

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ**

Дніпродзержинський державний технічний університет

В.Б.Нізімов

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

**з навчальної дисципліни „Енергозбереження засобами
електропривода”**

**для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.05070204
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»**

Затверджено

редакційно-видавничою секцією
науково-методичної ради ДДТУ

_____, протокол № _____

Дніпродзержинськ

2012

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпродзержинського державного технічного університету заборонено.

Конспект лекцій з дисципліни з навчальної дисципліни „Енергозбереження засобами електропривода” для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.05070204 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»/ укл.: д.т.н., проф. Нізімов В.Б. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2012. - 144 с.

Укладач: В.Б.Нізімов,
професор, докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: О. В. Садовой
проф., доктор техн. наук

Рецензент: С.В.Количев,
доцент, канд..техн.наук кафедри ЕТЕМ

Затверджено на засіданні кафедри ЕТЕМ
Протокол № 1 від 30.008.2012 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
ТЕМА 1. ЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ НАРОДНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ.....	
ТЕМА 2 С. ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА...	
ТЕМА 3С. ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДА І СПОСОБИ ЇХ ЗНИЖЕННЯ.....	
ТЕМА 4. СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ГРАФІКИ СПОЖИВАННЯ.....	
ТЕМА 5С. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХА- НІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ.....	
ТЕМА 6. ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАСОБАМИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	
ТЕМА 7. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ.....	
ТЕМА 8С. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	
ТЕМА 9. ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ І МЕХАНІЗМАМИ.....	
ТЕМА 10. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	
ТЕМА 11. ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ І КОМПЛЕКСАХ.....	
ТЕМА 12 С. РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЯК ЗАСІБ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	
ТЕМА 13С. ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ТА ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ПРОДУКТИВ- НОСТІ ТУРБОМЕХАНІЗМУ ЗАСУВКОЮ ТА ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ РОБОЧОГО КОЛЕСА.....	

ВСТУП

Енергозбереження як діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів, - державна проблема, яка постала на порядок денний слідом за найважливішою політичною подією в житті України - здобуттям незалежності.

Збереження електричної енергії є важливою частиною загальної тенденції щодо захисту навколишнього середовища. Серед споживачів електричної енергії значну частку складають електродвигуни різного призначення, що споживають більше половини виробленої енергії. Саме тут закладені найбільші резерви енергозбереження.

Більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, а отже — з низькою ефективністю. Через недоліки проектування й експлуатації електропривода коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50%, що вимагає зниження встановленої потужності двигунів. Робота привода в недовантаженому режимі призводить до величезних втрат, не враховуючи зниженого значення коефіцієнта потужності, оскільки загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у країні складає близько 40...50 млн кВт. Сумарна ж установлена потужність двигунів у СНД приблизно дорівнює 550 млн кВт.

Зростаюча складність одержання енергії, подальший розвиток енергоємних технологій, необхідність безаварійної роботи машин і механізмів вимагає використання регульованого електропривода. Перехід до регульованого електропривода змінного струму окремих механізмів дозволить заощадити до 50 % енергоресурсів.

Недавній прогрес у напівпровідниковій індустрії, особливо в силовій електроніці і мікроконтролерах, зробив приводи з регулюванням частоти обертання більш практичними і значно дешевшими. На сьогодні регульовані приводи вимагаються не лише у промисловому виробництві, як наприклад, обробні машини чи підйомні крани, але усе більше в побутовій техніці, наприклад, у пральних машинах, компресорах, невеликих насосах, кондиціонерах повітря тощо.

Наданому етапі розвитку промисловості в Україні особливого значення набувають питання розробки та широкого впровадження методів і способів керування енергоефективністю (енергозбереженням) засобами промислового електропривода, оскільки з однієї сторони гостро постала проблема економії електроенергії, а з іншого боку, - з'явилася реальна можливість її ефективного використання стосовно головного її споживача - електропривода.

Енергозбереження в електроприводі є частиною загального процесу ефективного використання електроенергії і визначається трьома процесами:

- енергоспоживанням;

- енерговикористанням споживаної енергії;
- енергоуправлінням процесу енергоспоживання.

Енергоспоживання - процес формування складових потужності на вході перетворювача при роботі електропривода. Цей процес характеризується залежностями активної, реактивної і потужності перетворення від швидкості і моменту двигуна.

У питаннях енергоспоживання необхідне чітке уявлення про характер перетворення енергії, складові потужності, про показники якості електроенергії (ПЯЕ), їх вплив на характеристики електромеханічних перетворювачів.

Енерговикористання — використання потужності споживаної з мережі. Цей показник характеризує якісну сторону процесу енергоспоживання. Він показує, наскільки ефективно використання споживаної електроенергії, яка частина її належить до втрат, а яка - до корисної потужності, що йде на вал робочої машини, як розподіляються втрати, що визначають робочий режим електродвигуна, його температуру і надійність.

У питаннях енерговикористання найважливішим є баланс складових потужності, що дозволяє виявити механізми старіння електроустаткування на додачу до відомих і пов'язаних в основному з термічним характером впливу енергопроцесів на робочі й експлуатаційні характеристики.

Енергоуправління - процес формування режимів енергоспоживання за допомогою технічних пристроїв і систем, що впливають на кола керування електроприводом та перетворювальними пристроями, що живлять ці кола. До енергоуправління варто віднести керування перерозподілом втрат в електричних двигунах, оптимізацію втрат, мінімізацію нагрівання активних частин електричної машини, зниження рівнів споживаної реактивної потужності і генерування гармонік струму. При цьому варто мати на увазі те, що зазначені вище позитивні властивості система електропривода здобуває не за рахунок використання деяких інших технічних засобів, а за рахунок використання регульовальних можливостей системи електропривода.

Такий енергетичний підхід, що базується на спільності процесів енергоспоживання, енерговикористання і енергоуправління, зв'язує в єдиний електромеханічний комплекс елементи, що розглядалися раніше без взаємозв'язку: енергосистема, споживач (електропривод) і технологічна установка. Кожний з компонентів має свої регульовальні можливості в галузі керування енергоспоживанням, перерозподілом втрат тощо.

ТЕМА 1

ЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ НАРОДНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

Енергозбереження як діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів, - державна проблема, яка постала на порядок денний слідом за найважливішою політичною подією в житті України - здобуттям незалежності.

Збереження електричної енергії є важливою частиною загальної тенденції щодо захисту навколишнього середовища. Серед споживачів електричної енергії значну частку складають електродвигуни різного призначення, що споживають більше половини виробленої енергії. Саме тут закладені найбільші резерви енергозбереження.

Більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, а отже — з низькою ефективністю. Через недоліки проектування й експлуатації електропривода коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50%, що вимагає зниження встановленої потужності двигунів. Робота привода в недовантаженому режимі призводить до величезних втрат, не враховуючи зниженого значення коефіцієнта потужності, оскільки загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у країні складає близько 40...50 млн кВт. Сумарна ж установлена потужність двигунів у СНД приблизно дорівнює 550 млн кВт.

Зростаюча складність одержання енергії, подальший розвиток енергоємних технологій, необхідність безаварійної роботи машин і механізмів вимагає використання регульованого електропривода. Перехід до регульованого електропривода змінного струму окремих механізмів дозволить заощадити до 50 % енергоресурсів.

Недавній прогрес у напівпровідниковій індустрії, особливо в силовій електроніці і мікроконтролерах, зробив приводи з регулюванням частоти обертання більш практичними і значно дешевшими. На сьогодні регульовані приводи вимагаються не лише у промисловому виробництві, як наприклад, обробні машини чи підйомні крани, але усе більше в побутовій техніці, наприклад, у пральних машинах, компресорах, невеликих насосах, кондиціонерах повітря тощо.

Наданому етапі розвитку промисловості в Україні особливого значення набувають питання розробки та широкого впровадження методів і способів керування енергоефективністю (енергозбереженням) засобами промислового електропривода, оскільки з однієї сторони гостро постала проблема економії електроенергії, а з іншого боку, - з'явилася реальна можливість її ефективного використання стосовно головного її споживача - електропривода.

Енергозбереження в електроприводі є частиною загального процесу ефективного використання електроенергії і визначається трьома процесами:

- енергоспоживанням;
- енерговикористанням споживаної енергії;
- енергоуправлінням процесу енергоспоживання.

Енергоспоживання - процес формування складових потужності на вході перетворювача при роботі електропривода. Цей процес характеризується залежностями активної, реактивної і потужності перетворення від швидкості і моменту двигуна.

У питаннях енергоспоживання необхідне чітке уявлення про характер перетворення енергії, складові потужності, про показники якості електроенергії (ПЯЕ), їх вплив на характеристики електромеханічних перетворювачів.

Енерговикористання — використання потужності споживаної з мережі. Цей показник характеризує якісну сторону процесу енергоспоживання. Він показує, наскільки ефективно використання споживаної електроенергії, яка частина її належить до втрат, а яка - до корисної потужності, що йде на вал робочої машини, як розподіляються втрати, що визначають робочий режим електродвигуна, його температуру і надійність.

У питаннях енерговикористання найважливішим є баланс складових потужності, що дозволяє виявити механізми старіння електроустаткування на додачу до відомих і пов'язаних в основному з термічним характером впливу енергопроцесів на робочі й експлуатаційні характеристики.

Енергоуправління - процес формування режимів енергоспоживання за допомогою технічних пристроїв і систем, що впливають на кола керування електроприводом та перетворювальними пристроями, що живлять ці кола. До енергоуправління варто віднести керування перерозподілом втрат в електричних двигунах, оптимізацію втрат, мінімізацію нагрівання активних частин електричної машини, зниження рівнів споживаної реактивної потужності і генерування гармонік струму. При цьому варто мати на увазі те, що зазначені вище позитивні властивості система електропривода здобуває не за рахунок використання деяких інших технічних засобів, а за рахунок використання регульовальних можливостей системи електропривода.

Такий енергетичний підхід, що базується на спільності процесів енергоспоживання, енерговикористання і енергоуправління, зв'язує в єдиний електромеханічний комплекс елементи, що розглядалися раніше без взаємозв'язку: енергосистема, споживач (електропривод) і технологічна установка. Кожний з компонентів має свої регульовальні можливості в галузі керування енергоспоживанням, перерозподілом втрат тощо.

В Україні діє потужний, високорозвинений електроенергетичний комплекс із повним технологічним циклом вироблення, розподілу, збуту електричної і теплової енергії. Основа електроенергетики України - Об'єднана енергетична система, що здійснює централізоване енергопостачання промисловості і населення країни, взаємодіє з енергосистемами сусідніх країн, забезпечує експорт і імпорт електроенергії. Вона поєднує 8 регіональних електроенергетичних систем, зв'язаних між собою системоутворюючими і міждержавними ЛЕП напругою 750,

330-500, 220 кВ. Вироблення електроенергії здійснюється тепловими, атомними і гідроелектростанціями 7 енергогенеруючих компаній і акціонерних товариств, її розподіл виконує 27 енергопостачальних компаній, 13 з яких приватизовані. Передача електричної енергії від енергогенеруючих компаній і акціонерних товариств енергопостачальним компаніям здійснюється магістральними електромережами і розподільними — до споживачів.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА. Установлена потужність теплових електростанцій України на 01.01.2003 р. становила 36,4 млн кВт або 68,8 % загальної встановленої потужності. На ТЕС експлуатується 104 енергоблоки потужністю від 150 до 800 Мвт, 90 з яких - на вугіллі. Комбіноване виробництво електричної і теплової енергії здійснюється на ТЕЦ, що входять до складу систем централізованого тепlopостачання й охоплюють майже 63% побутових споживачів. Загальна потужність ТЕЦ складає 7,1 млн кВт. Питома вага електростанцій у відпусканні тепла для потреб централізованого тепलोзабезпечення сягає 23%.

АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА. Атомна енергетика України є потужною й ефективною галуззю. Зараз АЕС виробляють 45,3% всієї електроенергії України. До структури ядерно-енергетичного комплексу України входять:

- державний департамент ядерної енергетики в складі Міністерства палива й енергетики України;
- 5 атомних електростанцій у складі НАЕК «Енергоатом»;
- підприємства атомної промисловості;
- державні науково-дослідні центри, медико-санітарні частини, акціонерні підприємства, державний пакет акцій яких знаходиться в керуванні Мінпаливенерго.

Після зупинки 15.12.2000р. енергоблоку №3 ЧАЕС загальна встановлена потужність 4-х атомних електростанцій України становить 11,8 млн. кВт.

ГІДРОЕНЕРГЕТИКА. Установлена потужність ГЕС України складає 4,7 млн кВт або 8,9% від загальної встановленої потужності електростанцій. ГЕС відіграють істотну роль у покритті пікових навантажень енергосистеми. У Дніпровський каскад входять шість ГЕС сумарною потужністю 3,7 млн. кВт, а з урахуванням Київської ГАЕС — 3,9млн кВт. Вони підпорядковані енергогенеруючій компанії ГАГК «Дніпрогідроенерго».

НЕТРАДИЦІЙНА ЕНЕРГЕТИКА. До нетрадиційних поновлюваних джерел енергії (НДЕ), що вважаються перспективними для України, належать такі: енергія вітру, сонячна (геліоенергетика), геотермальна енергія, біомаса, а також енергія малих водотоків. В 2003 р. НДЕ вироблено 7,9 млн. кВт електроенергії.

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ. Електричні мережі Мінпаливенерго України нараховують понад 1млн км повітряних і кабельних ліній (ПЛ і КЛ) електропередачі всіх класів напруги, а також 206846 одиниць трансформаторних підстанцій (ТП) напругою 6-750 кВ загальною потужністю 202204МВА. Електропостачання промислових і побутових споживачів України здійснюється в основному за допомогою 27 акціонерних енергопостачальних компаній, що виконують експлуатаційне обслуговування розподільних електромереж напругою 0,4-150 кВ. Магістральні електричні мережі напругою 220-750 кВ і міждержавні напругою 35-800 кВ є власністю держави, їх експлуатує одна з компаній Мінпаливенерго Украї-

ни НЕК «Укренерго», що забезпечує постійну і надійну роботу Об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України, здійснюючи оперативно-технологічне керування ОЕС.

Для експлуатації електроенергетичного господарства в складі НЕДО «Укренерго» за регіональною ознакою утворено 8 електроенергетичних систем. У цілому Мінпаливенерго нараховує 131 підстанцію напругою 220 кВ і вище загальною потужністю 76785 МВА. Довжина ПЛ напругою 220-750 кВ складає майже 22 тис. км. Зараз в Україні функціонує 7 підстанцій напругою 750 кВ загальною потужністю 15622 МВА.

Це такі підстанції: Західно - Українська, Вінницька, Запорізька, Дніпровська, Донбаська, Південно-Донбаська, Західно-Донбаська. Довжина ПЛ електропередачі напругою 750 кВ складає 4,1 тис. км. Існуючі магістральні електричні мережі енергосистеми України забезпечують у повному обсязі необхідну при розподілі енергетичних потоків і надійну видачу потужностей АЕС у нормальних режимах.

Розподільні електричні мережі напругою 0,4-150 кВ охоплюють усю територію України і виконують в основному функцію розподілу і передачі електричної енергії безпосередньо споживачу.

Однією з проблем української енергетики є те, що їй бракує маневрових потужностей, які дозволяють покривати попит на електроенергію під час пікових навантажень, а також перетоки електроенергії. За 5 місяців 1998 р. українська енергетика була в зимовій кризі, (дефіцит потужності складав понад 4 млн. кВт) і у весняній кризі (надлишок потужності складав майже 7-8 млн. кВт). Частота напруги коливалася від мінімального рівня 49,1 Гц до максимально припустимого рівня - 50,4 Гц. З серпня 2001 року енергосистема України перейшла на паралельну роботу з ОЕС Росії, і ситуація з частотою стабілізувалася.

Основні показники роботи ОЕС України в перспективі до 2030 року наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Рік	Встановлена потужність електростанцій, млн.кВт	Виробництво електроенергії, млрд.кВтг.	Споживання електроенергії, (брутто), в ОЕС України, млрд.кВтг.	Максимум навантаження ОЕС, млн.кВт
2002	52,9	171,7	169,9	28
2003	52,9	173	174,7	28,2
2004	53,4	174	170	28,3
2005	54,9	175	170	28,5
2010	57,3	190	85	30
2015	58,7	210	202	32
2020	59,7	230	222	35
2025	62	260	250	38
2030	65	280	270	40

Структура потужностей за генеруючими джерелами на перспективу до 2030 року, млн.кВт наведена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Рік	Тип генеруючих джерел			
	ТЕС	АЕС	ГЕС і ГАЕС	НДЕ
2001	36,4	12,8	4,7	0,04
2002	36,4	11,8	4,7	0,04
2003	36,4	11,8	4,7	0,04
2004	36,6	11,8	5	0,05
2005	36,6	12,8	5,5	0,05
2010	36,9	13,8	6,5	0,08
2015	37,8	13,8	7	0,01
2020	38,5	13,8	7,2	0,04
2025	40,7	13	7,8	0,05
2030	42,3	13	8,7	1

Загальна втрата електроенергії складається з двох частин: номінальних втрат, що визначаються умовами роботи при номінальних режимах і оптимальному виборі параметрів системи електропостачання, і додаткових втрат, обумовлених відхиленням режимів і параметрів від номінальних значень. Економія електроенергії в системах електропостачання ґрунтується на мінімізації як номінальних, так і додаткових втрат.

Заходи щодо ефективного використання електричної енергії варто вибирати, виходячи з принципу досягнення мінімуму витрат при виконанні умов надійності системи електропостачання і якості електричної енергії. Необхідно вживати заходи щодо зниження втрат і підвищення рівня експлуатації елементів системи електропостачання.

Основним напрямом в галузі енергозбереження є економія електроенергії при її передачі, розподілі і використанні. Реальне енергозбереження стосується питань роботи електропостачальних мереж, перетворювачів енергії всіх типів і технологічних механізмів.

Енергозберігаючими заходами при передачі електроенергії є:

- 1) раціональний вибір рівня напруги мережі живлення і роду струму (постійний чи змінний);
- 2) прийняття економічно доцільного перетину проводів і кабелів;
- 3) підвищення коефіцієнта потужності;
- 4) наближення джерел живлення до споживачів;
- 5) оптимізація графіків навантажень тощо.

Витрати електроенергії на її передачу непродуктивні, тому необхідно зводити їх значення до мінімуму. В електричних мережах України втрати (теоретичні) електричної енергії складають близько 11%. Фактично у 2002 році вони склали 20,04% - завдяки відсутності належного обліку електричної енергії, наявності неефективної системи управління, яка існує в державі. У розвинутих країнах цей показник значно нижчий. Наприклад, у ФРН втрати в мережах складають 6,5%.

Ефективність впровадження енергозберігаючих заходів споживачами електроенергії може бути значно вищою, оскільки понад 90% виробленої енергії споживається системами електропривода, електротехнологічними й освітлювальними установками.

Найбільші резерви енергозбереження закладені в удосконаленні електропривода, на частку якого приходиться близько 60% усієї споживаної електроенергії. У деяких галузях промисловості споживання електроенергії електроприводом досягає 80%. Зменшення швидкості двигуна до швидкості робочого механізму допомагає заощаджувати енергію і поліпшує керування технологічним процесом. У той же час про економічність привода говорити рано, хоча б у силу малих фактичних значень його коефіцієнтів завантаження. Електропривод у порівнянні з іншими типами приводів має ряд переваг:

- робота без відходів і безшумність створює комфорт для людей;
- високий ККД, тобто виділяються менші теплові втрати. Внаслідок цього зменшуються габарити устаткування і площа охолодження;
- електропривод регульований і оборотний.

Електроприводи зі складним, складно керованим технологічним процесом складають невелику частку від загального числа. Основна ж їх частина — прості, звичайно нерегульовані масові пристрої, як наприклад, вентилятори, насоси, конвеєри, підйомні крани, механізми в переробній промисловості, будівництві тощо. Саме ці об'єкти є основними споживачами електроенергії і тут можлива реальна її економія.

