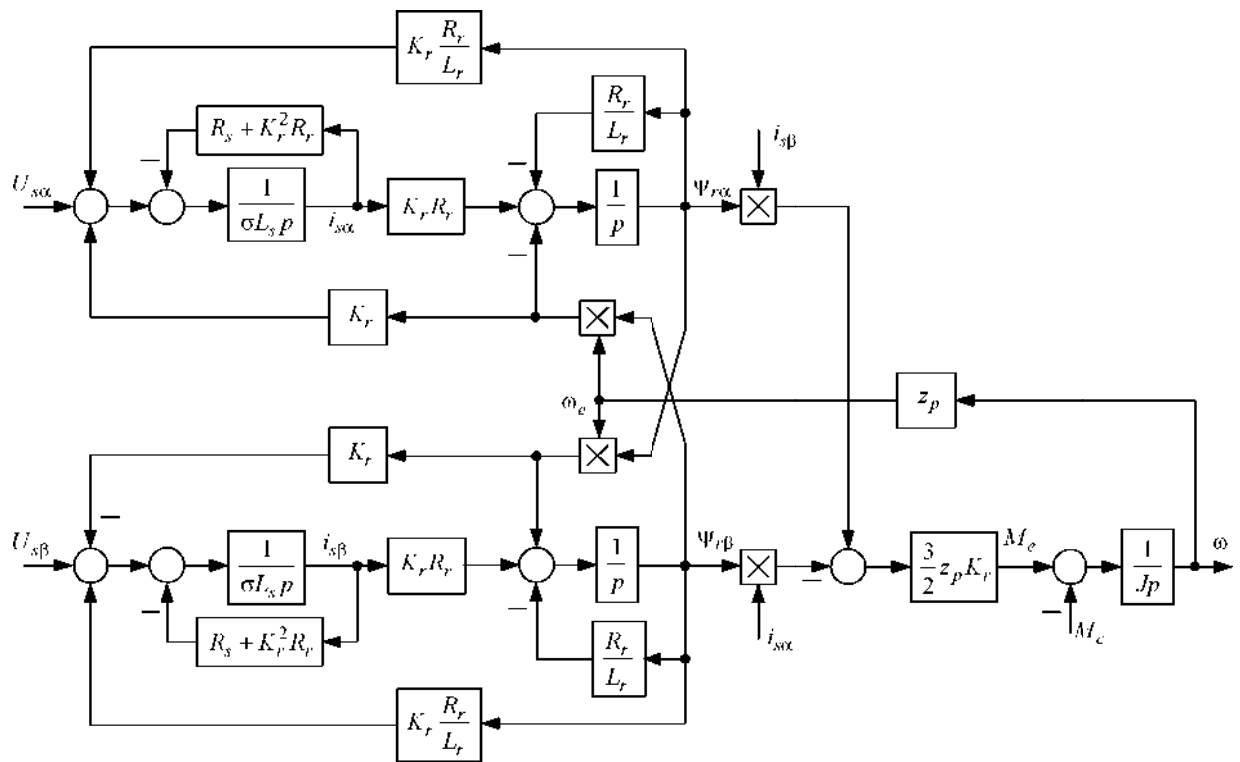


Рисунок 4.1 - Структура опису АМ в нерухомій загальній системі просторових координат ( $\alpha$ ,  $\beta$ )

#### 4.2 Функціональна схема системи ТРН-АД. Робота системи

Розглянемо замкнену за швидкістю систему. Регулюючим перетворювачем, власне, є тиристорний регулятор напруги ТРН (рис. 4.2). При такій силовій схемі привід є нереверсивним. Завдання на контур швидкості формується задатчиком інтенсивності (ЗІ), а швидкість вимірюється датчиком швидкості. Для обмеження рівня струму статора в систему вводиться зв'язок за струмо з відсічкою, тобто контур струму замикається і та працює в режимі струмообмеження, коли рівень струму перевищить рівень порівняння в блоці «зона нечутливості» (ЗН). Зворотній зв'язок замикається по амплітудним значенням струму статора, який виходить в датчику амплітудного значення струму (АА) на базі миттєвих значень струмів фаз статора, які вимірюються датчиками струмів фаз ВА1....3. Для стійкої роботи системи, коли контур струму не працює, застосовується пропорційний регулятор струму (PI), який в цьому режимі підсилює сигнал ПІ-регулятора швидкості.

Силова частина ТРН нелінійна – напругам на двигуні  $0, U_{SH}$  відповідають кути управління  $\alpha_{max}, \alpha_{min}$  відповідно, тому в прямому каналі є нелінійний блок (НБ), який узгоджує вхідний канал в СІФУ ( $U_{сифу}$ ) з вихідним сигналом регулятора струму ( $U_{pi}$ ) для отримання необхідних значень кутів управління при сигналі  $U_{pi} = 0 \div U_{y_{max}}$ .