Розглянемо процеси, що впливають на енергозбереження в електроприводі і визначальні тенденції його розвитку:

- 1) збільшення енергоємних технологій при зростаючій складності одержання енергії, дефіциті доступних енергоресурсів. Добути тонну палива і виробити відповідну кількість електроенергії приблизно вдвічі дорожче, ніж заощадити. Надалі ця різниця зростатиме;
- 2) ускладнення технології, що призводить до збільшення частки регульованого чи керованого по пуску електропривода. Закінчується дискусія про можливі варіанти регульованого електропривода - практично однозначно вибір робиться на користь електропривода змінного струму;
- 3) зростаючі вимоги створення умов для безаварійної роботи електропривода за рахунок підвищення ефективності керування режимами енерговикористання електричних машин, енергопостачальних мереж;
- 4) бурхливий розвиток перетворювальної техніки (тиристорів, що запираються, силових транзисторів) та засобів керування (мікроелектроніки, мікропроцесорної техніки тощо);
- 5) поява доступних кожному інженеру потужних обчислювальних засобів, що відкривають нові можливості раціонального проектування й оптимізації електропривода.

Тому актуальною є задача розробки і широкого впровадження енергозберігаючих заходів і засобів промислового електропривода.

Контрольні питання до теми 1

1. Визначити втрати потужності в ЛЕП.
2. Яка залежність між опором дротів та втратами електроенергії?
3. Які втрати енергії виникають при передачі на змінному струму?
4. Визначити втрати реактивної потужності.
5. Визначити втрати потужності в трансформаторах.
6. Вкажіть, які втрати енергії виникають у двигунах постійного струму.

ТЕМА 2 С

ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Середньоквадратичний і максимальний струм навантаження

При передачі електричної енергії від джерел живлення до споживачів виникають втрати певної частини потужності та енергії в елементах системи електропостачання – лініях, трансформаторах, реакторах. Ці втрати залежать від величин струму, що проходить через елементи схеми електрозабезпечення і напруги. Наприклад, застосування підвищеної напруги 660 В замість 380 В, або 10 кВ замість 6 кВ, а також використання глибоких введів напругою 35 кВ і 110 кВ значною мірою зменшують втрати потужності та електроенергії.

Залежно від вихідних даних втрати потужності та електроенергії можна розрахувати: 1) по величині середньоквадратичного струму $I_{ск}$ та дійсному часу роботи електроспоживача T_{δ} ; 2) по величині максимального струму I_{max} протягом часу використання максимуму T_{max} при тривалості втрат τ .

Середньоквадратичний струм являє собою такий незмінний струму, який, проходячи через електроспоживач протягом часу T_{δ} , спричиняє такі само втрати потужності та електроенергії, як і дійсний змінний струм за цей же час.

Середньоквадратичний струм з достатньою, для практичних цілей точністю можна обчислити по розрахунковій потужності, котру визначають по коефіцієнту форми кривої $K_{ф.а}$, якщо $K_{ф.а}$ перебуває в межах від 1 до 1,2.

Втрати в повітряних і кабельних лініях електропередачі

Втрати потужностей в лініях електропередачі (ЛЕП) обчислюються за допомогою таких формул:

- 1) втрати активної потужності та енергії

$$\Delta P = 3 \cdot I_{ск}^2 R \cdot 10^{-3} = \frac{P_{ск}^2 + Q_{ск}^2}{U_{ном}^2} R \cdot 10^{-3}, \text{ кВт};$$

$$\Delta E_a = \Delta P \cdot T_{\partial}, \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

2) 2) втрати реактивної потужності та енергії

$$\Delta Q = 3 \cdot I_{ск}^2 X \cdot 10^{-3} = \frac{P_{ск}^2 + Q_{ск}^2}{U_{ном}^2} X \cdot 10^{-3}, \text{ кВАр};$$

$$\Delta E_p = \Delta Q \cdot T_{\partial}, \text{ кВАр} \cdot \text{год},$$

де $I_{ск}$ – середньоквадратичний струм ЛЕП, А;

T_{∂} – тривалість дійсної роботи ЛЕП, год;

R і X – активний і реактивний опори ЛЕП, Ом;

$U_{ном}$ – номінальна лінійна напруга ЛЕП, кВ.

Втрати електроенергії в ЛЕП по I_{max} і τ обчислюються з використанням формул:

$$\Delta E_a = 3 \cdot I_{max}^2 \cdot R \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$\Delta E_p = 3 \cdot I_{max}^2 \cdot X \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \text{ кВАр} \cdot \text{год};$$

Втрати у двообмоточних трансформаторах

Втрати активної потужності в трансформаторі складаються з втрат, що спричиняють нагрівання обмоток трансформатора ΔP_m , котрі залежать від струму навантаження, а також втрат, які викликають нагрівання сталі (магнітопровода) $\Delta P_{ст}$.

Втрати активної потужності, пов'язані з нагріванням обмоток:

1) по середньоквадратичному струму (потужності)

$$\Delta P_{ск} = 3 \cdot I_{ск}^2 R_T \cdot 10^{-3} = \frac{P_{ск}^2 + Q_{ск}^2}{U_{ном}^2} R_T \cdot 10^{-3}, \text{ кВт};$$

2) по максимальному струму

$$\Delta P_{max} = 3 \cdot I_{max}^2 R_T \cdot 10^{-3} = \frac{P_{max}^2 + Q_{max}^2}{U_{ном}^2} R_T \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}.$$

Втрати активної потужності, що викликають нагрівання сталі, прирівнюють до втрат при холостому ході трансформатора $\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx}$.

Повні втрати активної потужності в двообмоточному трансформаторі:

1) по середньоквадратичному струму (потужності)

$$\Delta P = \Delta P_{xx} + \frac{P_{ск}^2 + Q_{ск}^2}{U_{ном}^2} R_T \cdot 10^{-3}, \text{ кВт};$$

2) по максимальному струму

$$\Delta P = P_{xx} + \frac{P_{max}^2 + Q_{max}^2}{U_{ном}^2} R_T \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

де R_T – активний опір обмоток трансформатора

$$R_T = \frac{\Delta P_M U_{ном}^2 \cdot 10^3}{S_{ном}^2}, \text{ Ом};$$

ΔP_M – втрати в обмотках (міді) трансформатора при номінальному струмі, кВт;

$S_{ном}$ – повна номінальна потужність т трансформатора ($S_{ном} = U_{ном} \cdot I_{ном}$), кВА;

$U_{ном}$ – номінальна лінійна напруга, кВ.

Втрати реактивної потужності в трансформаторах складаються з втрат, спричинених розсіюванням магнітного потоку в трансформаторі $\Delta Q_{М.П.}$, котрі залежать від квадрата струму навантаження, і втрат, пов'язаних з намагнічуванням трансформатора ΔQ_{μ} не залежних від струму навантаження.

Індуктивний опір трансформатора обчислюється по формулі

$$X_T = \frac{\Delta u_k U_{ном}^2 \cdot 10}{S_{ном}}, \text{ Ом},$$

де u_k – напруга короткого замикання трансформатора, %.

Повні реактивні втрати у двох обмотковому трансформаторі:

1) по середньоквадратичному струму (потужності)

$$\Delta Q = 3 \cdot I_{ск}^2 X_T \cdot 10^{-3} + Q_{\mu} = \frac{P_{ск}^2 + Q_{ск}^2}{U_{ном}^2} X_T \cdot 10^{-3} + Q_{\mu}, \text{ кВАр};$$

2) по максимальному струму (потужності)

$$\Delta Q = 3 \cdot I_{max}^2 X_T \cdot 10^{-3} + \Delta Q_{\mu} = \frac{P_{max}^2 + Q_{max}^2}{U_{ном}^2} X_T \cdot 10^{-3} + \Delta Q_{\mu}, \text{ кВАр},$$

де $\Delta Q_{\mu} = 0,01 \cdot I_{XX} \% S_{ном}$, кВАр.

Якщо відоме навантаження трансформатора, то втрати активної та реактивної потужності можна визначити через паспортні параметри трансформатора:

$$\Delta P = K_3^2 \cdot \Delta P_M + \Delta P_{СТ}, \text{ кВт};$$

$$\Delta Q = \frac{u_k S^2}{100 S_{ном}} + \Delta Q_{\mu}, \text{ кВАр},$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження ($K_3 = I/I_{ном}$).

Якщо електроспоживач отримує електроенергію від двох і більше однотипних трансформаторів, то втрати потужності можна обчислити за допомогою формул:

$$\Delta P = m_T P_{СТ} + K_3^2 \frac{\Delta P_m}{m_T};$$

$$\Delta Q = m_T \Delta Q_{\mu} + \frac{u_k S^2}{m_T S_{ном} \cdot 100},$$

де m_T – кількість паралельно працюючих трансформаторів.

Приклад. Ремонтний цех підприємства отримує електроенергію від шин ГПП напругою 6 кВ лінією електропередачі, виконаною проводом А-95 довжиною $l=1,5$ км. На підстанції цеху встановлено два трансформатори, працюючих паралельно ($S_{ном}=1000$ кВА; $u_k\%=5,5\%$; $\Delta P_M=11,6$ кВт; $I_{x,x}=2,6\%$ від $I_{ном}$). Середньоквадратичний струм навантаження ЛЕП 6кВ $I_{ск}=230$ А; $T_\delta=4000$ год. за рік. Обчислити втрати активної та реактивної потужності, а також активної електроенергії в ЛЕП 6кВ і трансформаторах за рік.

Визначимо втрати активної та реактивної потужності в ЛЕП 6 кВ:

$$\Delta P_l = 3 \cdot I_{ск}^2 \cdot R_l \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 230^2 \cdot 0,51 \cdot 10^{-3} = 80,6 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_l = 3 \cdot I_{ск}^2 \cdot X_l \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 230^2 \cdot 0,54 \cdot 10^{-3} = 85,5 \text{ кВАр},$$

де активний і реактивний опір ЛЕП

$$R_l = r_0 l = 0,34 \cdot 1,5 = 0,51 \text{ Ом},$$

$$X_l = x_0 l = 0,36 \cdot 1,5 = 0,54 \text{ Ом}.$$

Для привода А-95 $r_0=0,34$ Ом/км; $x_0=0,36$ Ом/км.

Втрати активної електроенергії в ЛЕП 6 кВ за рік

$$\Delta E_{ал} = \Delta P_l \cdot T_\delta = 80,6 \cdot 4000 = 322400 \text{ кВт}\cdot\text{год}.$$

Втрати активної та реактивної потужності в трансформаторах від середньоквадратичного струму:

$$\Delta P_T = 2P_{XX} + \frac{3 \cdot I_{ск}^2 + R_T \cdot 10^{-3}}{m_T} = 2 \cdot 3,1 + \frac{3 \cdot 230^2 \cdot 0,42 \cdot 10^{-3}}{2} = 39,5 \text{ кВт};$$

$$R_T = \frac{\Delta P_M \cdot U_{ном}^2 \cdot 10^{-3}}{S_{ном}^2} = \frac{11,6 \cdot 6^2 \cdot 10^{-3}}{1000^2} = 0,42 \text{ Ом};$$

$$\Delta Q_T = 2\Delta Q_\mu + \frac{3 \cdot I_{ск}^2 + X_T \cdot 10^{-3}}{m_T} = 2 \cdot 26 + \frac{3 \cdot 230^2 \cdot 1,98 \cdot 10^{-3}}{2} = 209 \text{ кВАр};$$

$$\Delta Q_\mu = 0,01 \cdot I_{XX} \cdot S_{ном} = 0,01 \cdot 2,6 \cdot 1000 = 26 \text{ кВАр};$$

$$X_T = \frac{u_k \cdot U_{ном}^2 \cdot 10}{S_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 6^2 \cdot 10}{1000} = 1,98 \text{ Ом}.$$

Втрати активної електроенергії в трансформаторах за рік:

$$\Delta E_{a,T} = 2\Delta P_{XX} \cdot T_p + \frac{3 \cdot I_{ск}^2 \cdot R_T \cdot 10^{-3}}{2} T_\delta =$$

$$= 2 \cdot 3,1 \cdot 8760 + \frac{3 \cdot 230^2 \cdot 0,42 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 4000 = 187500 \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

де $T_p=8760$ – години перебування трансформатора під напругою протягом року.

При паралельній роботі кількох трансформаторів загальні витрати потужності в них можна зменшити, відключивши одного з них. Відключати доцільно, якщо сумарна повна потужність навантаження трансформаторів менша або дорівнює розрахунковій потужності:

$$S_{розр.} = S_{ном} \sqrt{m_T (m_T - 1) \frac{\Delta P'_{XX}}{\Delta P'_M}},$$

де $\Delta P'_{XX}$ – приведені втрати потужності холостого ходу трансформатора;
 $\Delta P'_M$ – приведені втрати потужності короткого замикання;
 m_T – число трансформаторів.

Величини $\Delta P'_{XX}$ і $\Delta P'_M$ визначають за допомогою формул:

$$\Delta P'_{XX} = \Delta P_{XX} + K_{n.б} \Delta Q_{XX};$$

$$\Delta P'_M = \Delta P_M + K_{n.б} \Delta Q_{КЗ},$$

де $K_{n.б}$ – коефіцієнт підвищення втрат, задається енергосистемою ($K_{n.б}=0,1-0,02$ кВт/кВАр);

ΔQ_{XX} – реактивна потужність холостого ходу трансформатора, що споживається ним при номінальному паспортному навантаженні:

$$\Delta Q_{XX} = \frac{S_{ном.Т} \cdot I_{XX}}{100}, \text{ кВАр};$$

$\Delta Q_{КЗ}$ – реактивна потужність трансформатора, що споживається ним при номінальному паспортному навантаженні:

$$\Delta Q_{КЗ} = \frac{S_{ном.Т} \cdot u_k}{100}, \text{ кВАр};$$

$I_{XX}\%$ – струм холостого ходу трансформатора, $\%I_{ном}$.

Активні втрати електроенергії за рік в трансформаторах:

1) по середньоквадратичному струму

$$E_a = \Delta P_{СТ} \cdot T_{річ} + 3 \cdot I_{ск} \cdot R_T \cdot T_d \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

2) по максимальному струму

$$E_a = \Delta P_{СТ} \cdot T_{річ} + 3 \cdot I_{max}^2 \cdot R_T \cdot r \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

де T_d – число годин протягом яких трансформатор завантажений;

r – години витрат;

$T_{річ}$ – число годин протягом року, коли трансформатор включений, якщо трансформатор включений цілий рік, то $T_{річ}=8760$ год.

Приклад. На підстанції підприємства встановлено три трансформатори типу ТМ-6300/35. $S_{ном}=6300$ кВА; $u_k\%=7,5\%$; $\Delta P_M=46,5$ кВт; $I_{x.x}=1,7\%$; $\Delta Q_{XX}=107$ кВАр; $\Delta Q_{КЗ}=475,0$ кВАр; $K_{n.б}=0,05$. Обґрунтувати доцільність відключення одного з трансформаторів, якщо знизиться навантаження на стороні електроспоживачів до 9000 кВА.

Визначимо приведені втрати потужності холостого ходу і короткого замикання, користуючись формулами (3.25) і (3.26)

$$\Delta P'_{XX} = 10,4 + 0,05 \cdot 107 = 15,75 \text{ кВт};$$

$$\Delta P'_M = 46,5 + 0,05 \cdot 475 = 70,2 \text{ кВт}.$$

Обчислимо розрахункову потужність сіх трьох паралельно працюючих трансформаторів, при котрій за втратами доцільно відключити один з трансформаторів, згідно співвідношенню

$$S_{розр.} = 6300 \sqrt{3(3-1) \frac{15,75}{70,2}} = 7000 \text{ кВА.}$$

Оскільки задане навантаження електроспоживачів 9000 кВА більше розрахункового 7000 кВА, то відключення трансформатора для зменшення втрат недоцільно.

Втрати потужності триобмоточних трансформаторів

Розрахунок втрат активної потужності в трьох обмотковому трансформаторі за умови 100%-го навантаження кожної з трьох обмоток можна виконати по формулі

$$\Delta P = \Delta P_{XX} + K_3^2 \Delta P_M,$$

де втрати ΔP_{XX} і ΔP_M містяться в довідкових матеріалах для 100%-го завантаження кожної обмотки.

Але в практиці не буває випадків 100%-го завантаження кожної з трьох обмоток. Тому обчислення втрат в трансформаторі по формулі дає завищені величини потужності. Щоб правильно підрахувати втрати потужності в трьох обмоткових трансформаторах, слід користуватися вихідними технічними даними, в котрих втрати потужності в обмотках задаються попарно у двох обмотках. У такому випадку активної втрати потужності в трансформаторі визначаються із співвідношення

$$\Delta P = \Delta P_{XX} + \Delta P_{охол} + K_{зв.Н.}^2 \Delta P_{мв.Н.} + K_{зс.Н.}^2 \Delta P_{мс.Н.} + K_{зН.Н.}^2 \Delta P_{мН.Н.},$$

де ΔP_{XX} – втрати потужності холостого ходу трансформатора, кВт;

$\Delta P_{охол}$ – потужність установок охолодження трансформатора, кВт (вказується в паспорті при завантаженнях трансформатора більше 70%);

$\Delta P_{мв.Н.}, \Delta P_{мс.Н.}, \Delta P_{мН.Н.}$ – втрати потужності в обмотці відносно вищої, середньої та нижчої напруги при 100%-му їх завантаженні, кВт;

$K_{зв.Н.}, K_{зс.Н.}, K_{зН.Н.}$ – коефіцієнт завантаження обмоток відповідно вищої, середньої та нижчої напруги.

Обчислення втрат потужності у кожній обмотці:

$$\Delta P_{мв.Н.} = \frac{\Delta P_{мв.Н-С.Н.} + \Delta P_{мв.Н-Н.Н.} - \Delta P_{мс.Н-Н.Н.}}{2}, \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{мс.Н.} = \frac{\Delta P_{мв.Н-С.Н.} + \Delta P_{мс.Н-Н.Н.} + \Delta P_{мв.Н-Н.Н.}}{2}, \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{мН.Н.} = \frac{\Delta P_{мв.Н-Н.Н.} + \Delta P_{мс.Н-Н.Н.} - \Delta P_{мв.Н-С.Н.}}{2}, \text{ кВт.}$$

Втрати активної електроенергії в трьох обмоткових трансформаторах за рік

$$\Delta E_a = \Delta P \cdot T_{річ} + \Delta P_{охол} T_{70} + (\Delta P_{мв.Н.} + \Delta P_{мс.Н.} + \Delta P_{мН.Н.}) T_{\partial}, \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

де $T_{річ}$ – число годин перебування під напругою;

T_{70} – число годин перебування під навантаженням 70% і більше;

T_{θ} – число годин під діючим навантаженням.

Втрати потужності електроенергії в реакторах

Величина втрат активної потужності в реакторах розраховується по формулі

$$\Delta P_p = 3 \cdot K_z^2 \Delta P_{ном.ф}, \text{ В},$$

де $\Delta P_{ном.ф}$ – втрати активної потужності в одній фазі реактора при номінальному навантаженні (містяться в каталогах), Вт;

$K_z = I/I_{ном}$ – відношення дійсного струму, що навантажує реактори, до номінального струму реактора.

Величина втрат реактивної потужності в реакторах

$$\Delta Q_p = 3 \cdot K_z^2 \Delta Q_{ном.ф}, \text{ В},$$

де $\Delta Q_{ном.ф}$ – втрати реактивної потужності в одній фазі (приводиться в каталогах), кВАр.

Витрати активної та реактивної електроенергії в трьох фазах реактора

$$E_a = \Delta P_p \cdot T_{\theta} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

$$E_p = \Delta Q_p \cdot T_{\theta}, \text{ кВАр}\cdot\text{год}.$$

Втрати електроенергії у двигунах в усталеному та перехідному режимах

Втрати в усталеному режимі. В усталеному режимі роботи електродвигунів втрати в них обчислюються як сума втрат в металі обмоток, сталі та механічних. Втрати в міді обмоток обчислюються, використовуючи формули:

1) для двигунів постійного струму

$$\Delta E = I_{ск}^2 \cdot r_0 \cdot T_{\theta} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

2) для синхронних двигунів

$$\Delta E_a = 3 \cdot I_{ск}^2 \cdot r_1 \cdot T_{\theta} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

3) для асинхронних двигунів

$$\Delta E_a = 3 \cdot I_{ск}^2 \cdot (r_1 + r_2') \cdot T_{\theta} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

де r_0 – опір обмотки якоря, Ом;

r_1 – опір обмотки статора синхронного двигуна, Ом;

$r_1 + r_2'$ – опір обмотки статора і приведений до статора опір ротора асинхронного двигуна, Ом.

Втрати в сталі (магнітні) електричних двигунів легко визначаються за допомогою приладів, котрими обладуються крупні двигуни (лічильник активної енергії, амперметр), в режимі холостого ходу, а для асинхронних двигунів з фазним ротором – по формулі:

$$E_{a.c} = (P_{XX} - I_{1.X}^2 \cdot r_1) \cdot T_0 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

де P_{XX} – потужність при розімкненому роторі, яку визначають по лічильнику або ваттметру, Вт;

$I_{1.X}$ – струм статора при розімкненому роторі, визначається по амперметру двигуна, А.

Оскільки втрати в сталі двигуна мало залежать від його навантаження, як і втрати механічні, то їх доцільно визначати в сумі з механічними. Механічні втрати в агрегаті та електричні втрати в сталі приводного двигуна обчислюються по формулі:

$$\Delta E_{\text{мех}} + \Delta E_{a.c} = (P_{XX} - 3 \cdot I_{XX}^2 \cdot r_1) \cdot T_0 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

машин постійного струму

$$\Delta E_{\text{мех}} + \Delta E_{a.c} = (P_{XX} - I_{XX}^2 \cdot r_0) \cdot T_0 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

де P_{XX} – потужність холостого ходу двигуна, з'єднаного з механізмом, визначається по ваттметру, Вт;

I_{XX} – струм холостого ходу двигуна, визначається по амперметру двигуна, А.

Для машин постійного струму втрати в сталі складають незначну частину порівняно з механічними втратами. Враховуючи до того ж, що на валу двигуна, крім власних втрат, є ще і механічні втрати приводного механізму, можна з достатньою точністю знехтувати втратами в сталі і вважати, що формула (3.45) визначає механічні втрати двигуна і механізму.

Додаткові втрати активної потужності при передачі реактивної потужності

Найбільші втрати активної потужності при передачі реактивної потужності підприємства:

$$\Delta P_{\text{max}} = \left(\frac{Q_{\text{max}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \sum R \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

де Q_{max} – найбільше реактивне навантаження підприємства, МВАр;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга, кВ;

R – активний опір живлячої ЛЕП і трансформатора, приведений до номінальної напруги ЛЕП, Ом.

Втрати активної потужності ΔP_e в момент найбільшого активного навантаження енергосистеми при передачі реактивної потужності:

$$\Delta P_e = \left(\frac{Q_e}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \sum R \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

де Q_e – реактивне навантаження, що відповідає найбільшому активному навантаженню енергосистеми, МВАр.

Найбільші втрати активної електроенергії при передачі реактивної потужності підприємства:

$$\Delta E_a = \Delta P_{\text{max}} \cdot r, \text{ кВт}\cdot\text{год}.$$

Втрати активної електроенергії в період найбільшого навантаження енергосистеми при передачі реактивної потужності:

$$\Delta E_e = \Delta P_e \cdot r, \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Контрольні питання до теми 2 С

1. Визначити втрати потужності і ЛЕП.
2. Яка залежність між опором дротів та втратами електроенергії?
3. Які втрати енергії виникають при передачі на змінному струмі?
4. Визначити втрати реактивної потужності.
5. Визначити втрати потужності в трансформаторах.
6. Вкажіть, які втрати енергії виникають у двигунах постійного струму?

ТЕМА 3С.

ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДА І СПОСОБИ ЇХ ЗНИЖЕННЯ

У перехідних режимах струми, що проходять по обмотках двигуна, істотно перевищують номінальні значення і викликають підвищені втрати енергії, тобто додаткове нагрівання двигуна. Особливо великого значення набуває визначення втрат електроенергії в перехідних процесах для електроприводів, у яких динамічний режим є основним або займає помітний час протягом циклу (електроприводи прокатних станів, підйомних кранів, шахтних підйомних машин).

Втрати енергії за час перехідного процесу:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пн}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{пн}}} (K + V) dt = \int_0^{t_{\text{пн}}} K dt + \int_0^{t_{\text{пн}}} V dt = \Delta W_K + \Delta W_V,$$

де ΔW_K і ΔW_V — втрати енергії обумовлені відповідно постійними і змінними втратами потужності.

Звичайно приймають, що постійні втрати потужності не змінюються за час перехідного процесу:

$$\Delta W_K = \int_0^{t_{\text{пн}}} K dt = K t_{\text{пн}}.$$

Точне обчислення інтеграла змінних втрат у багатьох випадках ускладнюється через те, що необхідно знати закон зміни струмів двигуна в перехідному процесі $i(t)$ і мати у своєму розпорядженні дані про зміну R . Зручніше виражати втрати електроенергії в перехідних процесах, якщо змінні втрати потужності представити через механічні величини.

Потужність змінних втрат у ДПС.

$$\Delta P = I^2 r_{\text{я}} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s, \quad (\Delta P = P_C - P = P_C s),$$

де $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – відносний перепад швидкості (ковзання двигуна).

З урахуванням рівняння руху електропривода:

$$\Delta P = M\omega_0 s = \left(M + J \frac{d\omega}{dt} \right) \omega_0 s = M_C \omega_0 s + J \omega_0 s \frac{d\omega}{dt}.$$

Втрати енергії:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} M_C \omega_0 s dt + \int_0^{t_{\text{пп}}} J \omega_0 s d\omega.$$

Приймаємо $M_C = 0$. Змінюємо $d\omega$ на ds :

$$\omega = \omega_0(1 - s),$$

$$d\omega = -\omega_0 ds,$$

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} -J \omega_0^2 s ds.$$

Змінимо границі інтегрування. Моменту часу $t=0$ буде відповідати $s = s_{\text{поч}}$, а часу $t_{\text{пп}}$ – відповідати $s = s_{\text{кін}}$.

$$\Delta W = \int_{s_{\text{поч}}}^{s_{\text{кін}}} -J \omega_0^2 s ds = \int_{s_{\text{поч}}}^{s_{\text{кін}}} J \omega_0^2 s ds = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2).$$

Визначимо втрати енергії при пуску, реверсі і гальмуванні двигунів.

При пуску двигунів без навантаження $\omega_{\text{поч}} = 0$, $\omega_{\text{кін}} = \omega_0$. Тоді $s_{\text{поч}} = 1$, $s_{\text{кін}} = 0$ (рис.3.1).

$$\Delta W_{\text{п}} = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

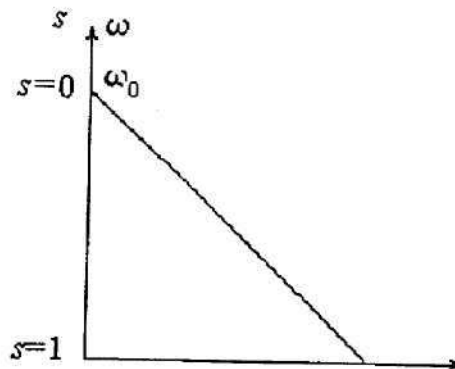


Рисунок 3.1

Втрати енергії при пуску дорівнюють величині кінетичної енергії, що буде запасена до кінця пуску в частинах електропривода, що рухаються.

Для динамічного гальмування $s_{\text{поч}} = 0$, $s_{\text{кін}} = 1$ (рис.3.2)

$$\Delta W_{\text{дг}} = -J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

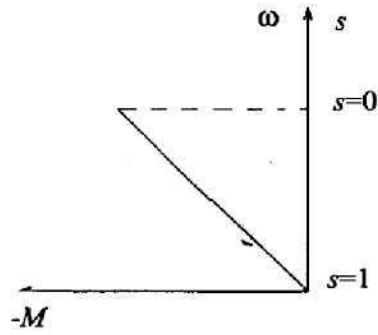


Рисунок 3.2

При динамічному гальмуванні весь запас кінетичної енергії перетворюється у втрати енергії, які виділяються в двигуні у вигляді тепла.

Для режиму противмикання $\omega_{\text{поч}} = \omega_0$ і $\omega_{\text{кін}} = 0$. Тоді $s_{\text{поч}} = 2$, $s_{\text{кін}} = 1$ (рис.3.3)

$$\Delta W_{\text{ПВ}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (4 - 1) = 3J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

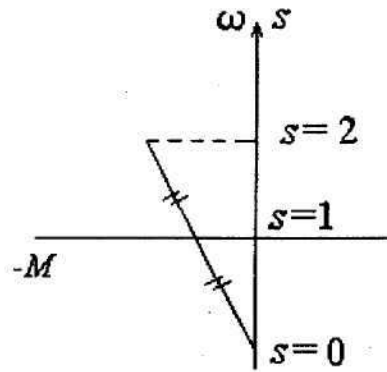


Рисунок 3.3

При проти ввімкненні втрати енергії дорівнюють потрійному запасу кінетичної енергії електропривода.

Для режиму реверсу $\omega_{\text{поч}} = \omega_0$ і $\omega_{\text{кін}} = -\omega_0$. Тоді $s_{\text{поч}} = 2$, $s_{\text{кін}} = 0$ і втрати енергії складуть (рис.3.4)

$$\Delta W_{\text{P}} = 4J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

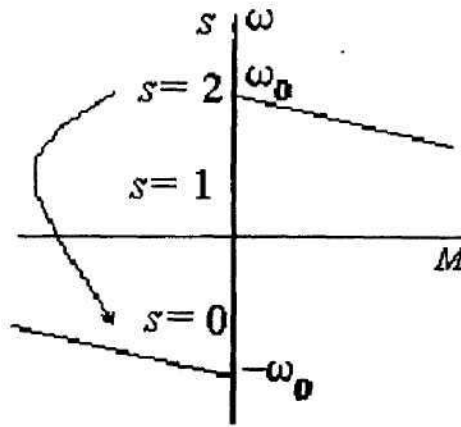


Рисунок 3.4

Втрати енергії дорівнюють сумі втрат при гальмуванні проти ввімкненням і пуску.

Втрати енергії в роторі АД виражаються так само, як і для кола якоря ДПС незалежного збудження. Втрати енергії в міді статора АД виразимо через втрати потужності:

$$V_1 = 3 \cdot I_1^2 r_1 \approx 3(I_2')^2 r_1 = 3(I_2')^2 r_2' \frac{r_1}{r_2'} = V_2 \frac{r_1}{r_2'}$$

Повні страти енергії АД:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right).$$

Втрати в роторі АД не залежать від його опору, у той час як втрати в статорі АД обернено пропорційні опору ротора.

Для визначення втрат енергії при роботі двигуна під навантаженням необхідно обчислити вираз:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} M_C (\omega_0 - \omega) dt = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2).$$

К загальному вигляді розв'язання виразу утруднене, оскільки момент навантаження і швидкість можуть бути нелінійними функціями часу. Для спрощення прийемо $M_C = \text{const}$, тоді:

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) + M_C \omega_0 t_{\text{пп}} - M_C \int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt.$$

Для визначення втрат необхідно знати аналітичний вираз зміни швидкості в часі. Якщо вираз $\omega(t)$ складний, то для визначення інтеграла використовуються графоаналітичний метод (рис.3.5).

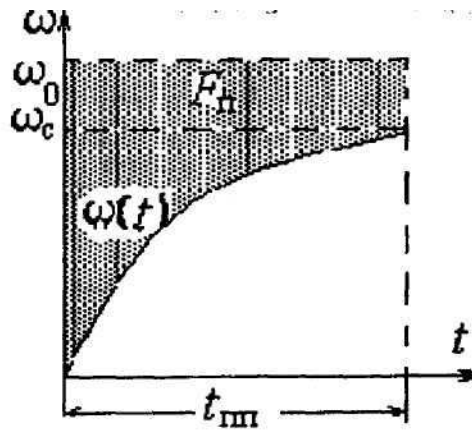


Рисунок 3.5

Інтеграл $\int_0^{t_{III}} \omega dt$ – це площа, обмежена кривою $\omega(t)$, віссю часу і вертикальною лінією $t=t_{III}$. Заштрихована на рисунку площа:

$$F_n = \omega_0 t_{III} - \int_0^{t_{III}} \omega dt.$$

Тоді втрати запишемо у вигляді:

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{пoc}^2 - s_{кин}^2) + M_C F_n.$$

Таким чином, для прирахування втрат енергії в якорі ДПС і роторі АД при $M_C = \text{const}$ варто визначити втрати енергії при $M_C = 0$, виконати побудову залежності $\omega(t)$ і, знайшовши площу F_n , визначити другу складову втрат.

Для визначення втрат у статорі АД знайдені втрати в роторі збільшуються на відношення опорів кіл статора і ротора:

$$\Delta W_1 = \Delta W_2 \frac{r_1}{r_2},$$

після чого визначаються сумарні втрати АД:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2.$$

Аналіз отриманих співвідношень визначає два основних способи зниження втрат електроенергії в перехідних процесах:

- зменшення моменту інерції електропривода;
- регулювання швидкості ідеального вільного ходу в перехідних процесах.

Зменшити момент інерції привода можна такими способами:

- застосуванням малоінерційних електродвигунів, що мають знижений момент інерції якоря чи ротора (збільшена довжина якоря і зменшений діаметр);
- раціональним конструюванням механічної передачі (вибором оптимального передаточного числа редуктора, раціональним розміром і формою елементів механічної передачі і конструкційних матеріалів);

• заміною одного двигуна двома, що мають половинну потужність замінюваного двигуна (сумарний момент інерції менше моменту інерції одного двигуна на повну потужність). Наприклад, два двигуни типу 4АН200 потужністю по 45 кВт мають сумарний момент інерції $2 \times 13 = 2,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Двигун 4АН250 потужністю 90 кВт на ту саму швидкість має момент інерції $3,53 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, що майже на 30% більше.

Найефективнішим засобом зниження втрат є реалізація керованих перехідних процесів. Розглянемо найпростіший спосіб керування пуском, коли швидкість ідеального неробочого ходу задається в два етапи. Такий пуск можливий при використанні двошвидкісного АД (рис. 3.6).

Втрати енергії в роторі АД при прямому пуску на характеристику з урахуванням $s_{\text{поч}}=1, s_{\text{кін}}=0$

$$\Delta W_{\text{II}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

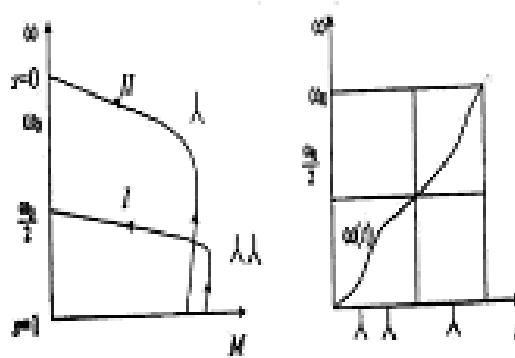


Рисунок 3.6

Втрати енергії при ступінчатому пуску при розгоні за характеристикою I (перший ступінь пуску) з урахуванням $s_{\text{поч}}=1, s_{\text{кін}}=0$,

$\omega'_0 = \frac{\omega_0}{2}$ можна визначити як:

$$\Delta W_1 = J \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2 \frac{1}{2} = J \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Втрати енергії при розгоні за характеристикою II (другий ступінь пуску) з урахуванням $s_{\text{поч}}=0,5, s_{\text{кін}}=0$, складають:

$$\Delta W_2 = J \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2 \frac{1}{2} = J \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Сумарні втрати при двоступеневому пуску:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_1 + \Delta W_2 = J \frac{\omega_0^2}{4}.$$

Втрати скоротилися вдвічі в порівнянні з пуском в один ступінь. Відзначимо, що зниження втрат енергії в роторі викликає зниження втрат у

статорі АД. Якщо швидкість ідеального неробочого ходу в перехідному процесі має n ступенів регулювання, втрати енергії в роторі зменшуються в n раз

$$\Delta W_n = J \frac{\omega_0^2}{2n},$$

де ω_0 - максимальна швидкість ідеального неробочого ходу, що відповідає останньому ступеню.

При плавній зміні швидкості ідеального вільного ходу втрати знижуються в $2 T_M/t_{пп}$ рази. Чим повільніше розгін, тим менші момент, втрати потужності, сумарні втрати за час пуску. Однак це справедливо при відсутності втрат, пов'язаних з наявністю статичного навантаження, що збільшуються зі зростанням часу пуску.

Контрольні питання до теми 3 С

1. Визначити втрати енергії при пуску двигуна без навантаження.
2. Визначити втрати енергії при динамічному гальмуванні двигуна.
3. Визначити втрати енергії двигуна в режимі проти вмикання.
4. Визначити втрати енергії двигуна в режимі реверсу.
5. Вказати втрати енергії при двохступеневого пуску двигуна.

ТЕМА 4

СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ГРАФІКИ СПОЖИВАННЯ

4.1 Споживачі електроенергії і їх класифікація

Споживачем електричної енергії називається електроприймач або група електроприймачів, об'єднаних технологічним процесом і що розміщуються на певній території. *Приймачем електричної енергії (електроприймачем)* називається апарат, агрегат, механізм, призначений для перетворення електричної енергії в інший вид енергії.

Систематизацію споживачів електроенергії, а отже, і їх навантажень здійснюють зазвичай по наступних основних експлуатаційно-технічних ознаках: виробничому призначенню; виробничим зв'язкам; режимам роботи; потужності і напрузі; роду струму; необхідному ступеню надійності живлення; територіальному розміщенню; щільність навантаження; стабільності розташування електроприймачів. Проте при визначенні електричних навантажень промислового підприємства досить систематизувати споживачів електроенергії по режимах роботи, потужності, напрузі, роді струму і необхідного ступеня надійності живлення, вважаючи решту ознак за допоміжні.

За режимами роботи всі споживачі електроенергії можна розподілити на ряд груп, для яких передбачаються три режими роботи: *тривалий*, при якому електричні машини можуть працювати тривалий час, причому перевищення температури окремих частин машини не виходить за межі, що встановлюються стандартом; *короткочасний*, при якому робочий період не настільки тривалий, щоб температури окремих частин машини могли дозріють сталого значення, період же зупинки машини настільки тривалий, що машина встигає охолотитися до температури навколишнього середовища; *повторно-короткочасний*, при якому робочі періоди чергуються з періодами пауз, а тривалість всього циклу не перевищує 10 хв. При цьому нагрів не перевершує допустимого, а охолодження не досягає температури навколишнього середовища.

Аналіз режимів роботи споживачів електроенергії промислових підприємств показує, що в тривалому режимі працюють більшість електродвигунів, обслуговуючих основні технологічні агрегати і механізми. Тривало, без відключення, вісь декількох годинників до декількох змін підряд, з достатньо високим, незмінним або малозмінним навантаженням працюють електроприводи вентиляторів, насосів, компресорів, перетворювачів, механізмів безперервного транспорту і т. п. Тривало, але із змінним навантаженням і короткочасними відключеннями, за час яких електродвигун не встигає охолотитися до температури навколишнього середовища, а тривалість циклів перевищує 10 хв, працюють електродвигуни, обслуговуючі верстати холодної обробки металів, деревообробні верстати, спеціальні механізми ливарних цехів, преси і кувальні машини ковальсько-пресових цехів.

У короткочасному режимі працюють переважна більшість електроприводів допоміжних механізмів металорізальних верстатів, а також механізмів для відкриття фрамуг, гідравлічних затворів, всякого роду заслонів і тому подібне

У повторно-короткочасному режимі працюють електродвигуни мостових кранів, тельферів, підйомників і аналогічних ним установок, допоміжних і деяких головних приводів прокатних цехів. До цієї групи відносяться і зварювальні апарати, що працюють з постійними великими кидками потужності.

Самостійну групу електроприймачів складають нагрівальні апарати і електропечі, що працюють в тривалому режимі з постійним або малозмінювальним навантаженням, і електричне освітлення, відмітною особливістю режиму роботи якого є різка зміна навантаження майже вісь нуля до максимуму в залежності вісь часу доби і постійність навантаження у весь час, коли освітлення включене.

По потужності і напрузі всі споживачі електроенергії можна розділити на дві групи:

споживачі великої потужності (80—100 кВт і вище) на напругу 3—6—10 кВ, котрі отримують живлення безпосередньо вісь мережі 3—6—10 кВ.

До цієї групи відносяться могутні печі опору і дугові печі для плавки чорних і кольорових металів, живлені через власні трансформатори;

споживачі малої і середньої потужності (нижче 80—100 кВт), живлення яких можливо і економічно доцільно тільки на напрузі 380—660 В.

По роду струму всі споживачі електроенергії можна розділити на три групи: що працюють в мережі *змінного струму нормальної промислової частоти* (50 Гц), що працюють в мережі *змінного струму підвищеної* або *зниженої частоти* і що працюють в мережі *постійного струму*. Основний рід струму, на якому працюють електроустановки промислових підприємств—змінний трифазний струм частотою 50 Гц.