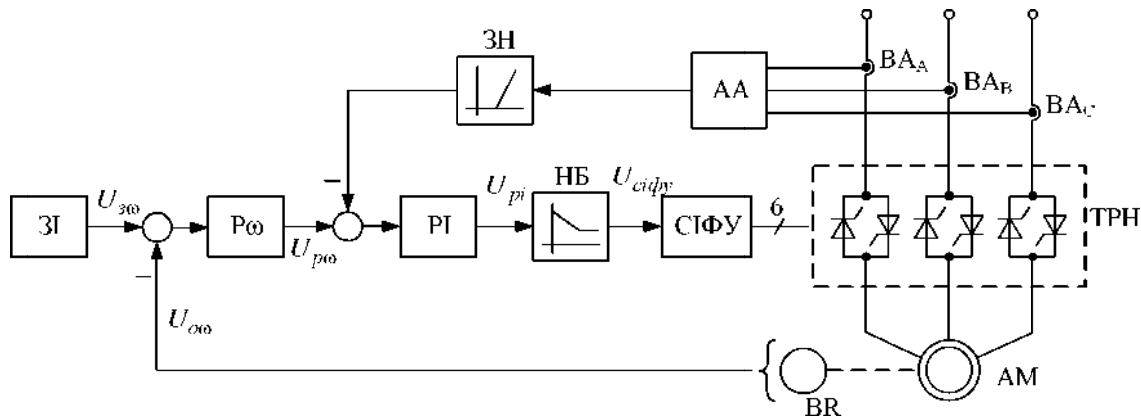


Рисунок 4.2 - Функціональна схема системи ТРН - АД

### 4.3 Структурна схема системи і оптимізація

Структурну схему керуючої частини системи ТРН-АД складаємо вважаючи, що нелінійність силової частини ТРН повністю компенсується нелінійним блоком (НБ) на виході регулятора струму. В результаті прямий канал регулюючої частини системи вважаємо лінійним: елементи НБ, СІФУ, ТРН мають загальний коефіцієнт передачі

$$K_{\text{ТРН}} = \frac{U_{SHm}}{U_{y_{max}}},$$

де  $U_{SHm}$  - амплітуда номінального фазного напруги статора АМ,

$$U_{SHm} = U_{S\phi H} \sqrt{2} = U_{S\phi H} \sqrt{\frac{2}{3}};$$

$U_{y_{max}}$  - максимальне значення напруги сигналів в керуючої частини системи.

Інерційність силової частини відображена постійної часу ланцюга фазового управління ТРН визначається максимальним часом запізнювання. Для силової частини, зображеної на рисунку 36.1, цей час становить  $\tau_{сч} = 0,333$  с [2]. Прийємо сталу часу силової частини ТРН  $T_{трн} = \tau_{сч} = 0,333$  с. Структурна схема керуючої частини системи приведена на рисунку 4.3.

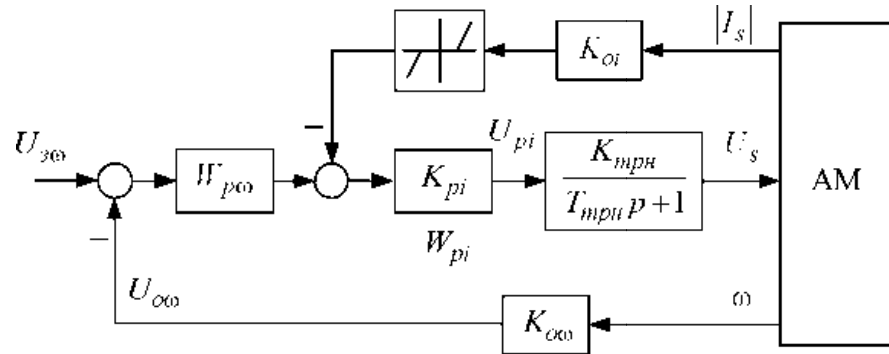


Рисунок 4.3 - Структурна схема керуючої частини системи

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом

$$K_{трн} = \frac{U_{ум}}{I_{smax}}$$

де  $I_{smax}$  - максимальне значення амплітуди струму. прийємо

$$I_{smax} = 5 \cdot I_{SH} \sqrt{2}.$$

Напруга відсічення  $U_{отс}$  в блоці «зона нечутливості» в зворотному зв'язку за струмом визначається рівнем максимального струму, який необхідно підтримувати в режимі струмообмеження

$$U_{отс} = K_{oi} \cdot I_{огр},$$

де  $I_{огр}$  - значення амплітуди струму, яке необхідно підтримувати при струмообмеження. прийємо

$$I_{огр} = 2 \cdot I_{SH} \sqrt{2}$$

Коефіцієнт П-регулятора струму розраховуємо по статичному режиму за умови точності підтримки струму ( $\Delta I_s$ ) при зміні напруги статора в усьому діапазоні. Прийємо  $\Delta I_s = 0,1 I_{SH} \sqrt{2}$ . Нехтуючи опором статора в порівнянні з відношенням



$$\frac{U_{\text{снф}}}{\Delta I_s} = \frac{U_{\text{снф}}}{0,1I_{\text{снм}}} \cdot z_1,$$

отримаємо вираз для розрахунку:  $K_{pi}$

$$K_{pi} = \frac{1}{K_{oi}K_{\text{трн}}} \cdot \frac{U_{\text{снф}}}{0,1I_{\text{снм}}}$$

Асинхронний двигун, як об'єкт управління при регулюванні напруги статора на робочій ділянці механічної характеристики по каналу «електромагнітний момент - швидкість» описується аперіодичною ланкою першого порядку

$$W_{\text{ад}} = \frac{K_{\text{д}}}{T_M p + 1}$$

де - коефіцієнт передачі двигуна,  $K_{\text{д}}$

$$K_{\text{д}} = \frac{\omega_0 S_k}{U_{\text{снм}}} = \frac{\omega_0 S_k}{U_{\text{сн}} \sqrt{2}};$$

$T_M$  - електромеханічна стала часу на робочій ділянці механічної характеристики при  $U_s = U_{\text{сн}}$  (на природній характеристиці),

$$T_M = J \frac{\omega_0 S_k}{2M_k},$$

де  $s_k, M_k$  - критичні ковзання і момент на природній характеристиці двигуна,

$$S_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}; M_k = \frac{3}{2} \frac{U_{\text{нф}}^2}{\omega_0 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2});}$$

$$x_k = x_1 + x_2'; \omega_0 = \frac{\pi n_0}{z_p} = \frac{2\pi f}{z_p}.$$

Контур швидкості в цілому, при незамкненому контурі струму має структурну схему, наведену на рисунку 4.4.