Окремі споживачі електроенергії (електроінструмент, спеціальні верстати в деревообробних цехах, ряд шліфувальних верстатів в підшипниковій промисловості і ін.) використовують для живлення високошвидкісних електродвигунів струми підвищеної частоти (180—400 Гц). Установки індукційного нагріву вимагають струмів підвищених і високих частот, що отримуються від машинних (до частот 10000 Гц) і електронних (понад 10 000 Гц) генераторів.

Для ряду виробничих механізмів необхідні широке регулювання швидкості, підтримка постійності швидкості технологічного процесу, підвищений перевантажувальний момент при повторно-короткочасному режимі роботи, часте реверсування, швидкі розгони і гальмування, що викликає необхідність застосування електродвигунів постійного струму для електроприводів цих механізмів. Цеху електролізу, електролітичного отримання металів, гальванічні цехи і деякі види електрозварювання вимагають також постійного струму.

Тому при побудові схеми електропостачання промислового підприємства доводиться зважати на наявність на підприємстві споживачів постійного струму і струмів високої частоти і, отже, передбачати спеціальні перетворювальні установки для живлення цих споживачів і для обслуговування окремих електроустановок або їх груп. При незначному числі і невеликій потужності окремих споживачів постійного струму або струмів високої частоти, а також при їх розкиданості по території цехів в кожного з цих споживачів встановлюють індивідуальні перетворювальні агрегати. Їх встановлюють і в могутніх електроприводах, управління якими проводиться по спеціальних схемах. При достатньо великому числі і великій сумарній потужності споживачів передбачаються централізовані перетворювальні підстанції із статичними напівпровідниковими випрямлячами або двигун-генераторами. У системі електропостачання підприємства ці перетворювачі електроенергії є споживачами змінного струму.

4.2 Аналіз графіків навантаження промислових електричних мереж

Типи графіків навантажень

При експлуатації та проектуванні промислових електричних мереж і режимів їх роботи аналізуються і використовуються графіки навантажень по активній потужності $P(t)$ струму $I(t)$ і реактивній потужності $Q(t)$. Для вибору елементів мереж по нагріванню основне значення мають графіки $I(t)$, а для аналізу та регулювання електроспоживання – $P(t)$.

Графіки навантаження мереж, котрі живлять окремих електроспоживачів, називають індивідуальними і позначають $P(t)$, а графіки навантаження кабелів, що живлять групи електроспоживачів – груповими і позначають $P(t)$ при цьому

$$P(t) = \sum_{r=1}^n P_r(t),$$

де n – число електроспоживачів.

При аналізі режимів електроспоживання підприємств і проектуванні промислових електричних мереж розглядають, як правило, групові графіки. Але аналіз цих графіків неможливий без з'ясування і врахування умов їх формування, тобто сумування (накладання) індивідуальних графіків.

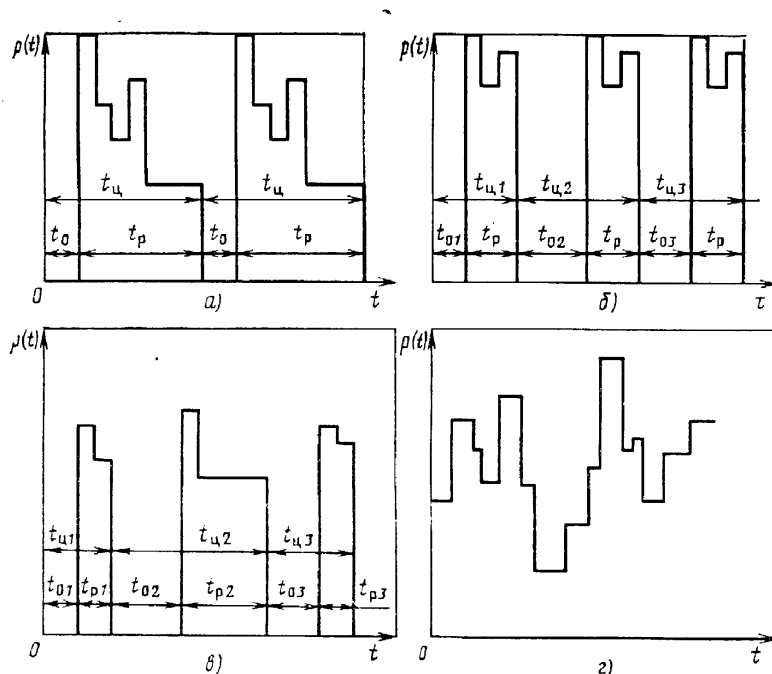


Рисунок 4.1 – Типи графіків навантаження

Для більшості промислових електроспоживачів характерна циклічність їх роботи, зумовлена повторенням операцій технологічних процесів, які

обслуговуються цими електроспоживачами, тому режим роботи електроспоживачів і відповідні графіки навантажень класифікуються таким чином:

- 1) періодичні (рис.4.1,а) з періодом t_u ;
- 2) циклічні (рис.4.1,б), які відрізняються від періодичних непостійністю тривалості пауз t_o ;
- 3) нециклічні (рис.4.1,в), характеризуються стабільністю величини споживання електроенергії протягом часу T_u групи агрегатів, до одного з яких належить даний електроспоживач;
- 4) нерегулярні (рис.4.1,г), відповідають неусталеному характеру технологічного процесу і режиму електроспоживання.

В подальшому розглядаються в основному періодичні графіки. Циклічний графік замінимо еквівалентним йому періодичним з тривалістю періоду, рівною середній тривалості $t_{u.c.}$ циклу вихідного графіка. Для нециклічного графіка $t_{u.c.}$ циклу вихідного графіка. Для нециклічного графіка $t_{u.c.}$ визначається як $t_u = \frac{T_u}{N}$, де N – кількість аналогічних технологічних операцій за час T_u .

Груповий графік $P(t)$ буде періодичним лише при формулюванні із рівно періодичних $t_{uz} = t_{us} = t_u = const$ періодичних індивідуальних графіків, при цьому, звичайно, період групового графіка також буде рівним t_u .

В загальному випадку при формулюванні графіка $P(t)$ із будь-яких, крім нерегулярних, графіків $P(t)$ він, груповий графік, неперіодичний, але при усталеному режимі роботи виробництва задовольняє умові узагальненої періодичності, що означає стабільність споживання електроенергії за час узагальненого циклу T_u . Такі графіки називаються майже періодичними.

Графік $P(t)$ буде нерегулярним, якщо він сформований з нерегулярних графіків $P(t)$.

Показники та характеристики індивідуальних графіків навантаження

При розрахунковому аналізі графіків навантаження, котрий може проводитись з різною метою, використовуються такі показники.

1. Середнє значення навантаження (середня потужність). Найчастіше для індивідуальних графіків середнє значення визначають за час циклу $t_u(t_{uc})$ по формулі:

$$P_c = \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} P(t) dt, \quad (4.1)$$

яка для ступінчастих графіків має такий вигляд:

$$P_c = \frac{\sum_{k=1}^M P_k \Delta t_k}{t_{\text{ц}}}, \quad (4.2)$$

де k – значення навантаження k -ї ступені тривалістю Δt_k ;

M – число ступенів на графіку. Очевидно має дотримуватись умови:

$$\sum_{k=1}^M \Delta t_k = t_{\text{ц}}.$$

На практиці частіше застосовуються ступінчасті графіки з однаковою тривалістю ступенів $\Delta t_k = \Delta t = \frac{\Delta t_{\text{ц}}}{M}$. В такому випадку формула (4.3) перетворюється в таку:

$$P_c = \frac{\sum_{k=1}^M P_k}{M}, \quad (4.4)$$

Якщо відомо споживання електроенергії $\omega_{\text{ц}}$ електроспоживачем за цикл, то P_c визначають як

$$P_c = \frac{\omega_{\text{ц}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (4.5)$$

2. Середньоквадратичне навантаження.

Як відомо, втрати активної електроенергії в мережі пропорційні квадрату її навантаження, а тому потрібно проаналізувати також квадратичні графіки навантаження $P^2(t)$. Одним з показників таких графіків являється їх середньоквадратичне значення за деякий проміжок часу, наприклад, за цикл $t_{\text{ц}}$. Його обчислюють по формулі:

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} P^2(t) dt}, \quad (4.6)$$

а для ступінчастих графіків – по формулі

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M P_k^2 \Delta t_k}{t_{\text{ц}}}}, \quad (4.7)$$

Якщо $\Delta t_k = \text{const}$ формула (5.7) набирає вигляду:

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M P_k^2}{M}}, \quad (4.8)$$

3. Дисперсія і середньоквадратичне відхилення (стандарт) графіка навантаження.

Одним з показників нерівномірності графіка навантаження являється його дисперсія, котра обчислюється по формулі, Вт²

$$Dp = P_{\text{ск}}^2 - P_c^2 \quad (4.9)$$

Очевидно, що $Dp \geq 0$ [$Dp=0$, якщо $P(t)=P=const$, тобто при незмінному навантаженні або повному графіку].

Середньоквадратичне відхилення, Vt , назване стандартом, обчислюється як

$$\sigma p = \sqrt{Dp}. \quad (4.10)$$

4. Коефіцієнт форми графіка навантаження.

Крім дисперсії і стандарту, які мають розмірність, нерівномірність графіка навантаження оцінюється по значенню коефіцієнта форми

$$K_{\phi} = \frac{P_{ск}}{P_c} \quad (4.11)$$

Очевидно, що $K_{\phi} \geq 1$, і своє мінімальне значення він набуває при $P_{ск}=P_c$, тобто при $P(t) = P = const$.

Підставивши у вираз (4.9) вираз для $P_{ск}=K_{\phi}P_c$ з (4.11), отримуємо таке співвідношення:

$$Dp = P_{ск}^2 (K_{\phi}^2 - 1) \quad (4.12)$$

Показники та характеристики групових графіків навантаження

1. Середнє значення групового графіка. Значення P_c , тобто середня потужність групи електроспоживачів, визначається з співвідношень (4.2) і (5.4) підстановкою в них відповідних значень з графіка $P(t)$, або сумуванням середніх значень індивідуальних графіків, тобто

$$P_c = \sum_{r=1}^n P_{rc}, \quad (4.13)$$

Середнє значення суми індивідуальних графіків має бути визначене за той же час, для якого відшукується середнє значення групового графіка.

2. Середньоквадратичне значення. Так же як і у випадку з розрахунками P_c , для визначення $P_{ск}$ можна використовувати формули (4.6) і (4.8)

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} \left(\sum_{r=1}^n P_r(t) \right)^2 dt}, \quad (4.14)$$

3. Дисперсія групового графіка навантаження. Значення DP можна обчислити, користуючись співвідношеннями (5.9) і (5.12), підставивши в них замість $p(t)$, p_c^2 і $p_{ск}^2$ відповідно $P(t)$, P_c^2 і $P_{ск}^2$

$$DP = P_{ск}^2 - P_c^2.$$

5 Коефіцієнт форми графіка. Як і для індивідуальних графіків, K_{ϕ} групового графіка доцільно отримувати діленням його середньоквадратичного значення $P_{ск}$ на середнє P_c $\left(K_{\phi} = \frac{P_{ск}}{P_c} \right)$.

5. Коефіцієнт максимуму графіка. Для розрахунків максимуму навантажень мереж користуються коефіцієнтом максимуму, рівним

відношенню півгодинного максимуму навантаження до середнього значення графіка, тобто:

$$K_m = \frac{P_m}{P_c} \quad (4.15)$$

Очевидно, за винятком випадку $P(t)=const$, $K_\phi > 1$.

6. Коефіцієнт заповнення графіка навантаження. В розрахунках режимів електроспоживання і графіків навантаження електричних мереж енергосистем використовується коефіцієнт заповнення графіка навантаження, котрий дорівнює відношенню його середнього значення до максимального:

7. Коефіцієнт заповнення графіка навантаження. В розрахунках режимів електроспоживання і графіків навантаження електричних мереж енергосистем використовується коефіцієнт заповнення графіка навантаження, котрий дорівнює відношенню його середнього значення до максимального:

$$K_z = \frac{P_c}{P_m} \quad (4.16)$$

тобто коефіцієнт заповнення є величина, обернена коефіцієнту максимуму.

Стосовно до вирішення завдання вирівнювання графіків навантаження використання K_m виявляється більш доцільним, оскільки зниження K_m призводить до зниження нерівномірності графіка.

8. Коефіцієнт нерівномірності графіка дорівнює відношенню мінімального значення до максимального:

$$K_n = \frac{P_{\min}}{P_m} \quad (4.17)$$

В загальному випадку $K_n \leq 0$.

Порівнюючи наведені вище показники нерівномірності графіка навантаження, слід зазначити, що перші чотири з них, тобто DP , K_ϕ , K_m і K_z зв'язують нерівномірність графіка $P(t)$ на інтервалі T з споживанням електроенергії за цей час, оскільки $W_a = P_c T$. Тому маючи на увазі, що однією із умов забезпечення нормального ходу технологічного процесу підприємства являється забезпечення споживача потрібною кількістю електроенергії, зниження K_m або підвищення K_z при $P_c = const$ приведе до зниження P_m .

Аналіз взаємного зв'язку графіків навантажень

Практика експлуатації систем електропостачання показує, що у багатьох випадках розрахункові навантаження промислових електричних мереж відрізняються від дійсних, при цьому, як правило, ці навантаження виявляються нижчими від розрахункових.

Одним із способів підвищення точності розрахунків являється використання в чині вихідної інформації не показників, а самих графіків навантаження, або їх моделей.

Графіки навантаження повинні розраховуватись технологами – на стадії проектування і будуватись енергетиками разом з технологами – при експлуатації підприємств.

Розглянемо нижче індивідуальні двоступінчасті, трьохступінчасті і лінійні графіки навантажень, застосування яких дозволяє підвищити точність розрахунків електричних навантажень промислових мереж і параметрів електроспоживання.

1. Двоступінчастий графік. В загальному випадку двоступінчасті графіки навантажень мають вигляд (рис.4.2). Для графіків такого виду характеристики розраховуються за однаковими формулами:

1) середнє значення потужності

$$P_c = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2}{t_u}; \quad (4.18)$$

2) середньоквадратичне значення потужності

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{P_1 t_1^2 + P_2 t_2^2}{t_u}}; \quad (4.19)$$

3) дисперсія графіка

$$Dp = \frac{P_1^2 (t_1 t_u - t_1^2) + P_2^2 (t_2 t_u - t_2^2) - 2P_1 P_2 t_1 t_2}{t_u^2}; \quad (4.20)$$

4) коефіцієнт форми графіка

$$K_\phi = \sqrt{\frac{P_1 t_1^2 + P_2 t_2^2}{(P_1 t_1 + P_2 t_2) \cdot t_u}}; \quad (4.21)$$

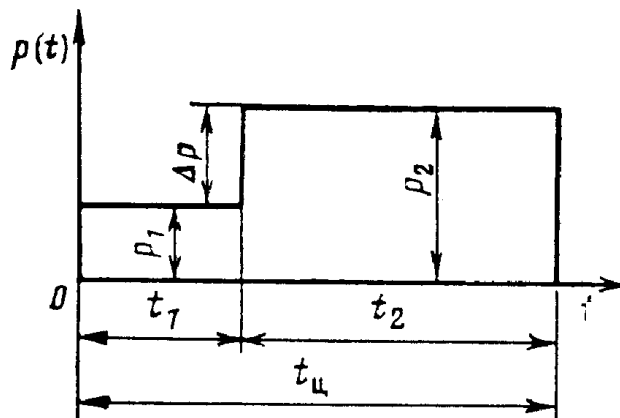


Рисунок 4.2 – Двоступінчастий графік навантаження

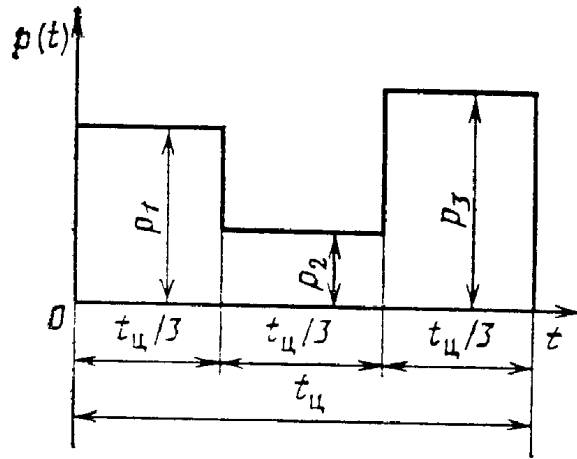


Рисунок 4.3 – Триступінчастий графік навантаження

Якщо прийняти $P_2 = \alpha P_1$, отримаємо такі вирази характеристик:

$$P_c = P_1 \frac{t_1 + \alpha t_2}{t_u}; \quad (4.22)$$

$$P_{ск} = P_1 \sqrt{\frac{t_1 + \alpha^2 t_2}{t_u}}; \quad (4.23)$$

$$Dp = P_1^2 \frac{(t_1 t_u - t_1^2) + \alpha^2 (t_2 t_u - t_2^2) - 2\alpha t_1 t_2}{t_u^2}; \quad (4.24)$$

$$K_\phi = \sqrt{\frac{t_1 + \alpha^2 t_2}{t_1 + \alpha t_2}}; \quad (4.25)$$

Наведені вище формули справедливі і для такого випадку, коли одно із значень навантаження графіка дорівнює нулю.

2. Триступінчастий графік навантаження. Як показує практика розрахунків, найбільш прийнятна триступінчаста модель графіка з однаковою тривалістю ступенів навантаження (рис. 4.3), тобто $t_1 = t_2 = t_3 = \frac{t_u}{3}$.

Характеристики триступінчастих графіків розраховуються за такими формулами:

1) середнє значення потужності

$$P_c = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (4.26)$$

2) середньоквадратичне значення потужності

$$P_{ск} = \frac{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2}{3} \quad (4.27)$$

3) дисперсія навантаження графіка

$$Dp = \frac{2(P_1^2 + P_2^2 + P_3^2) - P_1 P_2 - P_2 P_3 - P_1 P_3}{9}; \quad (4.28)$$

4) коефіцієнт форми графіка

$$K_\phi = \sqrt{\frac{3(P_1^2 + P_2^2 + P_3^2)}{(P_1 + P_2 + P_3)^2}}; \quad (4.29)$$

Рис.5.4. Лінійний графік навантаження

Прийнявши $P_2 = \alpha P_1$, $P_3 = \beta P_1$, вище наведені формули можна записати у вигляді:

$$P_c = P_1 \frac{t_1 + \alpha + \beta}{3}; \quad (4.30)$$

$$P_{ck} = P_1 \sqrt{\frac{t_1 + \alpha^2 + \beta^2}{3}}; \quad (4.31)$$

$$Dp = 2P_1^2 \frac{1 + \alpha^2 + \beta^2 - \alpha - \alpha\beta - \beta}{9}; \quad (4.32)$$

$$K_\phi = \sqrt{\frac{3(1 + \alpha^2 + \beta^2)}{(1 + \alpha + \beta)^2}}. \quad (4.33)$$

Як і у випадку двоступінчастого графіка, наведені формули характеристик тріступінчастого графіка справедливі і для випадку, коли значення навантаження на одному із ступенів дорівнює нулю.

3. Лінійний графік навантаження. В загальному випадку лінійний графік навантаження (рис. 4.4) задається співвідношенням

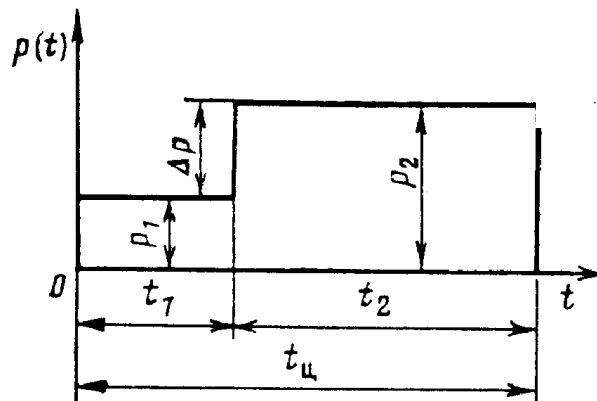


Рисунок 4.4 – Лінійний графік навантаження

$$P(t) = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{t_b} \cdot t \quad (4.34)$$

де t_b – період включення.