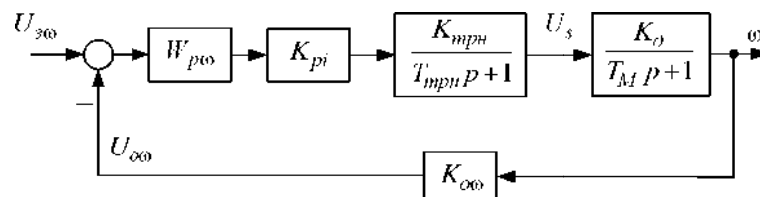


Рисунок 4.4 - Структурна схема контуру швидкості

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю

$$K_{0\omega} = \frac{U_{ym}}{\omega_n},$$

де  $U_{ym}$  – максимальне значення сигналів напруги в керуючій частині системи.

Оптимізуємо контур швидкості за модульним оптимумом з некомпенсованою сталою  $T_{\text{трн}}$ . В результаті отримаємо ПІ-регулятор швидкості.

$$W_{p\omega}(p) = K_{p\omega} + K_{ip\omega} \frac{1}{p};$$

$$K_{p\omega} = \frac{T_M}{a_\omega T_{\text{трн}} K_{pi} K_{\text{трн}} K_d K_{o\omega}}; K_{ip\omega} = \frac{K_{p\omega}}{T_m},$$

де приймаємо  $a_\omega a_\omega = 3 \dots 5$ .

Через те, що оптимізація контуру струму проводилася по статичним режимом, то може виникнути потреба в регулюванні коефіцієнтів регулятора швидкості (і остаточне визначення  $a_\omega$ ), які підбираються за результатами моделювання з умови забезпечення якості регулювання в динаміці.

#### 4.4 Моделювання системи ТРН-АД в MATLAB / Simulink

У роботі необхідно досліджувати роботу системи шляхом структурного моделювання. При побудові структури моделі та аналізі результатів моделювання слід пам'ятати, що в реальності силова регулююча частина системи істотно нелінійної і її властивості накладають певні обмеження на регульовальні властивості системи ЕП.

У нашому випадку це:

- привід є нереверсивним без режиму динамічного гальмування, тому сигнали завдання на швидкість і зворотного зв'язку по швидкості можуть бути тільки позитивними;

- при фазовому управлінні на виході ТРН змінюється рівень напруги при фіксованій частоті - структурно при формуванні миттєвих значень напруг живлення статора, їх амплітуда повинна бути позитивною - значить сигнал на виході регулятора струму повинен бути тільки позитивним.

Крім того, в системі контролюється амплітуда струму статора, і сигнал з відповідного датчика (АА на рис. 4.1) є завжди позитивним.

З урахуванням цих особливостей будується модель регулюючої частини системи електропривод ТРН-АД.

Модель асинхронної машини рекомендується будувати по повним описом з урахуванням електромагнітних процесів в загальній нерухомій просторовій системі координат  $\alpha, \beta$ - $\alpha, \beta$  в координатах стану « $I_s - \psi_r$ », а на рисунку 4.5 представлена згорнутою в підсистему (Subsystem\_AM) з входами  $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, M_c$  і виходами  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, M_e, \omega$ .

Тиристорний регулятор напруги разом з СІФУ і компенсує нелінійним блоком представляється лінійним, а напруга на виході ТРН – синусоїдальною з незмінною номінальною частотою і регульованою амплітудою. Отже

$$U_{s\alpha} = U_{sm} \sin \left( \int \omega_{0e} dt \right); U_{s\beta} = -U_{sm} \cos \left( \int \omega_{0e} dt \right);$$

$$\omega_{0e} = 2\pi f_H = \text{const};$$

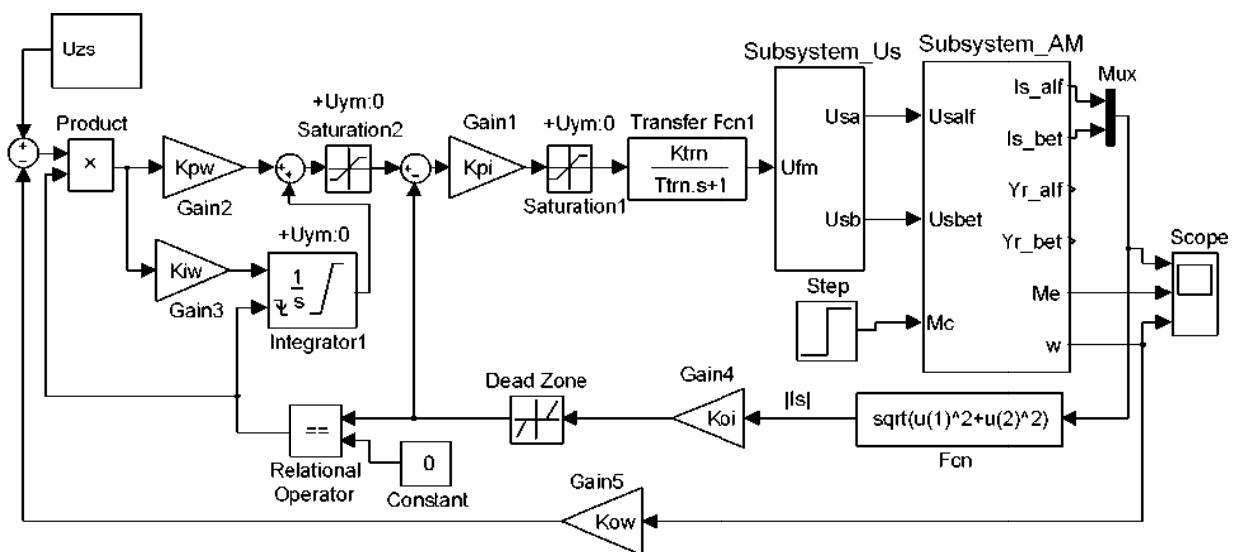


Рисунок 4.5 - Структура моделі ЕП на системі ТРН-АД в МАДЛАВ / Simulink

де  $U_{sm}$  - амплітудне значення напруги.  $U_{sm}$  одержується на виході аперіодичної ланки з коефіцієнтом  $K_{трн}$  і сталою часу  $T_{трн}$  (блок Transfer Fcn1 на рис. 4.5).