Прийнявши, як і вище, $P_2 = \alpha P_1$, вираз (4.34) можна записати у вигляді

$$P(t) = P_1 \left(1 + \frac{\alpha - 1}{t_0} \cdot t \right) \quad (4.35)$$

Характеристиками лінійного графіка навантаження являються:

1) коефіцієнт включення навантаження

$$K_B = \frac{t_B}{t_H} \quad (4.36)$$

2) середнє значення навантаження

$$P_c = \frac{P_1 + P_2}{2} \cdot \frac{t_B}{t_H} \quad (4.37)$$

3) середньоквадратичне значення

$$P_{ck} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3} \cdot \frac{t_B}{t_H}} \quad (4.38)$$

4) дисперсія

$$Dp = \frac{4(P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2) \cdot \frac{t_B}{t_H} - 3(P_1 + P_2)^2 \cdot \frac{t_B^2}{t_H^2}}{12}; \quad (4.39)$$

5) коефіцієнт форми графіка

$$K_\phi = \frac{2}{P_1 + P_2} \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3} \cdot \frac{t_H}{t_B}} \quad (4.40)$$

З врахуванням прийнятого вище співвідношення $P_2 = \alpha P_1$, а також враховуючи (4.36), значення P_c , P_{cp} і K_ϕ можна переписати таким чином:

$$P_c = \frac{P_1(1 + \alpha)}{2} K_B; \quad (4.41)$$

$$P_{ck} = P_1 \sqrt{\frac{1 + \alpha + \alpha^2}{3}} K_B; \quad (4.42)$$

$$Dp = \frac{(1 + \alpha^2)(4 - 3K_B) + \alpha(4 - 6K_B)}{12} \cdot P_1^2 \cdot K_B; \quad (4.43)$$

$$K_\phi = \frac{2}{1 + \alpha} \sqrt{\frac{1 + \alpha + \alpha^2}{3K_B}}; \quad (4.44)$$

Графіки зміни миттєвих значень потужності (осцилограми) застосовуються дуже рідко, в основному в науково-дослідних роботах, при цьому тривалість інтервалу реалізації T часто вимірюється секундами. Неперервні графіки (реєстрограми) застосовують для контрольних або перевірочних досліджень на інтервалах тривалістю не більше доби.

В інженерних розрахунках, і головне, при регулюванні електроспоживання використовують, як правило, графіки, отримані дискретним осередненням неперервного графіка $P(t)$ на послідовних інтервалах часу $\Delta t = T/M$, де M – число інтервалів осередження.

При побудові й обробці графіків навантажень найчастіше зустрічаються величини T і Δt , наведені в таблиці 4.1.

На рис.4.5 показані вихідний графік навантаження $P(t)$ і ступінчасті $P_{\Delta t}(t_k)$, отримані осередненням неперервного графіка $P(t)$ на інтервалах Δt різної тривалості. Неперервні графіки $P(t)$ можуть бути отримані за допомогою реєструючи (самопитучих) приладів, або з використанням показань лічильників електроенергії на основі розрахунків за формулою:

$$P_{\Delta t} = \frac{W_{a\Delta t}}{\Delta t},$$

де $W_{a\Delta t}$ – кількість спожитої електроенергії за час Δt .

Таблиця 4.1 – Часові величини графіків навантажень

Назва графіків	Тривалості	
	реалізації T	інтервалу осереднення Δt
Півгодинний	30 хв	1 –5 хв
Годинний	60 хв	5 –10 хв
Змінний	6 –8 год	10 –30 хв
Добовий	24 год	30 –60 хв
Місячний	30 діб	24 год
Річний	365 діб	1 міс

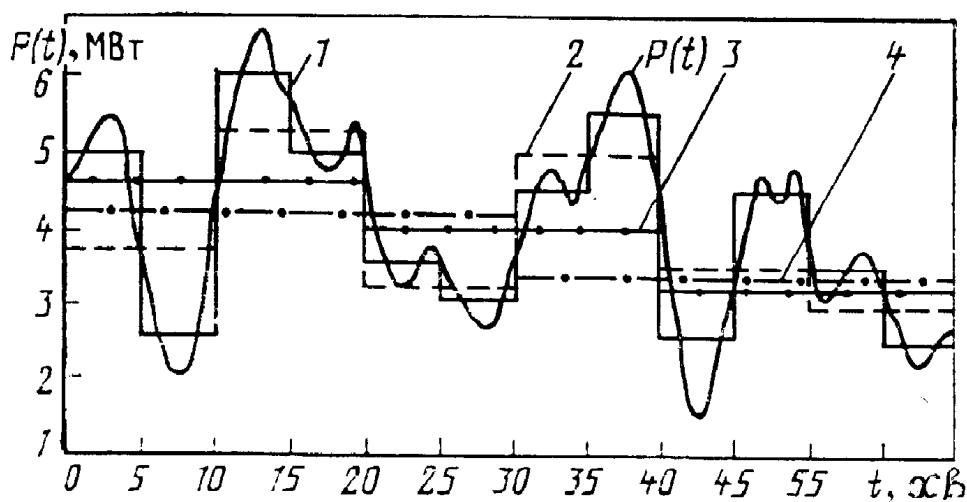


Рисунок 4.5 – Вихідний графік $P(t)$ і ступінчасті, отримані осередненням $P(t)$ на інтервалах Δt різної тривалості: 1- $\Delta t=5$ хв; 2- $\Delta t=10$ хв; 3- $\Delta t=20$ хв; 4- $\Delta t=30$ хв.

Розрахункова оцінка півгодинного максимуму потужності підприємства

Методи розрахункового аналізу графіків електричних навантажень промислових електричних мереж дають можливість отримання ряду характеристик, основними з яких являються максимум середнього навантаження за інтервал заданої тривалості, а також дисперсія і коефіцієнт форми, необхідні для розрахунків втрат потужності та енергії.

Розглянемо статистичний метод оцінки півгодинного максимуму потужності підприємства. Максимум півгодинного середнього навантаження розраховують по формулі:

$$P_{m30} = P_{c30} + \beta \sqrt{DP_{30}} \quad (4.45)$$

де P_{c30} – середнє навантаження на 30-хвилинному (півгодинному) інтервалі графіка;

DP_{30} – дисперсія середніх півгодинних навантажень;

β – статистичний коефіцієнт, що враховує вірогідність перевищення навантаження $P(t)$ рівня P_{m30} .

Величини P_{c30} і DP_{30} – числові характеристики випадкової величини – електричного навантаження, - математичне сподівання, і дисперсія названої випадкової величини.

Їх можна визначити через універсальну характеристику випадкової величини – її закон розподілу $f(P_{30})$:

$$P_{c30} = \int_0^{P_m} P_{30} f(P_{30}) dP_{30} \quad (4.46)$$

$$DP_{30} = P_{ск30}^2 - P_{c30}^2 \quad (4.47)$$

$$P_{ск30} = \sqrt{\int_0^{P_m} P_{30}^2 f(P_{30}) dP_{30}} \quad (4.48)$$

де $P_{ск30}$ – середньоквадратичне значення середніх 30-хвилинних навантажень.

Як відомо, правило 3σ застосовується для визначення розрахункових значень випадкових величин, розподілених по нормальному закону. Надійність, тобто вірогідність того, що поточне значення випадкових величин, у нашому випадку півгодинних навантажень, будуть не вище, ніж P_{m30} , рівна 0,9986. Відповідно вірогідність перевищення півгодинного середнього навантаження рівна P_{m30} дорівнює $1-0,9986=0,0014$, тобто 0,14%. Очевидно, що такий рівень вірогідності являється не виправдано низьким. Якщо у формулі (4.45) прийняти значення $\beta < 3$, що відповідає вірогідності перевищення P_{m30} , більшої 0,14%, то це приведе до зниження розрахункового значення P_{m30} . З врахуванням того, що

$$DP_{30} = P_{ск30}^2 - P_{c30}^2 = P_{c30}^2 (K_{ф30}^2 - 1) \quad (4.49)$$

формулу 4.45) можна переписати так:

$$P_{m30} = P_{c30} (1 + \beta \sqrt{K_{\phi 30}^2 - 1}) \quad (4.50)$$

або:

$$P_{m30} = P_{c30} + \Delta P_{c30}, \quad (4.51)$$

де

$$\Delta P_{c30} = \beta P_{c30} \sqrt{K_{\phi 30}^2 - 1} \quad (4.52)$$

є перевищення розрахункового максимуму над середнім навантаженням. Отже, різниця у величині P_{m30} при двох значеннях β визначається з співвідношення:

$$\Delta P_{m30} = (\beta_2 - \beta_1) P_{c30} \sqrt{K_{\phi 30}^2 - 1} \quad (5.53)$$

На рис.4.6 представлено графіки залежності $\Delta P_{m30} = f(K_{\phi 30})$, побудовані для $\beta=3$ і $\beta=1,65$. Із графіків випливає, що прийняття значення $\beta=1,65$, що відповідає 5-процентній вірогідності перевищення навантаженням $P(t)$ розрахункового максимуму, приведе до суттєвого його зниження. Це означає, що підприємство, котре заявило максимум півгодинної потужності, прийнявши $\beta=1,65$, буде вдаватись до регулювання електроспоживання найбільше в 5% усього часу роботи, а не в 0,14%, як це має бути у випадку прийняття $\beta=3$.

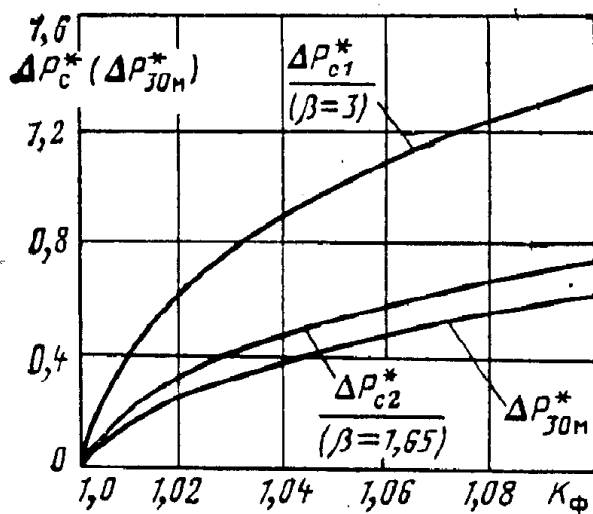


Рисунок 4.6 – Графіки залежності відносних значень

перевищення $\Delta P_{c30} = \frac{\Delta P_{30}}{P_{c30}}$ розрахункових максимумів над середнім навантаженням при двох значеннях β і відповідного зниження максимуму від коефіцієнта форми

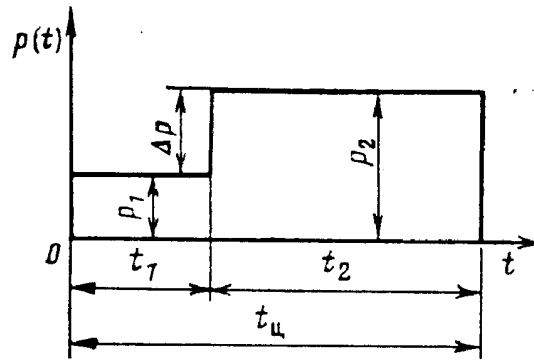


Рисунок 4.7 – Визначення розрахункового значення півгодинного максимуму навантаження по інтегральній кривій розподілу середніх півгодинних навантажень

Визначити розрахункове значення півгодинного максимуму можна по інтегральній кривій вірогідності $F(P_{30})$ півгодинних максимальних значень навантаження (рис.4.7). Для 95-процентної вірогідності значення півгодинного максимуму показано на рис.5.7 стрілками. Інтегральну криву будують, використовуючи накопичений статичний матеріал вірогідності півгодинних максимумів навантажень.

Розрахунки втрат електроенергії в промислових мережах по графіках навантаження струмом

Як відомо, втрати активної електроенергії протягом часу T в електричній мережі з опором R обчислюють по формулі

$$\Delta W = 3I_{\text{ск}}^2 RT.$$

У цій формулі $I_{\text{ск}}$ – середньоквадратичне значення струму за час T , яке визначається при відомому його графіку $I(t)$ по формулі:

$$I_{\text{ск}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt,$$

або по такій формулі:

$$I_{\text{ск}}^2 = I_c^2 K_{\phi}^2.$$

В останньому виразі I_c – середнє протягом часу T значення струму, а K_{ϕ} – коефіцієнт форми графіка $I(t)$, котрий дорівнює $K_{\phi} = I_{\text{ск}}/I_c$.

При обчисленні втрат електроенергії використовують, як правило, ступінчасті графіки $I_{\theta}(t)$, отримані осередненням графіка $I(t)$ на інтервалах часу $\theta = T/M$, де M – число ступеней графіка.

Коефіцієнт форми графіка $I_{\theta}(t)$ обчислюють по формулі

$$K_{\phi\theta}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{I_{ic}^2}{I_c^2}, \quad (4.54)$$

де I_{ic} – середнє значення струму на i -му інтервалі θ .

Дійсний графік навантаження $I(t)$ має більшу нерівномірність, ніж ступінчастий графік $I_{\theta}(t)$, оскільки у формулі (5.54) не враховується нерівномірність навантаження на інтервалах θ . Тому дійсні втрати електроенергії, що відповідають графіку $I(t)$, більше втрат, обчислених для ступінчастого графіка, на величину

$$\Delta W_1 - \Delta W_2 = 3I_c^2 K_{\phi}^2 RT - 3I_c^2 K_{\phi\theta}^2 RT \quad (4.55)$$

При наявності інформації про нерівномірність навантаження на інтервалах осереднення θ середньоквадратичний струм графіка $I(t)$ обчислюють із виразу:

$$I_{\text{ск}}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_{\text{іск}}^2, \quad (4.56)$$

Способи і методи вирівнювання групових графіків навантаження електромереж промислових підприємств

Суть методів вирівнювання графіків зводиться до розгляду варіантів зміни технологічного режиму роботи електроспоживача, наприклад, робота з пониженою потужністю, збільшення тривалості циклу, зміни тривалості паузи, та регулюванню числа одночасно включених робочих і резервних електроспоживачів. Вирівнювання навантаження графіків має привести:

- 1) до мінімуму максимального значення потужності, а точніше – до зниження півгодинного максимуму навантаження;
- 2) до мінімуму витрат потужності та електроенергії в мережі.

Розв'язання першої частини цієї задачі може дати можливість при проектуванні вибрати зменшені значення потужності трансформаторів та перетину проводів ліній електропостачання, а при експлуатації – знизити півгодинний максимум потужності підприємства.

Організацію, планування і регулювання навантажень та електроспоживання здійснюють насамперед з метою зниження максимумів активної та реактивної потужності підприємств і вирівнювання графіка навантаження енергосистеми, а також дотримання заданих енергопостачальною організацією лімітів потужності та електроенергії. Виконання цих заходів має сприяти підвищенню стійкості роботи енергосистеми, надійності та якості електропостачання підприємств і отриманню на цій основі сукупного економічного ефекту.

Контрольні питання до теми 4

1. Які категорії приймачів електроенергії?
2. Визначте споживачі енергії за режимом роботи.
3. Поняття про добові графіки активної та реактивної потужності.
4. Особливість раціональних графіків та принципи їх побудови.

5. Чим відрізняються добові графіки навантаження від річних?
6. Дайте поняття коефіцієнта максимуму.

ТЕМА 5С ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Втрати потужності

Втрати потужності в електричній машині поділяються на постійні і змінні:

$$\Delta P = K + V.$$

Постійні втрати потужності не залежать від струму двигуна (навантаження) і містять у собі втрати:

- у сталі K_c ;
- механічні від тертя в підшипниках і вентиляційні K_m ;
- від струму збудження K_z .

Втрати в сталі залежать від амплітуди і частоти зміни потоку:

$$K_c = K_{cн} \left(\frac{f}{f_n} \right)^b \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2,$$

де $K_{cн}$ — втрати при номінальній частоті обертання двигуна;

$b = 1,2 \div 1,5$ - показник, що залежить від марки електротехнічної сталі.

Механічні втрати визначаються кутовою швидкістю двигунів:

$$K_m = K_{mн} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^n,$$

де $n = 1 \div 2$.

Втрати від струму збудження для ДПС незалежного збудження:

$$K_z = I_z^2 r_z.$$

В асинхронних двигунах немає спеціальної обмотки збудження, призначеної для створення магнітного потоку. Потік АД створюється реактивною складовою струму статора I_μ , яка називається струмом намагнічування. Тому втрати АД від струму намагнічування складають:

$$K_B = 3 \cdot I_\mu^2 r_1,$$

де r_1 — активний опір обмотки статора.

Постійні втрати в АД складаються з механічних - K_m , втрат у сталі статора K_{c1} , і ротора K_{c2} , а також втрат у міді обмотки статора від протікання струму намагнічування I_μ :

$$K = K_m + K_{c1} + K_{c2} + 3 \cdot I_\mu^2 r_1.$$

Змінні втрати визначаються втратами в міді обмоток двигунів при протіканні по них струму навантаження, що змінюється. Для ДПС:

$$V = I^2 r_{\text{я}} = I_{\text{H}}^2 r_{\text{я}} \left(\frac{I}{I_{\text{H}}} \right)^2 = V_{\text{H}} \left(\frac{I}{I_{\text{H}}} \right)^2,$$

$V_{\text{H}} = I_{\text{H}}^2 r_{\text{я}}$ – номінальні змінні втрати. Для асинхронних двигунів змінні втрати складаються з втрат в обмотках статора і ротора за винятком втрат від струму намагнічування:

$$V = V_1 + V_2 = 3 \cdot I_1^2 r_1 + 3(I_2')^2 r_2' = 3(I_1')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma^2} \right),$$

де V_1, V_2 – втрати в міді статора і ротора; $I_2 r_2$ – струм і опір ротора, приведені до обмотки статора; $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$.

Тоді

$$V = 3 \cdot (I_{2\text{H}})^2 \left(r_2 + \frac{r_1}{\sigma_{\text{H}}^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I_{2\text{H}}} \right)^2 = V_{\text{H}} \left(\frac{I_2'}{I_{2\text{H}}} \right)^2,$$

де $V = 3 \cdot (I_{2\text{H}})^2 \left(r_2 + \frac{r_1}{\sigma_{\text{H}}^2} \right)$ — номінальні змінні втрати;

$$\sigma_{\text{H}} = \frac{I_{2\text{H}}'}{I_{1\text{H}}} = 0,85 \div 0,95.$$

Для СД змінні втрати потужності:

$$V = 3 \cdot I_1^2 r_1 = 3 \cdot I_{1\text{H}}^2 r_1 \left(\frac{I_1}{I_{1\text{H}}} \right)^2 = V_{\text{H}} \left(\frac{I_1}{I_{1\text{H}}} \right)^2.$$

Якщо позначити кратність струму двигунів через X , то змінні втрати потужності для різних двигунів:

$$V = V_{\text{H}} \cdot X^2.$$

Повні втрати потужності в електромеханічному перетворювачі:

$$\Delta P = K + V_{\text{H}} X^2 = V_{\text{H}} (a + X^2),$$

де $a = \frac{K}{V_{\text{H}}}$ — коефіцієнт втрат (для двигунів нормального виконання залежно від потужності і швидкості $a = 0,5 \div 2$).

Втрати потужності в номінальному режимі ($X=1$) визначаються за паспортними даними:

$$\Delta P_{\text{H}} = P_{\text{H}} \frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}}.$$

Постійні втрати потужності:

$$K = \Delta P_{\text{H}} - V_{\text{H}}.$$

Аналіз енерговикористання двигуна як електромеханічного перетворювача енергії показує, що рівень втрат енергії в ньому залежить як від

режиму енергоспоживання, так і від якості підведеної до нього енергії. Втрати потужності в електричній машині постійного струму складають:

$$\Delta P = K_M + K_C + K_Z + V.$$

Крім першої складової ці втрати можна віднести до класу втрат, що «нагрівають», визначаючи тепловий режим електричної машини. Оскільки струм якоря залежить від статичного моменту і магнітного потоку, то для кожного статичного навантаження є струм збудження, при якому сумарні втрати мінімальні.

Однак пошук мінімуму сумарних втрат призводить до перерозподілу втрат по активних частинах електричної машини, у результаті чого деякі з них виявляються в більшому температурному полі ніж без оптимізації, що позначається на працездатності двигуна. Особливо це відчутно для машин, що пройшли ремонт із частковою або повною заміною обмотки якоря.