Структура отримання напруг  $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ , по (4.2) на рисунку 4.5 оформлена у вигляді підсистеми Subsystem\_Us.

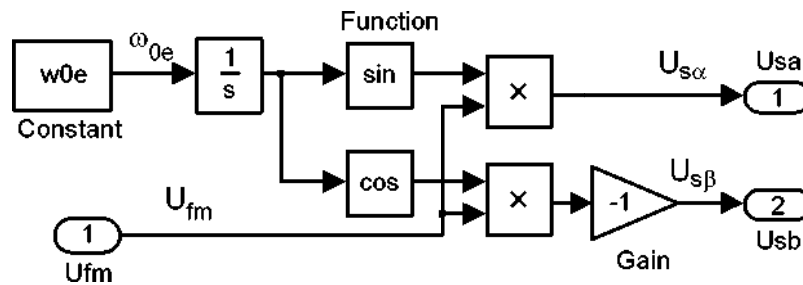


Рисунок 4.5 - Структура підсистеми Subsystem\_Us формування напруг  $U_{s\alpha} U_{s\beta}$

У контурі струму пропорційний регулятор представлений підсилювачем (Gain1) з обмеженням (Saturation1). З огляду на зазначені вище регульовальні властивості ТРН, сигнал виходу регулятора струму повинен бути тільки позитивним, тому в блоці Saturation1 обмеження встановлюється в межах  $(U_{ym}; 0)$ . Зворотній зв'язок по току замикається по амплітудному значенням, яке з сигналів моделі двигуна  $(i_{s\alpha}, i_{s\beta})$  можна отримати по теоремі Піфагора

$$I_{sm} = |I_s| = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}.$$

Розрахунок  $I_{sm}$  по (4.2) в моделі реалізовано блоком Fcn (рис. 4.5). Зона нечутливості в зворотного зв'язку по струму реалізована блоком Dead Zone в якому задаються межі зони  $\pm U_{отс}$ . З огляду на те, що сигнал з датчика амплітуди струму позитивний, то початок зони нечутливості можна встановити будь-яким від  $-\infty$  до 0.

Пропорційно-інтегральний регулятор швидкості реалізується за традиційною структурою, але з обмеженням виходу на рівнях  $U_{ym}, 0$  (блоки Saturation2 і Integrator1). Вихід регулятора швидкості в даній роботі повинен «скидатися» в нуль при роботі внутрішнього контуру струму.

Це досягається обмеженням сигналу на вході регулятора швидкості (блоком Product) і на виході інтегратора Integrator1, задавши в блоці внутрішнє (internal) початкове значення 0 (Initial condition) і перехід на це значення по зовнішньому сигналу по спаду (falling).

Обнулення здійснюється коли логічний сигнал на виході блоку Relational Operator переходить в нульове значення. На входах блоку Relational Operatorc функцією «дорівнює» (==) порівнюються сигнали блоку DeadZone в зворотного зв'язку по струму і нуль.

Коли сигнал з блоку Dead Zone не дорівнює нулю (діє контур струму) - на виході блоку Relational Operator отримаємо нуль, інакше - одиницю.

Сигнал завдання на швидкість слід сформувавши лінійно наростаючим. Задатчик інтенсивності швидкості на рисунку 4.4 не показаний. Час пуску розраховується, прийнявши значення динамічного моменту, що дорівнює номінальній

$$t_{nn} = \frac{J\omega_n}{M_n}.$$

На рис. 4.6- 4.7 показані графіки перехідних процесів і фазові портрети роботи систем стабілізації швидкості при ковзанні, відповідному мінімуму струму статора (рис. 4.6) і мінімуму реактивної потужності (рис. 4.7).

Порівняння показників при номінальному моменті опору наведено в таблиці 4.1. З таблиці видно, що в режимі мінімізації реактивної потужності статора при номінальному моменті опору реактивна потужність знижується на 27,4%.