Ремонтні роботи, передремонтна підготовка й експлуатація призводять до того, що результуюча індукція після кожного з ремонтів знижується. При цьому спостерігається зростання складових втрат, викликаних вихровими струмами. Встановлено, що кожен наступний ремонт збільшує втрати в сталі на 5—13 %. Зростаючі втрати в основному зосереджуються в місцях локальних чи розподілених дефектів у верхній частині зубців. Це призводить до різкого збільшення теплової напруженості і швидкого порушення ізоляції.

В електричних машинах змінного струму причина збільшення втрат залишається без змін, а на їх перерозподіл у значній мірі впливають як зміна характеристик електротехнічної сталі, так і режим напруги живлення. При цьому встановлено, що ремонт асинхронних двигунів масових серій призводить до зменшення їх надійності.

У високовольтних електричних машинах у випадку наявності несправності віддаляється частина секцій обмотки статора, у результаті чого двигун змінює свій режим роботи, будучи при цьому вже несиметричним по конструкції. Як встановлено, неякісність напруги живлення, несиметрія конструкції є першопричинами вібрації обмотки й інших частин двигуна. Вібрації призведуть до передчасного зношування і механічної частини, зокрема, підшипників.

Втрати енергії за час роботи двигуна з постійним навантаженням визначаються добутком потужності втрат на час роботи:

$$\Delta W = \Delta P t_p.$$

При роботі двигуна з циклічним навантаженням втрати енергії

$$\Delta W = \int_0^{t_u} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i,$$

де $\Delta P_i, t_i$ — втрати потужності і час роботи при навантаженні;

$$X_i = \frac{I_i}{I_H}; n — \text{число значень навантаження на окремих ділянках};$$

$$\sum_{i=1}^n t_i = t_u — \text{час циклу}.$$

Коефіцієнт корисної дії електропривода

Витрачена енергія відрізняється від корисної на величину втрат. Потужність втрат енергії містить постійну і змінну складові. Постійна складова не залежить від навантаження (корисної потужності), змінна - пропорційна корисній потужності в степені більше 1.

Коефіцієнт корисної дії електромеханічного перетворювача є відношенням повної механічної потужності на валу до потужності, споживаної з мережі. Прийmemo, що при роботі на природній

характеристиці $X = \frac{I}{I_H} = \frac{P}{P_H}$, тоді ККД:

$$\eta = \frac{P}{P_H} = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{X}{X + \left(\frac{V_H}{P_H}\right)(a + X^2)}$$

У номінальному режимі $X=1$:

$$\eta_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_H}{P_H}\right)(1 + a)}$$

Залежність ККД від кратності навантаження має максимум при :

$$x_{\text{opt}} = \sqrt{a}.$$

Максимальне значення ККД:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_H}{P_H}\right)\sqrt{a}}$$

На рис.5.1 зображена залежність коефіцієнта корисної дії від потужності.

Значення ККД, що відповідають робочому діапазону, знаходяться в межах $0 \dots P_H$. Не випадково номінальне значення навантаження (потужності) вибирається при $\eta < \eta_{\text{max}}$. Пояснюється це тим, що практично всі пристрої працюють у режимах зі змінним у часі рівнем навантаження. Крім того, при розрахунку електромашин передбачаються накопичення по потужності. Це призводить до того, що фактичне навантаження пристроїв виявляється меншим номінального. Взагалі значення ККД вище.

Зазначене співвідношення між максимальним і номінальним значеннями ККД сприяє підвищенню ККД циклу, оскільки миттєві значення зосереджуються біля максимуму. З огляду на те, що реально навантаження асинхронних двигунів знаходяться в області $(0,6 \dots 0,7)P_H$, розробники масової серії двигунів 4А найбільший розрахунковий ККД розташували саме біля цих значень. Залежність номінального ККД асинхронних двигунів від номінальної потужності показана на рис.5.2 (1— АД серії А2; 2— АД серії А4 ($\omega_0=157$ і 107 сек^{-1}); 3 - АД серії А4 ($\omega_0=314 \text{ с}^{-1}$)).

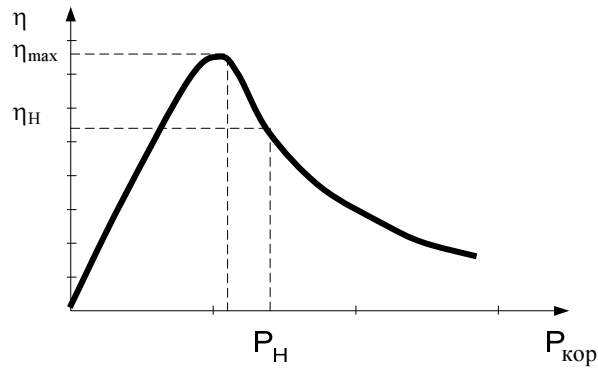


Рисунок 5.1 – Залежність коефіцієнта корисної дії від потужності

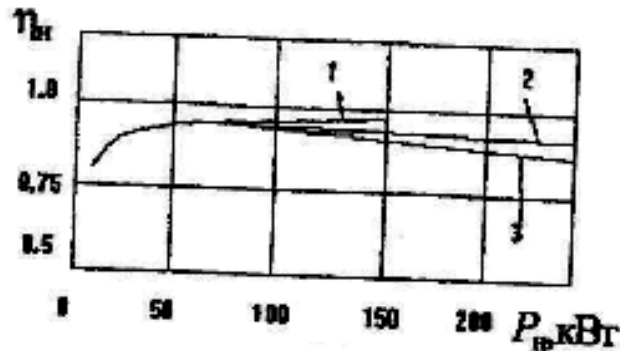


Рисунок 5.2 – Залежність номінального ККД асинхронних двигунів від номінальної потужності

Якщо привод постійно працює зі сталим навантаженням то вигідніше, щоб при цьому К.К.Д був максимальним. У цьому випадку доцільно спеціально проектувати елементи силового кола з малими питомими втратами (меншими густиною струмів, індукцій, коефіцієнтами тертя в механічній частині), із застосуванням високоякісних матеріалів. Додаткові витрати на матеріали окупляться меншими втратами енергії й у підсумку — меншими сумарними втратами.

Найбільше значення ККД двигунів знаходиться в області номінального навантаження. Тому для зменшення втрат потужності необхідно забезпечити повне навантаження й обмежити їх неробочий хід. При наявності малозавантажених двигунів доцільно зробити їх заміну на двигуни менших габаритів.

Коефіцієнт потужності електропривода

Електропривод змінного струму споживає з мережі активну P и реактивну Q потужності. Активна потужність витрачається на здійснення

електроприводом корисної роботи і покриття втрат у ньому, а реактивна забезпечує створення обертального магнітного поля двигуна і безпосередньо корисної роботи не виконує.

Коефіцієнт потужності електропривода:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}},$$

де S - повна споживана потужність.

Кут φ визначає зсув фаз між напругою мережі і струмом електропривода. Електропривод, споживаючи реактивну потужність, додатково навантажує систему електропостачання, викликаючи додаткові втрати напруги й енергії в її елементах.

Якщо електропривод працює в якомусь циклі при різних навантаженнях чи швидкостях, то він як споживач електричної енергії характеризується середньозваженим чи цикловим коефіцієнтом потужності, що визначається відношенням спожитої активної енергії за цикл W_a до повного W :

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{W} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}.$$

Активна і реактивна потужності АД:

$$P = M\omega_0 + 3 \cdot I_1^2 r_1;$$

$$Q = 3 \cdot I_\mu^2 x_\mu + 3 \cdot I_1^2 x_1 + 3(I_2')^2 x_2'.$$

Для більшості АД $\cos \varphi = 0,8 \div 0,9$. Для цих значень $Q = (0,5 \div 0,75)P$, тобто АД на кожен кіловат активної потужності споживає з мережі 0,5...0,75 квар реактивної потужності. Чим нижче $\cos \varphi$, тим більшу реактивну потужність споживає АД з мережі, завантажуючи її додатковим струмом і викликаючи в ній додаткові втрати.

Коефіцієнт потужності АД істотно залежить від його навантаження. При неробочому ході АД коефіцієнт невеликий, оскільки відносно велика частка реактивної потужності в порівнянні з активною. Збільшуючи навантаження АД зростає і $\cos \varphi$, досягаючи свого максимального значення приблизно в області номінального навантаження. Залежність $\cos \varphi$ від кратності механічного навантаження для АД серії 4А при різних рівнях номінальних $\cos \varphi_n$ зображена на рис.5.3 (1 - $\cos \varphi = 0,9$; 2 — $\cos \varphi = 0,8$; 3 - $\cos \varphi = 0,7$).

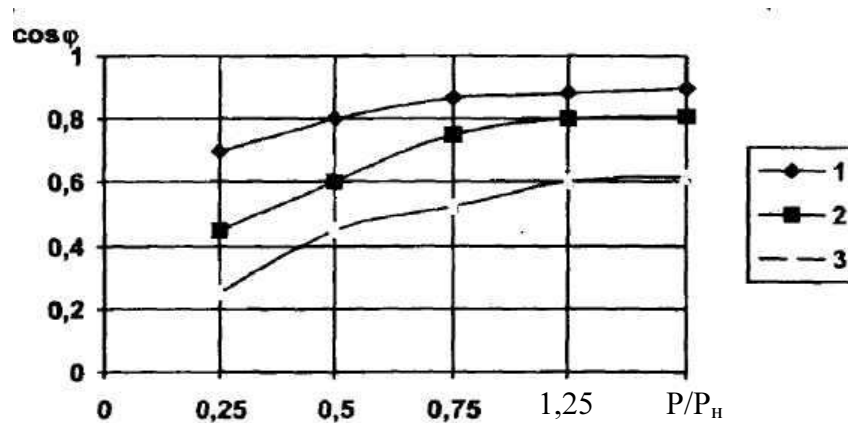


Рисунок 5.3 – Залежність $\cos \varphi$ від кратності механічного навантаження для АД серії 4А при різних рівнях номінальних $\cos \varphi_n$

Асинхронні двигуни є основними споживачами реактивної потужності в системі електропостачання.

Для зниження споживання АД реактивної потужності і тим самим підвищення коефіцієнта потужності необхідно виконати таке:

- замінити малозавантажений АД двигуном меншої потужності. При заміні АД меншої потужності буде працювати в області великих навантажень з вищим $\cos \varphi$. Крім того ККД цілком завантаженого двигуна буде високим;
- знизити напругу в АД, що працює з малим навантаженням. При цьому зменшуються споживаний з мережі струм і реактивна потужність, та підвищується $\cos \varphi$. Реалізується це за допомогою регулятора напруги, перемиканням обмотки статора зі схеми три кутника на зірку, що призводить до зниження напруги на обмотці кожної фази в $\sqrt{3}$ раз;
- обмеження неробочого ходу АД;
- застосування СД замість АД;
- використання компенсаційних пристроїв у вигляді конденсаторів.

Контрольні питання до теми 5 С

1. Визначити постійні втрати енергії в асинхронному двигуні.
2. Вказати змінні втрати енергії в асинхронному двигуні.
3. Навести залежність ККД двигунів від ступеня завантаження.
4. Визначити залежність коефіцієнта потужності від навантаження двигуна.

ТЕМА 6

ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАСОБАМИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ПЕРШИЙ ШЛЯХ стосується найпростішого некерованого масового електропривода і полягає в удосконаленні процедури вибору двигуна для конкретної технологічної установки з метою дотримання номінального теплового режиму двигуна при експлуатації.

Постановка задачі очевидна - двигун заниженої потужності швидко виходить з ладу, а двигун завищеної потужності перетворює енергію неефективно, тобто з високими питомими втратами в самому двигуні (низький ККД) і в мережі живлення (низький $\cos\phi$). Розв'язання задачі не завжди елементарне, зустрічаються помилки, а оскільки найпростіших електроприводів мільйони, то можливі великі збитки. У випадках, коли навантаження незмінне, помилки викликані лише низькою кваліфікацією проектувальників (двигун вибирали за діаметром вала). Коли навантаження змінюється, вибір виявляється значно складнішим, що додатково ускладнюється недостатністю вихідної інформації, паспортних і каталожних даних.

В основі взаємовідносин між енергопостачальною організацією і підприємством лежать встановлювані з урахуванням тих чи інших факторів тарифи на електроенергію. Недосконалість тарифу очевидна, оскільки він не враховує якість споживаної енергії і вплив цього параметра на характеристики електроустаткування.

Мінімальні витрати енергії можливі при різному ступені аварійності електроустаткування, є досить складною функціональною залежністю від стану устаткування, рівня його обслуговування, стану енергетичного господарства в цілому, включаючи і показники якості електроенергії. Загальні витрати включають не тільки сплату за електроенергію, перетворену тим чи іншим способом на корисний продукт, але й витрати на ремонт і обслуговування електроустаткування. З цієї причини доцільніше розглядати показник, що дорівнює сумі безпосередніх платежів за електроенергію і витрат на відновлення електроустаткування:

$$Z = Z_1 + Z_2,$$

де Z_1 — витрати на електроенергію, визначені за триставочним чи зонним тарифом;

Z_2 — вартість ремонтів, відновлення електроустаткування.

Останній показник досить високий і в основному характеризує стан енергогосподарства: при задовільному - витрати на ремонт мінімальні, при незадовільному - приблизно однакові з платежами по основних статтях.

Відомо, що в окремих підгалузях промисловості аварійність електродвигунів коливається від 20 до 60 - 70 % на рік, причому зазначені показники відрізняються навіть у випадку однотипних підприємств чи виробництв. Характерно, що при загальному спаді виробництва кількість аварійних відмовлень машин не зменшується, а зростає.

З урахуванням недовантаження електричних машин у нормальному технологічному режимі на 20 - 25 % і зниженні продуктивності в 2,5 — 3 рази, витрати на ремонт двигунів (при наробітку на відмовлення 4000 годин) впритул наближаються до вартості електроенергії, що спожив би двигун за

час експлуатації між двома ремонтами за умови, що ціна 1 кВт·год знаходиться на рівні 0,13-0,15 грн. З урахуванням транспортних та інших витрат, пов'язаних з аварійним виходом двигунів з ладу, питомі витрати на ремонт наближаються до відповідного показника для нових заводських машин.

ДРУГИЙ ШЛЯХ підвищення економічності масового нерегульованого електропривода — перехід на енергозберігаючі двигуни і двигуни поліпшеної конструкції, спеціально призначені для роботи з регульованим електроприводом.

В енергозберігаючих двигунах за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза і міді) підвищені номінальні значення ККД і $\cos\phi$. Енергозберігаючі двигуни використовуються, наприклад, у США і дають ефект при постійному навантаженні. Доцільність застосування енергозберігаючих двигунів повинна оцінюватися з урахуванням додаткових витрат, оскільки невелике (до 5%) підвищення номінальних ККД і $\cos\phi$ досягається за рахунок збільшення маси заліза на 30-35%, міді на 20-25%, алюмінію на 10-15% і в цілому двигуна на 25-30% відносно звичайних двигунів.

Орієнтовні залежності ККД і $\cos\phi$ від номінальної потужності для звичайних і енергозберігаючих двигунів фірми Гоулд наведені нарис.6.1.

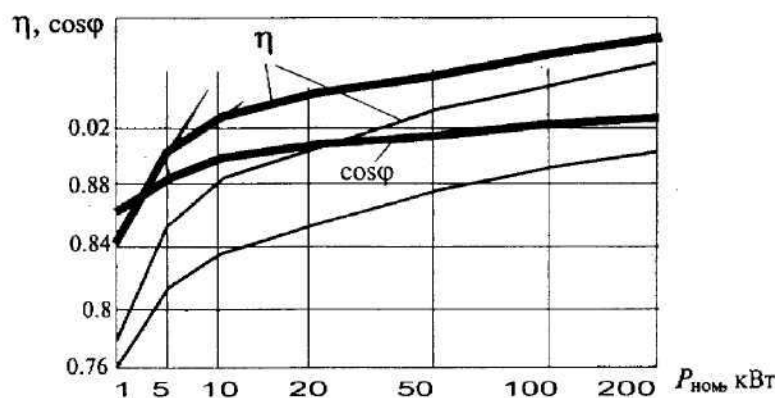


Рисунок 6.1

Очікується зміна методик проектування двигунів, що відповідають їх застосуванню в складі саме регульованого електропривода. Насамперед це стосується асинхронного двигуна, для якого відмова від традиційних вимог фіксованої амплітуди і частоти мережі живлення, прямого вмикання в мережу живлення, забезпечення заданої перевантажної спроможності призводить до істотної зміни конструкції і різкого поліпшення характеристик. Слід відзначити випуск серії асинхронних двигунів, спроектованих фірмою 5іетеп5 для загальнопромислових електроприводів. Змінюється методика проектування й інших типів двигунів, розширюється їх номенклатура. Очевидно, варто очікувати різкого, вибухового поліпшення

характеристик по-новому спроектованих двигунів для регульованого електропривода, і відповідного коригування вимог до систем керування. Так прогнозується зростання частоти живлення двигунів у регульованому електроприводі до 500-1000 Гц і вище та зниження індуктивностей обмоток.

Спостерігається зростання випуску електропривода із синхронними двигунами зі збудженням від постійних магнітів (так званий безконтактний вентильний двигун (ВД) постійного струму). Ці двигуни мають найкращі масогабаритні показники. Серед інших типів двигунів виділимо індукторний двигун (Switch Reluctance Motor), який розроблений і активно пропонується в останні роки. Як стверджують розробники, його характеристики поліпшені, що в комбінації зі спрощеним силовим перетворювачем дозволяє сподіватися на його масове застосування.

Перспективним є також синхронно-реактивний двигун, що за прогнозами матиме масогабаритні показники, які лежать у проміжку між відповідними рекордними значеннями синхронного й асинхронного двигунів, а за енергетичною ефективністю, можливо, перевершує їх, причому при нижчій вартості. Реактивні вентильні двигуни спрощують схеми комутаторів і якірних обмоток. При оптимізації кута випередження інвертора можна домогтися збільшення моменту і ККД привода. Існує оптимальний кут випередження залежно від частоти обертання. Збільшення ККД досягається також за рахунок відповідного скорочування кроку обмотки.

На рис.6.2 зображені максимальні потужності електричних машин (1 - синхронних з надпровідною обмоткою і з пуском за схемою ВД; 2- синхронних з асинхронним пуском; 3-постійного струму).

Для найкращого використання синхронного двигуна традиційної конструкції необхідно зменшити надперехідні реактивні опори (за рахунок відкритих пазів статора, збільшення повітряного зазору, демпферної обмотки на роторі тощо) і реакцію якоря (за рахунок збільшення повітряного зазору і вибором коефіцієнта полюсного перекриття).

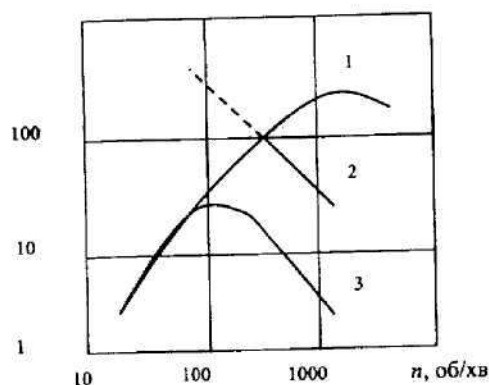


Рисунок 6.2

Слід також відмітити, що Першотравневим заводом у Донбасі налагоджений випуск низьковольтних (380/660В) асинхронних

короткозамкнених двигунів з підвищеним пусковим моментом (до 3...4 відн. од.). Такі двигуни ефективні в системах регульованого привода і споживають практично в два рази менший пусковий струм, а також можуть бути використані в умовах вугільних шахт (у вибухо-пожежонебезпечних умовах).

ТРЕТІЙ ШЛЯХ полягає в усуненні проміжних передач.

Суть проблеми полягає втім, що електрична енергія доступна на фіксованій частоті (50 Гц), а механічна енергія потрібна в широкому спектрі частот (швидкостей). Методи, розроблені багато років тому для вирішення цієї проблеми, використовують дорогі системи, двигун чи механічні регулятори.

До складу узагальненої схеми електропривода входять - перетворювач чи механічний регулятор (коробки швидкостей, муфта ковзання), муфта, редуктор і робочий орган, що є частиною робочої машини (рис.6.3).