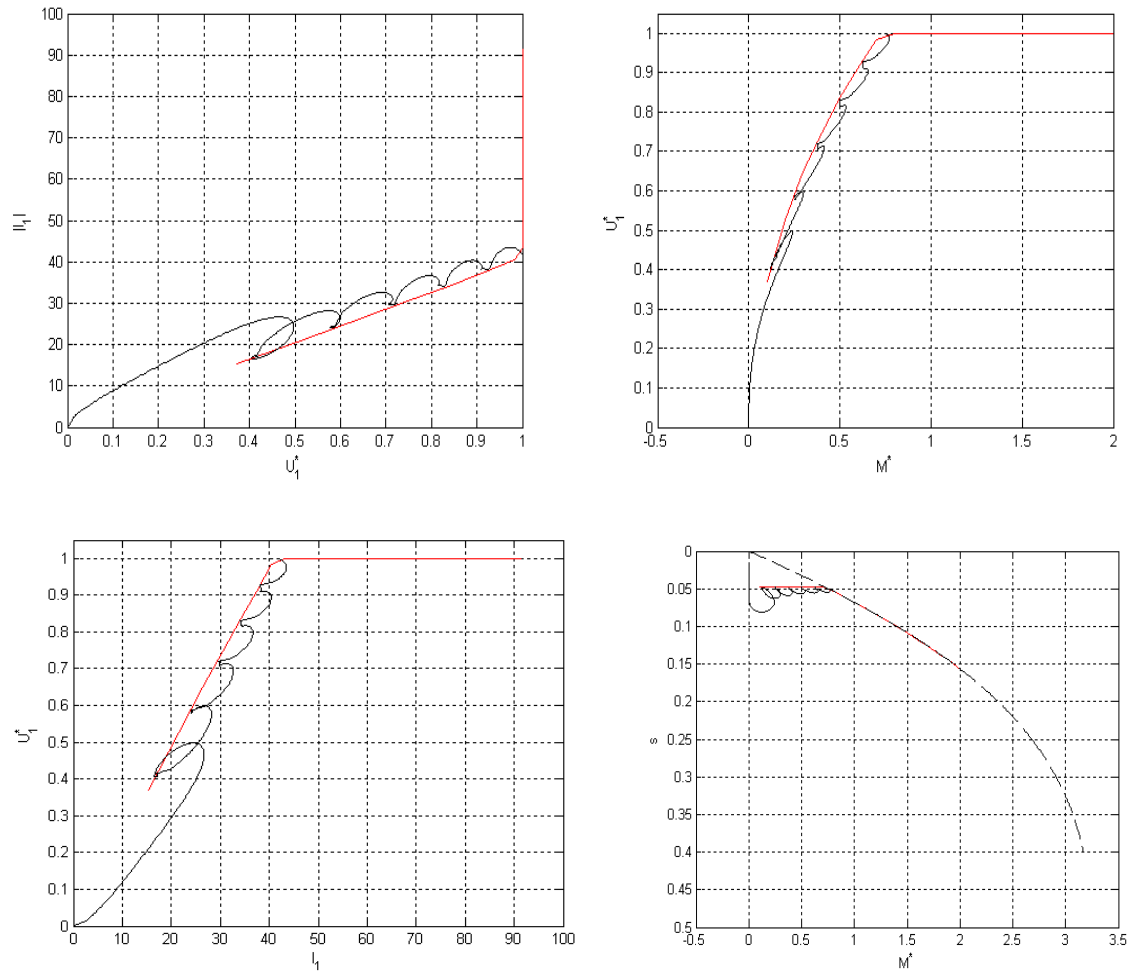


Рисунок 4.6 – Фазові портрети роботи систем стабілізації швидкості при ковзанні, відповідному мінімуму струму статора

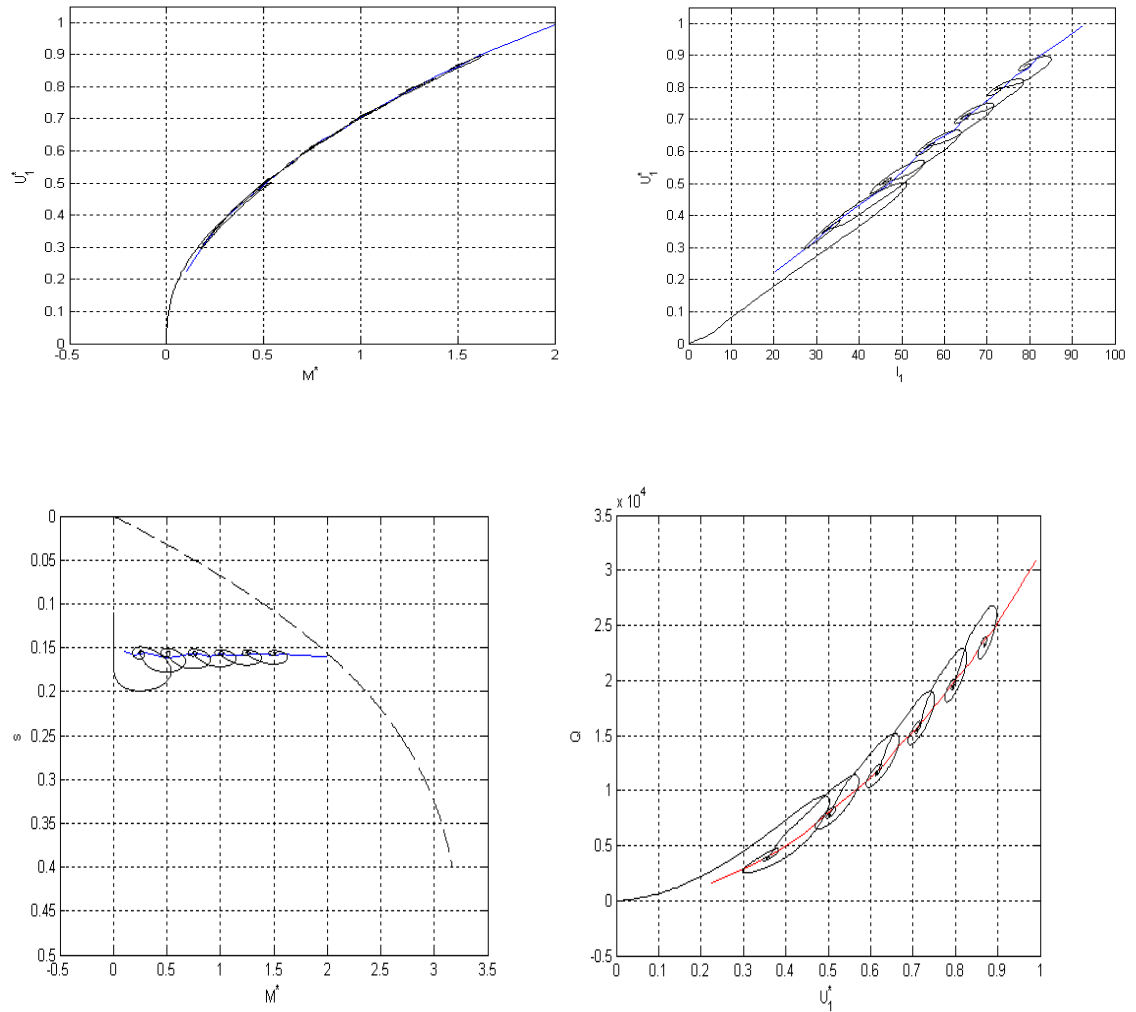


Рисунок 4.7 – Фазові портрети роботи систем стабілізації швидкості при ковзанні, відповідному і мінімуму реактивної потужності