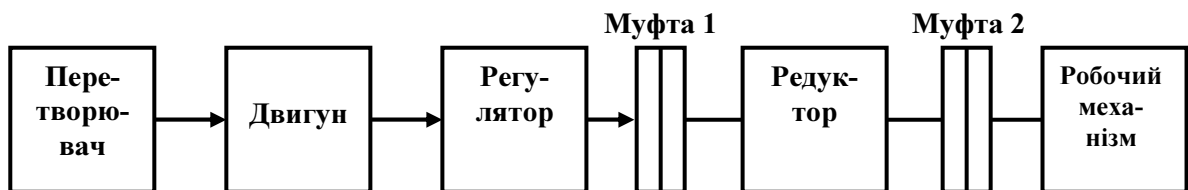


Рисунок 6.3 –

Орієнтовні значення ККД елементів привода складають:

перетворювач — $\eta_{\text{п}} = 0,5 \div 0,95$ (менші значення — для малих швидкостей обертання, великі – для більш високих швидкостей);

двигун — $\eta_{\text{д}} = 0,75 \div 0,95$ (менші значення для мікромашин, більші — для машин підвищеної потужності);

механічний регулятор — $\eta_{\text{рег}} \approx 0,9 \div 0,95$;

муфта — $\eta_{\text{м}} \approx 0,99$;

редуктор — $\eta_{\text{р}} = 0,95$;

робочий механізм — $\eta_{\text{рм}} \approx 0,95$ (для приводного барабана стрічкового конвеєра).

Коефіцієнт корисної дії системи електропривода

$$\eta = \eta_{\text{п}} \eta_{\text{д}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{рм}}$$

Підстановка у формулу усереднених значень ККД для привода з електродвигуном потужністю 10-100 кВт дає значення ККД у діапазоні $\eta = 0,65 - 0,75$. При цьому в середньому від семи до десяти відсотків потужності втрачається в механічних передачах. Таким чином, усунення

За способом передачі механічної енергії від вала двигуна до робочого механізму електропривод поділяють на три групи:

– груповий (рис.6.4,а), у якому кілька робочих машин приводять в рух через передачі одним двигуном (привод зернозбирального комбайна);

- одиночний (рис.6.4,б), у якому кожен механізм приводиться в рух одним двигуном;
- багатодвигуновий (рис.6.4,в), у якому окремий механізм приводиться в рух кількома двигунами (приводний барабан конвеєра, барабан підйомної машини, привод повороту потужного екскаватора).

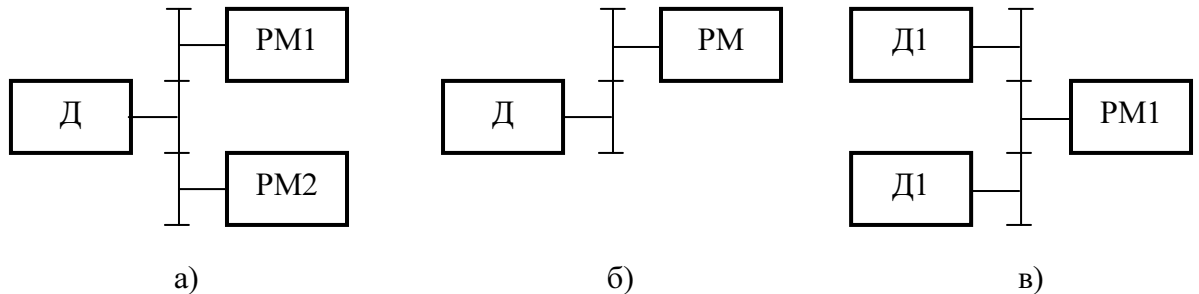


Рисунок 3.6

Впровадження одиночного привода крім зниження в кілька разів енергоємності виробництва за рахунок усунення безлічі проміжних передач і кращого використання встановленої потужності привода дозволило значно підвищити надійність виконання технологічних процесів, крім того, знизити виробничий травматизм, обумовлений наявністю великої кількості відкритих механічних передач. Також покращилися умови праці за рахунок усунення звукових ефектів, пов'язаних з роботою великої кількості ремінних і ланцюгових передач, різноманітних муфт, валів, що обертаються, довжиною до 20 м, зубцевих і черв'ячних передач тощо.

Для приведення в рух робочого механізму до нього необхідно прикласти деякий момент при визначеній швидкості. При цьому потужність на валу складе:

$$P = M\omega.$$

На рис.6.5 зображено розподіл енергії в однодвигуновому одношвидкісному приводі.

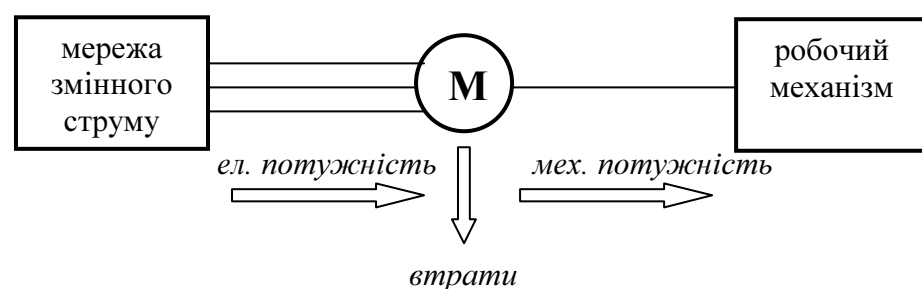


Рисунок 6.5

Умови змінюються, якщо регулювати швидкість розглянутого устаткування, використовуючи редуктор фрикційного типу (муфта, ремінь, гідравлічне сполучення тощо). У цьому випадку момент на валу двигуна і робочого механізму однаковий, але швидкості різні (рис.6.6). Таким чином, різниця потужностей перетворюється в тепло фрикційної передачі:

$$M\omega_d - M\omega_{pm} = M(\omega_d - \omega_{pm}) = \Delta P.$$

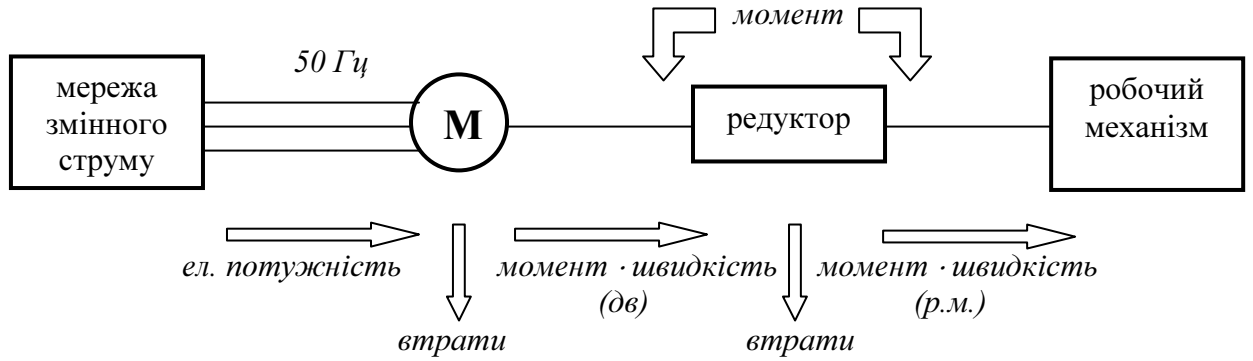


Рисунок 6.6

Інший приклад показаний на рис.6.7. Як привод насоса використовується двигун з постійною швидкістю. Потік рідини контролюється закриттям і відкриттям клапана. Крім випадку, коли клапан цілком відкритий, енергія втрачається в клапані і насосі. Таким чином, регулювання дроселюванням неефективне.

Практично немає втрату випадку, коли керування здійснюється за допомогою механічних передач (рис.6.8), тому що передача перетворить і момент, і швидкість. їх добуток залишається постійним. При якісному обслуговуванні передачі мають дуже мале тертя. Таким чином, потужності на вході і виході привода практично дорівнюють одна одній. Однак передачі,

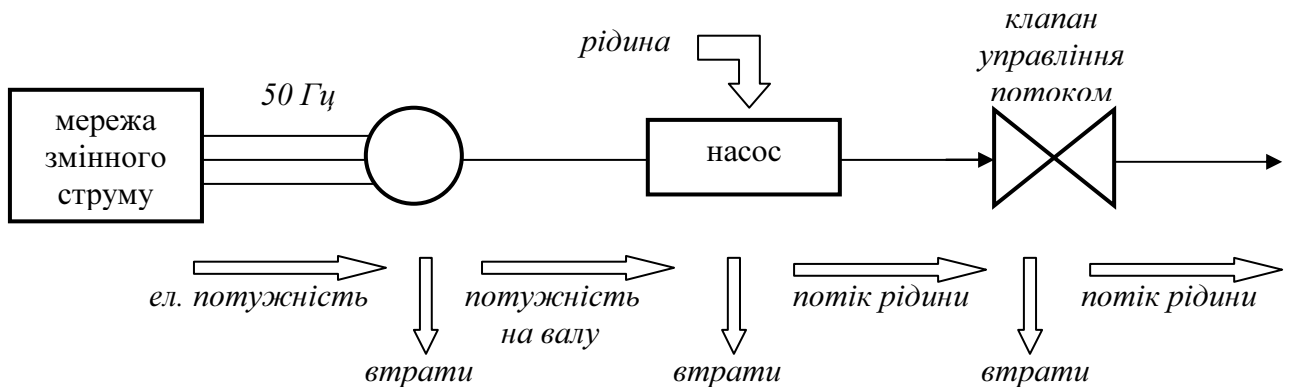


Рисунок 6.8

що постійно перемикаються, непридатні для приводів з великою потужністю, вони дорогі мають потребу в частому обслуговуванні. Стаціонарні багаторівневі коробки передач, хоч і придатні для потужних приводів, мають усі вищезгадані недоліки.

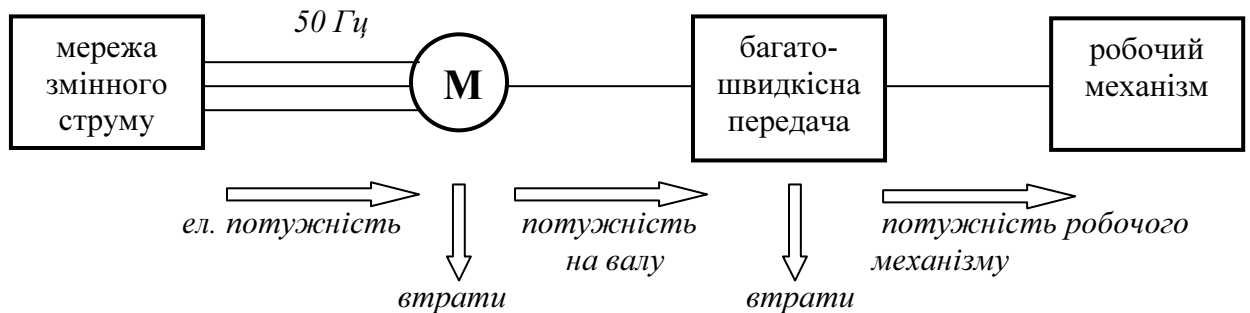


Рисунок 6.9

При виборі перспективних варіантів систем електроприводів варто враховувати можливість використання багатодвигунового електропривода, що уданий час одержав значне поширення в промисловості. Його використання, обумовлене такими причинами:

- відсутністю приводного двигуна, редуктора чи іншої механічної передачі необхідної потужності;
- бажанням підвищити швидкодію привода за рахунок зниження сумарного моменту інерції приводних двигунів;
- необхідністю забезпечення підвищеної надійності приводних пристроїв шляхом завищення встановленої потужності привода, тобто створення резерву на випадок виходу з ладу одного чи декількох двигунів;
- бажанням створення більш сучасних машин і механізмів (наприклад, стрічкових конвеєрів із двома і більше приводними барабанами, установок із проміжними приводами тощо);
- необхідністю економії електроенергії в механізмах з великим діапазоном зміни навантаження (більше, ніж у 1,5÷2 рази).

Застосування багатодвигунового привода в складних технологічних установках найчастіше дозволяє значно спростити й здешевити їх за рахунок усунення складних і дорогих механічних передач між різними виконавчими органами. При цьому з'являються також можливості підвищення продуктивності, економічності і поліпшення інших експлуатаційних характеристик.

ЧЕТВЕРТИЙ ШЛЯХ полягає в економії електроенергії робочими установками і механізмами за рахунок підвищення ефективності виконання технологічного процесу.

Промислові підприємства вимагають підвищення ефективності роботи технологічних установок і механізмів, особливо вугільні шахти, які є

великими споживачами електричної енергії і складним електроенергетичним господарством. Встановлена потужність окремих електроприймачів шахт складає десятки тисяч кіловат при річному споживанні електроенергії в десятки і навіть сотні мільйонів кіловат - годин, одинична ж потужність окремих машин досягає кількох тисяч кіловат.

Структура елекгроспоживання шахти (рис.6.10) залежить від багатьох факторів, основними з яких є глибина шахти, водонасиченість, продуктивність тощо (ДСТУ 3224-95 «Методи визначення норм витрачання електроенергії гірничими підприємствами»). Тут: 1 - видобувні роботи — 5,26%; 2- підготовчі — 1,29%; 3- підземний транспорт - 5,60%; 4- кондиціонування повітря — 10,88%; 5-водовідлив- 14,28%;6-підйом- 13,32%; 7-вентиляція 17,13%; 8-технологічний комплекс поверхні — 3,75%; 9- вироблення стиснутого повітря — 2,46%; 10- інші електроприймачі — 20,58%; 11-освітлення - 0,69%; 12- втрати електроенергії - 4,76%.

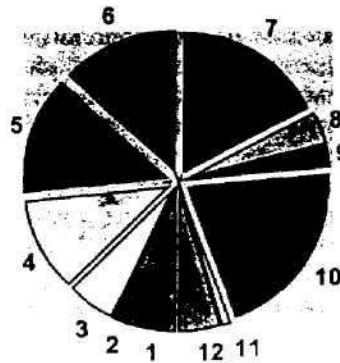


Рисунок 6.9

Економія електроенергії установками і механізмами за рахунок підвищення ефективності виконання технологічного процесу містить у собі такі основні заходи:

- узгодження режимів роботи установки при зміні навантаження;
- підвищення ККД установки;
- регулювання продуктивності установки;
- виконання оптимальної циклограми й упорядкування графіка навантажень;
- забезпечення нормованого завантаження (для підйомних машин, конвеєрів тощо);
- контроль стану технологічної установки;
- застосування нових видів електропривода;
- організаційні заходи.

Особливості видобутку вугілля вимагають збільшення електроспоживання окремих електроприймачів. Так для водонасичених шахт потрібна установка 10, а в деяких випадках і більшої кількості насосів. Для шахт крутого падіння потрібна розгалуджена мережа стиснутого повітря з

компресорним господарством у десятки тисяч кіловат. У глибоких шахтах потрібне збільшення потужності підйомної машини до 10 МВт. За таких умов економія електроенергії в окремих споживачах і шахти в цілому може мати значну величину, що в остаточному підсумку позначиться на зниженні собівартості видобутого вугілля.

П'ЯТИЙ ШЛЯХ полягає у виборі раціональних режимів роботи й експлуатації електропривода. Сюди входять:

- вибір раціонального способу і діапазону регулювання швидкості електропривода залежно від технологічних умов роботи машин і механізмів;

- вибір раціонального способу регулювання швидкості залежно від характеру зміни навантаження;

- підвищення завантаження робочих машин; виключення режиму неробочого ходу; зниження напруги на затискачах двигуна; мінімізація струму і втрат енергії АД при зміні навантаження; оптимізація динамічних режимів;

- використання синхронної машини як компенсатора реактивної потужності;

- використання акумуляторів енергії.

Необхідність вивчення технологічного режиму робочої машини є основою для можливого комплексу заходів, що забезпечують ефективність енергозбереження. При цьому мова може йти як про регулювання швидкості технологічного агрегату, так і про його керованість. Під терміном «керованість» розуміється можливість зміни параметрів технологічного режиму за рахунок інших методів впливу, у тому числі й найпростіших - періодичних пусків і зупинок.

Розглядаючи, наприклад, електропривід турбомеханізмів, можна відмітити, що можливі три принципово різних способи регулювання технологічного параметра:

- аеродинамічним шляхом, що полягає у впливі на характеристики проточної частини (дроселюванням чи установкою кута нахилу лопаток направляючого апарата). Спосіб пов'язаний з істотним зниженням ККД;

- зміною швидкості обертання шляхом застосування регульованого електропривода. Це забезпечує практично незмінний високий ККД при істотному збільшенні капітальних витрат;

- шляхом вмикання і вимикання кількох агрегатів у випадку, якщо працює група електроприводів.

Третій варіант регулювання має обмеження — за числом пусків нерегульованих електроприводів через небезпеку виходу з ладу електричних машин, з одного боку, і за числом пусків для технологічного механізму через екстремальні технологічні навантаження в агрегаті, що пускається, при прямому некерованому пуску, з іншого. Аналіз показує, що при плавному керованому пуску практично виконуються дві наведені умови. Стосовно до приводів змінного струму як варіант схеми керованого пуску може служити

схема з тиристорним регулятором напруги (ТРН) у колі статора. Вартість таких пристроїв приблизно в п'ять разів нижче вартості систем частотно-регульованого електропривода. В окремих випадках застосування пускових систем підвищує час наробітку на відмову синхронних двигунів у кілька разів, робочих коліс відцентрового насоса на 15 — 75 % тощо.

Іноді пуски двигунів утруднюються через високу концентрацію робочого тіла в робочій частині турбомеханізму (руда в млині), заклинювання коліс насосів тощо. За таких умов навіть при повній напрузі живлення пусковий момент двигуна може бути меншим моменту зрушення механізму, і звичайна схема ТРН для пуску таких технологічних машин не дає необхідного позитивного результату. У цьому випадку є виправданим переведення ТРН у режим перетворювача частоти, тобто застосування так званого квазічас-тотного керування. Цей захід дає позитивний результат, оскільки дозволяє здійснити передпускове прокручування агрегату при частотах 0 — 0,7 Гц. Застосування пускових пристроїв дозволяє вирішити дві пов'язані одна з одною задачі: забезпечити реальне енергозбереження засобами електропривода і зберегти працездатність механічного й електромеханічного устаткування.

Зниження продуктивності машин і установок призводить до зниження ресурсу працездатності за цілим числом факторів, так чи інакше пов'язаних зі зростанням числа пусків електричних двигунів (у тому числі і в регульованих електроприводах). При цьому необхідно враховувати таке:

- в умовах істотного зниження продуктивності агрегатів і процесів, відсутності можливості використання регульованого електропривода через його дорожнечу, істотним резервом економії електроенергії є періодичні відімкнення енергоємних споживачів. При цьому необхідно використовувати спеціалізоване енергозберігаюче устаткування — пускові системи, що забезпечують як без посередню економію енергоресурсів, так і працездатність електричних машин;

- насиченість парку електричними машинами, що були в ремонті, свідомо визначає досить високі витрати на ремонт електроустаткування. При цьому висока аварійність електричних машин визначається не стільки низькою якістю ремонту, скільки зміною характеристик конструкційних матеріалів (насамперед електротехнічної сталі), що призводять до перерозподілу втрат у двигуні і зміни теплового балансу та зниження реальної навантажувальної спроможності;

- відхилення напруги живлення, через відсутність засобів її ефективного регулювання, призводить до зростання споживаної реактивної потужності асинхронними двигунами, зниження її генерування синхронними машинами, збільшення втрат у сталі, підвищення аварійності двигуна;

- будь-які форми неякісної напруги живлення, порушень використання енергії споживачем через зміну його внутрішніх характеристик призводять не лише до збільшення втрат, але і появи змінних складових електромагнітного моменту двигуна. Знакозмінні складові моменту є

причиною високочастотних вібрацій всіх елементів конструкції, передчасного старіння ізоляції і підвищення аварійності електроустаткування.

Як правило, необхідність регулювання швидкості чи моменту електроприводів виробничих механізмів диктується вимогами технологічного процесу. Наприклад, зниження швидкості ліфта необхідне для точного позиціонування кабіни перед зупинкою. Однак існує ряд механізмів безперервного транспорту для переміщення твердих, рідких і газоподібних продуктів (конвеєри, вентилятори, насоси) з нерегульованим асинхронним електроприводом, що надає руху робочим органам з постійною швидкістю незалежно від завантаження механізмів. При неповному навантаженні робота з постійною швидкістю характеризується підвищеною питомою витратою електроенергії в порівнянні з номінальним режимом.