Таблиця 4.1 - Порівняння енергопоказників при номінальному моменті

показник	значення		змінення	
	$U = U_n$	$U_{ном}$	абсолютне	відносне
$U_1^*$	1	0,704	0,296	0,296
S	0,068	0,1585	-	-
$\omega$	97,5	88,02		16,6
$ I_1 $	49,7894	65,0495	-17,2601	-0,35
$ I_2 $	38,7650	59,1819	-20,4169	-0,53
$\Delta P_{m1}$	1413	2412	-999	-0,707
$\Delta P_{m2}$	1600,4	3730,2	-2129,8	-1,33
$\Delta P$	3013,4	6142,2	-3128,8	-1,038
$P_{мех}$	2192,9	1979,9	213	0,097
$\eta$	0,8792	0,7632	0,116	-
$\cos \varphi$	0,7590	0,8583	-	-0,130
$Q_1$	21394	15511	5883	0,274



## ВИСНОВКИ

1. Розроблено програму розрахунку статичних характеристик АД який одержує живлення від джерела напруги;
2. Отримано залежності напруги від струму статора, моменту, реактивної енергії при яких забезпечується екстремальний характер енергопоказників;
3. Оптимальна система управління АД з підтримкою мінімального струму статора або реактивної потужності може будуватися як система стабілізації швидкості.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Энергосберегающий асинхронный электропривод // И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
2. Казачковский М. М., Комплектные электроприводы: Уч. пособие. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 226 с.
3. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
4. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
5. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: «Академия», 2006. – 304с.
6. Браславский И. Я, Зубрицкий О. Б. Куцин В. В. К определению мощности тиристорных асинхронных электроприводов при параметрическом управлении // Электротехника. — 1974. — № 10. — С. 23—26.
7. Браславский И. Я., Зюзев А. М, Трусов Н. П. Сравнительный анализ способов регулирования подачи центробежных насосов // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. — 1983. — Вып. 2 (112). — С. 8-10.
8. Браславский И. Я. О снижении энергопотребления асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения// Электричество. - 1988. - № 11. - С. 58-60.
9. Импульсный регулируемый электропривод с фазными электродвигателями // Э. В. Шикуть, М.И. Крайцберг, П. А. Фукс и др. — М.: Энергия, 1972. — 104 с.
10. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. — М.: Энергия, 1967. — 200 с.

11. Браславский И. Я., Зюзев А. М., Костылев А. В. Баланс реактивной мощности в системе тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель // Электротехника. — 2000. — № 1. — С. 30—33.
12. Онищенко Г. Б., Юньков М. Г. Электропривод турбомеханизмов. — М.: Энергия, 1972. — 240 с.
13. Шубенко В. А., Браславский И. Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. — М.: Энергия, 1972. — 200с.
14. Сандлер А. С., Гусяцкий Ю. М. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями. — М.: Энергия, 1968. — 96 с.
15. Braslavsky I. Ya., Zuzev A.M. Shilin S.I. Software for thyristor voltage regulator — asynchronous motor (TVR — AM) system// Proceedings of the 2nd international Conference «Electrical Engineering Analysis and Design». — Southampton, 1993. — P. 153—159.
16. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. — М.: ИК «ЯГОРБА» — Биоинформсервис, 1998. — 180 с.
17. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 224 с.
18. Фираго Б. И. Расчет характеристик и показателей трехфазных вентильных двигателей переменного тока / Б. И. Фираго // Вестник Кременчугского государственного университета им. М. Остроградского. — Кременчуг: КГУ, 2010. — Вып. 3/2010 (62). Часть 1. — С. 48-52.

## додаток А

## Розрахунок параметрів АМ

Розрахунок параметрів АМ з КЗР.

$$x_m = r_1 \sqrt{\frac{1 - \cos^2 \varphi_{xx}}{\cos^2 \varphi_{xx}}} - x_1 = \frac{r_1}{\cos \varphi_{xx}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{xx}} - x_1 = r_1 \operatorname{tg} \varphi_{xx} - x_1$$

$$Z_{xx} = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} = \frac{U_1}{I_{xx}}$$

$$(x_1 + x_m)^2 = \left(\frac{U_1}{I_{xx}}\right)^2 - r_1^2$$

$$x_m = \sqrt{\left(\frac{U_1}{I_{xx}}\right)^2 - r_1^2} - x_1$$

## додаток Б

## Скрипт-файл розрахунку статичних характеристик АМ

```

clearall
closeall
% MTKB411-6;

Pn = 22e3;
nn = 935;
zp = 3;
cosFxx = 0.07;
I1n = 50;
r1 = 0.19;
x1 = 0.31;
I2n = 37;
r2 = 0.355;
x2 = 0.375;
Jd = 0.475;

U1n = 220;
I1xx = 29.7;
% =====
% Xm = (r1 / cosFxx) * sqrt (1-cosFxx ^ 2) -x1
xm = sqrt ((U1n / I1xx) ^ 2-r1 ^ 2) -x1;
xr = x2 + xm;

f = 50;
wc = 2 * pi * f;
Lm = xm / wc;
% -----
wn = pi * nn / 30;
Mn = Pn / wn
Mm = 3 * Mn
n0 = 1000;
w0 = pi * n0 / 30;

sn = (w0-wn) / w0

% ===== v kompl vide =====
U1 = j * U1n;
s = 0.065;
U1_ = linspace (0.2,1,99);% (0.2,1,99)
U1v = U1_ * U1n;
sv = linspace (0,0.4,201);

```

```

for d = 1: length (U1_) % Po U1
for q = 1: length (sv) % Po s
    U1 = j * U1v (d);
    s = sv (q);
Zem2 = j * xm * (j * x2 * s + r2) / (j * xr * s + r2);
Z1 = r1 + j * x1;
Zad = Z1 + Zem2;
I1 = U1 / Zad;
E0 = U1-Z1 * I1;
I0 = E0 / (j * xm);
I2 = s * E0 / (r2 + j * x2 * s);
% -----
% 1)
I2 = -I2;
Me (q, d) = (2) * (3/2) * zp * Lm * (imag (I1) * real
(I2) -real (I1) * imag (I2));
% 2)
mI1 (q, d) = abs (I1); mI2 (q, d) = abs (I2);
DP1 (q, d) = 3 * mI1 (q, d) ^ 2 * r1;
DP2 (q, d) = 3 * mI2 (q, d) ^ 2 * r2;
DP (q, d) = DP1 (q, d) + DP2 (q, d);
% 3)
Pmex (q, d) = Me (q, d) * w0 * (1-s);
kpd (q, d) = Pmex (q, d) / (Pmex (q, d) + DP (q, d));
% 4)
cosF (q, d) = imag (I1) / mI1 (q, d);
% 5)
Q (q, d) = 3 * abs (U1) * real (I1);
end% For q = 1: length (sv)% po s
figure (1)
fh = figure (1)
    set (fh, 'Color', 'White')
plot (Me (:, d), sv)
holdon
end% D = 1: length (I1v)% po U1

% ----- postroenie grafikov -----
% MX AD
figure (1)
set (gca, 'Ydir', 'Reverse')
xlabel ('Me, Nm')
ylabel ('S')
ylim ([0 1])
% Ydir ( 'reverse')
gridon
% Plot (Me, sv)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% pereschet na znasheniya M zavisimosti (U, M) %%

M_ = linspace (0.1,2,20);
Mv = M_ * Mn;
for m = 1: length (M_)
    M = Mv (m);
    for d = 1: length (U1_) % Po U1
        if M <max (Me (:, d))
            s_mom = linterp (Me (:, d), sv, M); % 1) naxodim
s
            s_m (m, d) = s_mom;
% 2) naxodim vse ostalnoe
            mI1_m (m, d) = linterp (sv, mI1 (:, d), s_mom);
            mI2_m (m, d) = linterp (sv, mI2 (:, d), s_mom);
            DP1_m (m, d) = linterp (sv, DP1 (:, d), s_mom);
            DP2_m (m, d) = linterp (sv, DP2 (:, d), s_mom);
            DP_m (m, d) = linterp (sv, DP (:, d), s_mom);
            Pmex_m (m, d) = linterp (sv, Pmex (:, d), s_mom);
            kpd_m (m, d) = linterp (sv, kpd (:, d), s_mom);
            cosF_m (m, d) = linterp (sv, cosF (:, d), s_mom);
            Q_m (m, d) = linterp (sv, Q (:, d), s_mom);
        else
            s_m (m, d) = nan;
            mI1_m (m, d) = nan;
            mI2_m (m, d) = nan;
            DP1_m (m, d) = nan;
            DP2_m (m, d) = nan;
            DP_m (m, d) = nan;
            Pmex_m (m, d) = nan;
            kpd_m (m, d) = nan;
            cosF_m (m, d) = nan;
            Q_m (m, d) = nan;
        end
    end%% po U1
end% Po M_

% Stroim grafiki
for m = 1: length (M_)
% -----
    figure (10)
    fh = figure (10)

```

```

    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (U1_, mI1_m (m, :))
    hold on
% -----
    figure (11)
    fh = figure (11)
    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (U1_, DP_m (m, :))
    hold on
% -----
    figure (12)
    fh = figure (12)
    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (U1_, kpd_m (m, :))
    hold on
% -----
    figure (13)
    fh = figure (13)
    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (U1_, cosF_m (m, :))
    hold on
% -----
    figure (15)
    fh = figure (15)
    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (U1_, Q_m (m, :))
    hold on

end% Po M_

figure (10)
grid on
xlabel ('U_1 ^ *')
ylabel ('| I_1 |')
xlim ([0 1])
% -----
figure (11)
grid on
xlabel ('U_1 ^ *')
ylabel ('\ DeltaP')
xlim ([0 1])
% -----
figure (12)
grid on
xlabel ('U_1 ^ *')
ylabel ('\ Eta')
```



```

xlim ([0 1])
% -----
figure (13)
gridon
xlabel ('U_1 ^ *')
ylabel ('Cos \ phi_1')
xlim ([0 1])
% -----
figure (15)
gridon
xlabel ('U_1 ^ *')
ylabel ('Q')
xlim ([0 1])

% =====
% === opredelenie minimumov ===
% M = 1
for m = 1: length (M_)
% Opredelenie napragneniy pri
    Ilmin (m) = min (mI1_m (m, :));
for d = 1: length (U1_) % Po U1
if mI1_m (m, d) == Ilmin (m)
    U_Ilmin (m) = U1_ (d);
% Skolgenie pri kotorom budet minI1
    s_Ilmin (m) = s_m (m, d);
end
end

    Qmin (m) = min (Q_m (m, :));
for d = 1: length (U1_) % Po U1
if Q_m (m, d) == Qmin (m)
    U_Qmin (m) = U1_ (d);
% Tok I1 pri kotorom budet minQ
    I_Qmin (m) = mI1_m (m, d);
% Skolgenie pri kotorom budet minQ
    s_Qmin (m) = s_m (m, d);
end
end

end% Po M_

% Nanesenie linij minimumov
figure (10)
plot (U_Ilmin, Ilmin, 'R')

```

```

hold on
plot (U_I1min, I1min, 'R.')

figure (15)
plot (U_Qmin, Qmin, 'R')
hold on
plot (U_Qmin, Qmin, 'R.')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Perechet regimov minimumov na drugie koordinaty:
% 1) zavisimosti U (M)

%% 1.1) zavisimost U (M) dla min I1
% Figure (101)
% Plot (M_, U_I1min)
% Title ('U ^ * (M ^ *) min I_1')
% Grid on
% Ylim ([0 1.05])
% Ylabel ('U_1 ^ *')
% Xlabel ('M ^ *')
%
%% 1.2) zavisimost U (M) dla min Q
% Figure (102)
% Plot (M_, U_Qmin)
% Title ('U ^ * (M ^ *) min Q_1')
% Grid on
% Ylim ([0 1])
% Ylabel ('U_1 ^ *')
% Xlabel ('M ^ *')

% 1.3) zavisimosti U (M) (OBE)
figure (103)
fh = figure (103)
set (fh, 'Color', 'White')
plot (M_, U_I1min, 'R') % Min I_1
hold on
plot (M_, U_Qmin) % Min Q
grid on
ylim ([0 1.05])
legend ('U ^ * (M ^ *) min I_1', 'U ^ * (M ^ *) min
Q_1', 4)
ylabel ('U_1 ^ *')
xlabel ('M ^ *')

% 2) zavisimosti U (I1)

```

```

%% 2.1) zavisimost U (I1) dla min I1 - uge est
% Figure (201)
% Plot (I1min, U_I1min, 'r')
% Hold on
% Plot (I1min, U_I1min, 'r.')
% Title ( 'U ^ * (I_1 *) min I_1')
% Grid on
% Ylim ([0 1])
%% Nachnem os xs 0
% XL = get (gca, 'xlim');
% XL (1) = 0;
% Xlim (XL)
% Ylabel ( 'U_1 ^ *')
% Xlabel ( 'I_1')
%
%% 2.2) zavisimost U (I1) dla min Q
% Figure (202)
% Plot (I_Qmin, U_I1min)
% Title ( 'U ^ * (I_1 *) min Q')
% Grid on
% Ylim ([0 1])
%% Nachnem os xs 0
% XL = get (gca, 'xlim');
% XL (1) = 0;
% Xlim (XL)
% Ylabel ( 'U_1 ^ *')
% Xlabel ( 'I_1')

% 2.3) zavisimosti U (I1) (OBE)
    figure (203)
    fh = figure (203)
    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (I1min, U_I1min, 'R') % Min I_1
    hold on
    plot (I_Qmin, U_I1min) % Min Q
    grid on
    ylim ([0 1.05])
% Nachnem os xs 0
    XL = get (gca, 'Xlim');
    XL (1) = 0;
    xlim (XL)
    legend ('U ^ * (I_1 *) min I_1', 'U ^ * (I_1 *) min
Q_1', 4)
    ylabel ('U_1 ^ *')
    xlabel ('I_1')

```

```

% 3) zavisimosti U (s)
%% 3.1) zavisimost U (s) dla min I1 - uge est
% Figure (301)
% Plot (s_I1min, U_I1min, 'r')
% Title ( 'U ^ * (s) min I_1')
% Grid on
% Ylim ([0 1])
% Ylabel ( 'U_1 ^ *')
% Xlabel ( 's')
%
%% 3.2) zavisimost U (s) dla min Q
% Figure (302)
% Plot (s_Qmin, U_I1min)
% Title ( 'U ^ * (s) min Q')
% Grid on
% Ylim ([0 1])
% Ylabel ( 'U_1 ^ *')
% Xlabel ( 's')

% 3.3) zavisimosti U (s) (OBE)
    figure (303)
    fh = figure (303)
    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (s_I1min, U_I1min, 'R') % Min I_1
    hold on
    plot (s_Qmin, U_I1min) % Min Q
    grid on
    xlim ([0 0.2])
    legend ('U ^ * (s) min I_1', 'U ^ * (s) min Q_1', 4)
    ylabel ('U_1 ^ *')
    xlabel ('S')

% 4) EMX s min pokazatelami
%% 4.1) zavisimost s (M) dla min I1 - uge est
% Figure (401)
% Plot (M_, s_I1min, 'r')
% Set (gca, 'ydir', 'reverse')
% Title ( 's (M) min I_1')
% Grid on
% Ylim ([0 0.5])
%%% Nachnem os xs 0
%% XL = get (gca, 'xlim');

```

```

%% XL (1) = 0;
%% Xlim (XL)
% Ylabel ( 's')
% Xlabel ( 'M ^ *')
%
%% 4.2) zavisimost s (M) dla min Q
% Figure (402)
% Plot (M_, s_Qmin)
% Set (gca, 'ydir', 'reverse')
% Title ( 's (M) min Q')
% Grid on
% Ylim ([0 0.5])
%%% Nachnem os xs 0
%% XL = get (gca, 'xlim');
%% XL (1) = 0;
%% Xlim (XL)
% Ylabel ( 's')
% Xlabel ( 'M ^ *')

% 4.3) zavisimosti U (s) (OBE)
    figure (403)
    fh = figure (403)
    set (fh, 'Color', 'White')
    plot (M_, s_I1min, 'R') % Min I_1
    hold on
    plot (M_, s_Qmin) % Min Q
    plot (Me (:, end) / Mn, sv, 'K--') % Est MX
    set (gca, 'Ydir', 'Reverse')
    grid on
    ylim ([0 0.5])
    legend ('S (M) min I_1', 'S (M) min Q_1', 'Est MX', 3)
    ylabel ('S')
    xlabel ('M ^ *')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 1) skolgenie dla min I1
s_opt_minI1 = s_I1min (1);

% 2) skolgenie dla min Q
s_opt_minQ = s_Qmin (1);

```