Зниження швидкості механізмів безперервного транспорту при недовантаженні дозволяє виконати необхідну роботу з меншою питомою витратою електроенергії. У ньому випадку економічний ефект з'являється також за рахунок поліпшення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування. Так, при зниженні швидкості зменшується знос тягового органа транспортера, збільшується термін служби трубопроводів за рахунок зниження тиску тощо. Ефект у сфері технології часто виявляється істотно вищим, ніж за рахунок економії електроенергії.

З іншого боку, висувається необгрунтоване бажання використовувати плавно регульовані системи привода з великим діапазоном регулювання для цих установок. У той же час досить великий діапазон регулювання продуктивності для механізмів з вентиляторним характером навантаження можна одержати при діапазоні зміни швидкості, що не перевищує 20%.

Як інший приклад можна навести ліфти в невисоких будинках (до 16 — 24 поверхів), коли замість дорогої, складної і менш надійної плавно регульованої системи можна обійтися використанням двошвидкісного АД з короткозамкненим ротором і підвищеним пусковим моментом.

Такий привод дозволяє в кілька разів знизити робочу швидкість кабіни перед зупинкою, що зменшує знос гальмівного пристрою і збільшує саму точність зупинки. Пуск двошвидкісних двигунів - прямий на високу швидкість. Гальмування виконується перемиканням напруги на обмотку малої швидкості. Відтак двигун переходить у режим генераторного гальмування і частота його обертання знижується в 3-4 рази. Зупинка двигуна здійснюється відключенням від мережі обмотки малої швидкості і накладенням механічного гальма.

Наступний напрям енергозбереження належить до основних споживачів електричної енергії - електроприводів з нерегульованими АД і полягає в створенні спеціальних схемних рішень, що забезпечують мінімізацію шкідливого впливу на енергетичні показники при відхиленні навантаження від номінального. Спеціальні регулятори електричної енергії (регулятори напруги), що включаються між джерелом живлення і статором двигуна, крім енергозбереження виконують також інші функції (керують

режимами пуску і гальмування, регулюють швидкість і момент, здійснюють захист, діагностику тощо), тобто підвищують технічний рівень привода, збільшують його надійність.

При роботі АД має місце недовикористання встановленої потужності, необгрунтоване завищення їх потужності, а також недовантаження. При цьому знижуються ККД і коефіцієнт потужності АД. Регулювання напруги на статорі АД при постійній частоті забезпечує найекономічніший режим його роботи при зміні навантаження. Отже, мінімізується споживаний асинхронним двигуном струм і тим самим втрачається електроенергія в ньому.

Регулювання напруги АД у функції струму знижує втрати електроенергії до 5%, що при широкому застосуванні асинхронного електропривода дозволяє одержати великий економічний ефект.

Проблема акумуляторів енергії для систем електропривода є досить важливою. Акумулятори енергії з різними фізичними принципами її акумуляції перспективні насамперед для транспортних систем. Визначено перспективу в застосуванні акумуляторів — компенсаторів в електроприводах з різкозмінним навантаженням, як регульованих, так і нерегульованих. Нова елементна база і насамперед, малогабаритні ємнісні акумулятори, робить реальними передумови до створення принципово нових комплектних пристроїв для сучасного електропривода - накопичувально-компенсуючих пристроїв, з відповідними системами керування.

ШОСТИЙ ШЛЯХ полягає у виборі раціонального типу електропривода для конкретної технологічної установки і переході від нерегульованого електропривода до регульованого. Він припускає виконання таких операцій:

- аналіз технологічного процесу, умов експлуатацій, у результаті, розробка технічних вимог до електропривода;
- вибір перспективних варіантів систем електроприводів, їх техніко-економічне порівняння і вибір раціонального типу електропривода;
- розрахунок системи електропривода, у тому числі встановленої потужності і розробка системи керування;
- розробка конструкторської документації.

Удосконалювання технологічних процесів і автоматизація виробництва пов'язані з застосуванням регульованого електропривода. Застосування регульованого електропривода сприяє вирішенню задач щодо забезпечення оптимальних режимів роботи механізмів, зниження собівартості і підвищення якості продукції, що випускається, зростання продуктивності праці, підвищення ефективності використання енергії, надійності і терміну служби устаткування.

Варто згадати, що асинхронні двигуни зі змінним опором у колі ротора (рис.6.11) і двигуни постійного струму незалежного збудження з регульованим реостатом (рис. 6.12), керуються зі збільшенням втрат.

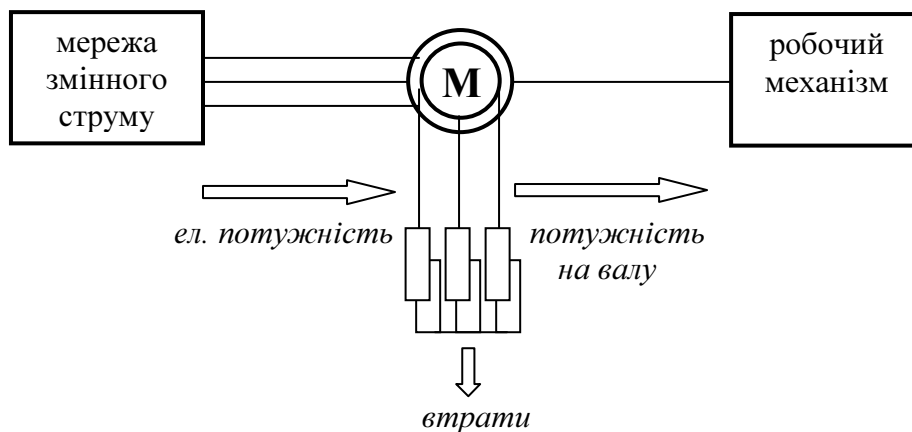


Рисунок 6.11

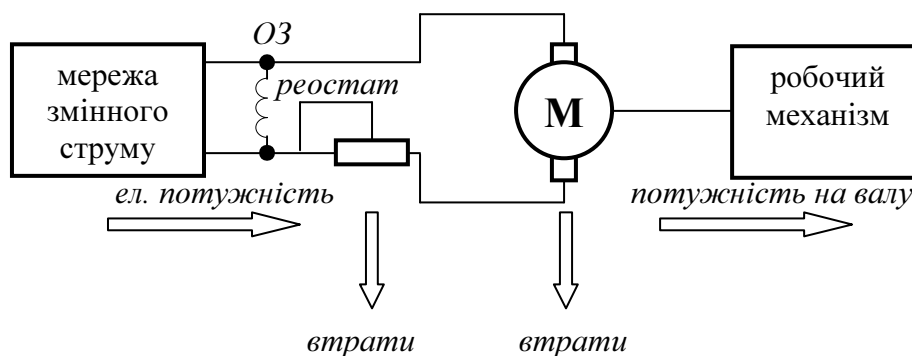


Рисунок 6.12

З погляду енергозбереження найбільш ефективні регульовані електроприводи змінного струму, особливо для турбомеханізмів (вентиляторів, компресорів, насосів), підйомних машин, верстатів із ЧПУ тощо. Економія електроенергії може складати до 50% .

Цілий ряд промислових механізмів (транспортні, підйомно-транспортні, транспортно-складських і робототехнічних систем, ліфти тощо) працюють з частими вмиканнями, вимагаючи реалізації пускогальмівних режимів. Використання для керування такими механізмами відносно недорогих систем ТРН-АД дозволяє здійснювати режими плавного (м'якого) пуску і гальмування за рахунок формування необхідного гасового закону зміни напруги першої гармоніки при ударі у пуску чи значення постійної напруги при динамічному гальмуванні. Це забезпечує істотне зниження пускових струмів, зменшення енергоспоживання на 3-6% (залежно від потужності двигуна й інтенсивності роботи), а також вирішення ряду технологічних задач (обмеження механічних кінематичних передач,

зниження прискорень і ривків, збільшення надійності і терміну служби устаткування).

Якщо за сукупністю вимог для керування механізмом доцільно використовувати регульований, частотно-регульований електропривод, то реалізація режимів частотного пуску і гальмування дозволяє знизити втрати енергії в перехідних режимах у кілька разів у порівнянні з некерованими перехідними процесами. У цьому випадку, функціональна схема виглядає, як показано на рис.6.13. На противагу рис.6.5 видно, що двигун змінного струму живиться електроенергією зі змінюваною частотою від перетворювача частоти (ПЧ). Оскільки швидкість двигуна буде відповідати частоті електричного струму мережі, регулюючи частоту на виході перетворювача, одержимо зміну швидкості двигуна. Втрати енергії, що спостерігалися на рис. 1.16; 1.17; 1.20 і 1.21 зведені до нуля.

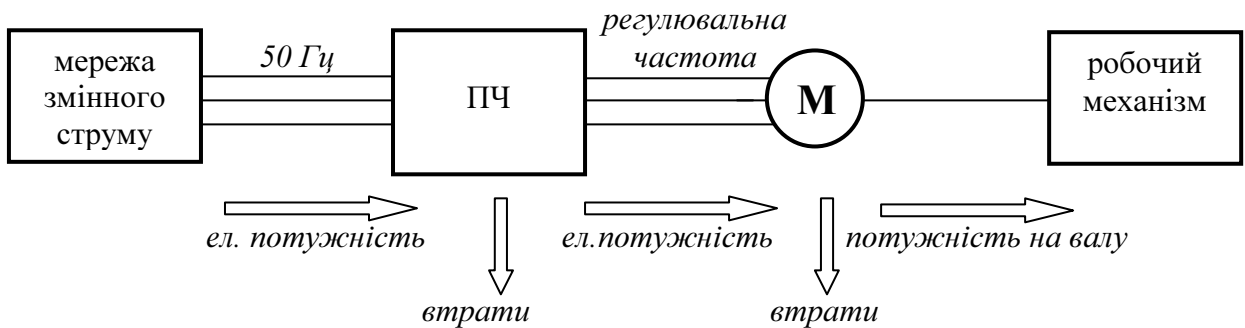


Рисунок 6.13

Дуже перспективні вентильні двигуни з постійними магнітами. Новим шляхом енергозбереження стає переведення двигунів на модульну конструкцію й оптимізація режимів їх роботи на базі мікроконтролерів, що дозволить у 3 -і- 5разів знизити втрати енергії, у 2 -і- 3 рази зменшити масу двигунів.

При переході від нерегульованого електропривода до регульованого варто пам'ятати, що:

- економія енергії часто досягається не за рахунок власне при вода, а за рахунок того процесу, що привод обслуговує. При цьому економія може в багато разів перевищувати власне споживання електропривода;

- для одержання корисного енергетичного ефекту часто не обхідне регулювання в дуже невеликих межах при обмежених вимогах до якості регулювання. Так, лише незначне регулювання швидкості насоса, що подає гарячу воду в будинок, забезпечує істотну економію дорогої гарячої води. Такий підхід дозволяє замість дорогих і складних перетворювачів частоти використовувати значно дешевші і надійніші регулятори напруги, підведеної

до обмоток статорів асинхронних двигунів;

– в даний час намітилася тенденція заміни регульованого при вода постійного струму на привод змінного струму. На сьогоднішній день частка регульованого привода змінного струму мала, однак вона постійно зростає.

У галузях промислового використання приводів постійного струму з'явився попит на більш надійні безколекторні машини, при експлуатації яких потрібно менше витрат. Назріла також необхідність у застосуванні безконтактних приводів змінного струму, що забезпечують підвищення ККД і енергетичних показників установки, її продуктивність і надійність. У таких великих машинах, як шахтні стаціонарні установки, для економічного регулювання продуктивності необхідний безконтактний привод.

У підйомних установках підвищення ККД, надійності, ресурсу працездатності і зменшення експлуатаційних витрат неможливі без заміни привода постійного струму на безредукторний безколекторний привод змінного струму з аналогічними регульовальними властивостями.

Економічна доцільність використання синхронних двигунів на потужних конвеєрах і технологічні вимоги обумовлюють необхідність застосування безколекторного чи безконтактного регульованого привода змінного струму з СД.

Сформовані традиції застосування синхронних двигунів для потужних турбомеханізмів з метою підтримки високих загально-шахтних енергетичних показників при мінімальних витратах і вимоги регулювання продуктивності зміною частоти обертання робочого колеса свідчать про актуальність використання регульованого безколекторного привода змінного струму з СД.

Одним з найбільш перспективних і універсальних типів електроприводів із синхронними машинами є безколекторний або безконтактний вентильний двигун, у якому регулювання швидкості і " моменту здійснюється підведеними напругою, струмом збудження і кутом випередження вмикання вентилів при самоуправлінні по частоті живлення. Він має регульовальні якості машин постійного струму і надійність систем змінного струму.

Для широкого впровадження регульованого електропривода необхідно вирішити безліч задач, у тому числі такі:

- розробити спеціальні синхронні двигуни для застосування їх у системі вентильного двигуна (у тому числі індукторні);
- розробити спеціальні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором для застосування їх у системах частотно-регульованого електропривода;
- зменшити вплив вентильних перетворювачів на мережу;
- створити перетворювачі, форма струму і напруги яких наближалася б до синусоїдальної.

Істотне зниження енергоспоживання за рахунок широкого застосування регульованого електропривода в даний час важко реалізувати через обмежені можливості капіталовкладень з метою реконструкції електроприводів. Необхідно використовувати раціональний підхід, що поєднує можливості

регульованого і нерегульованого, наприклад, керованого по пуску, що забезпечує ефект досить близький до найдосконаліших приводів. Варто враховувати і рівень обслуговування електроустаткування, що, як правило, не відповідає стандартам, властивим регульованим приводам з високими технічними характеристиками. У цьому зв'язку для одержання економічної ефективності при мінімальних витратах необхідно розробити такі системи і заходи:

- системи полегшеного пуску синхронних двигунів електроприводів, що забезпечують економію електроенергії до 10–15% і підвищення технічної надійності СД у 2-3 рази;

- системи плавного запуску групи потужних синхронних двигунів турбокомпресорів, насосів, вентиляторів за схемою ТРН-СД, що забезпечують підвищення надійності електричних машин, турбо механізмів і зниження плати за електроенергію до 20%;

- пристрої і системи для керування рівнем напруги живлення, що забезпечують істотне зниження енерговитрат і підвищення працездатності електроустаткування;

- формування технологічного завантаження електродвигунів відповідно до сертифікаційних параметрів, одержаних вході після - ремонтних випробувань при експлуатації;

- використання систем діагностики електроприводів, які базуються на енергетичних критеріях, що забезпечить визначення втрат і сертифікацію двигунів після їх ремонту на спеціалізованих підприємствах;

- формування графіків навантаження установок з потужними електроприводами, технологічними ємностями тощо.

Для приводів механізмів, що вимагають плавного пуску і незначного {до 10%) діапазону регулювання швидкості (насоси, вентилятори, компресори, конвеєри тощо) застосовують тиристорні регулятори напруги. Завод ХЕМЗ виготовив і впровадив кілька таких систем у високовольтному виконанні (6 кВ) для привода механізмів з вентиляторним характером навантаження. На Запорізькому електроапаратному заводі налагоджений випуск низьковольтних регуляторів напруги для керування двигунами потужністю до 100 кВт.

Аналіз режимів роботи регульованого і нерегульованого електропривода вказує на неоднозначність поняття ефективної роботи приводів змінного струму в області частот обертання близьких до номінальної. Очевидно, що тут є визначений діапазон швидкостей, де застосування нерегульованого електропривода більш раціональне. Це пояснюється тим, що будь-яка схема регульованого електропривода крім втрат енергії, що йдуть на її перетворення, призводить до додаткових втрат у самому двигуні і шкідливо впливає на мережу живлення й інші пристрої і системи. Під поняттям «шкідливо» розуміють насамперед додаткові втрати, електромагнітну несумісність і передчасну зношуваність електроізоляційних матеріалів.

Очевидна необхідність створення систем, що забезпечували б контроль зони економічної роботи (ω_n — $D\omega_1 J \omega J \omega_n + D\omega_2$), а також значення

швидкостей $\omega_{\text{вг}}$ і $\omega_{\text{нг}}$, при яких робота привода неефективна через технічні й інші обмеження з одного боку, і небезпечна при перевищенні припустимої швидкості, з іншого (рис. 6.14).

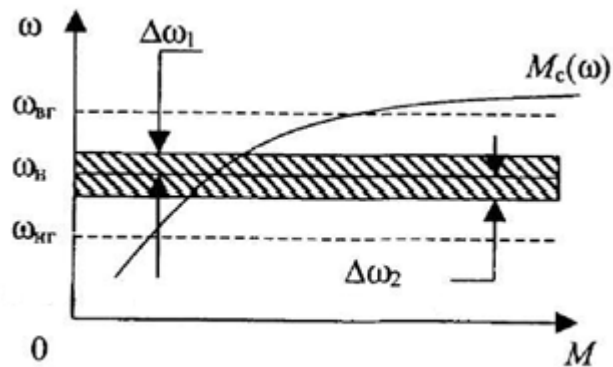


Рисунок 6.14

СЬОМИЙ ШЛЯХ полягає в поліпшенні якості електроенергії засобами силової перетворювальної техніки регульованого електропривода.

Регульований електропривод при роботі впливає на мережу електропостачання, що виражається в зниженні коефіцієнта потужності на вході перетворювача, коливаннях напруги в мережі і спотворенні синусоїдальної форми напруги.

Зниження коефіцієнта потужності збільшує реактивну потужність системи електропостачання, що призводить до додаткових втрат напруги й енергії і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів.

В електричних мережах підприємства із сучасним устаткуванням вентильні перетворювачі знаходять усе ширше застосування. Питома вага нелінійних навантажень безупинно зростає. В цих умовах рівень вищих гармонік у кривій напруги мережі нерідко досягає 10-15%.

Несинусоїдальність напруги і струму обумовлює додаткові втрати і нагрівання, а також прискорене старіння ізоляції електродвигунів, трансформаторів і, крім того, негативно позначається на функціонуванні різних видів електроустаткування. Специфічний вплив на різні види електроустаткування, системи релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку виявляється диференційованим і залежить від амплітудного спектру напруги (струму), параметрів електричних мереж та інших факторів. У загальному випадку відсутня залежність між енергією гармонічної перешкоди і ступенем впливу її на електричну мережу. Ця обставина обумовила широке застосування показника, що характеризує спотворення кривої напруги мережі на затискачах електроприймачів, який називається коефіцієнтом несинусоїдальності напруг, %:

$$k_{\text{НС}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_{\text{Н}}} 100$$

де U_n і $U_{\text{Н}}$ — напруга n -ї гармоніки і номінальна напруга мережі.

Відповідно до ДСТУ 13109-87 припустиме значення $k_{\text{НС}}$ обмежується 5% з інтегральною ймовірністю 95% за час вимірювання, зазначений у стандарті. Номер останньої з гармонік, що враховуються, не наведений. Він може бути визначений у конкретних випадках, виходячи з загальноприйнятого в електротехніці 5%-ого рівня значимості результатів. Не враховуються в розрахунку $k_{\text{НС}}$ гармоніки, нехтування якими призводить до додаткової похибки понад 5%.

У стандарті не вказуються припустимі значення $k_{\text{НС}}$, значення окремих гармонік напруги і струму у вузлах мережі; немає також вказівок щодо характеру частотної характеристики мережі. Вимоги ДСТ 13109-87 відносяться до електричних мереж загального призначення; тому в деяких випадках може бути допущений $k_{\text{НС}} > 5\%$. Наприклад, на шинах перетворювачів прокатних станів припустиму несинусоїдальність напруги визначають, виходячи з умов нормальної роботи перетворювачів при відсутності на їх шинах інших навантажень.

Остання обставина послужила причиною обмежень несинусоїдальності на більш високих ступенях напруги, що містяться в стандартах деяких країн. Так, у Швеції для мереж 0,25—0,43 кВ припустимі значення $k_{\text{НС}}$ відповідають 4%, для мереж 3,3-24 кВ — 3%, 36 - 72 кВ - 2%, вище 84 кВ - 1%. У Японії для мереж 1 - 66 кВ і більше — відповідно 2 і 1%. У Європейському стандарті EN 50,006 припустимі значення гармонік напруги задаються на затискачах еталонних опорів, що рівносильне нормуванню гармонік струму.

Обмеження гармонік струму, генерованих окремими нелінійними навантаженнями чи проникаючих з розподільних мереж у мережі енергосистеми, у найбільшій мірі сприяє зменшенню впливу гармонічних перешкод на інші електроприймачі й електричні мережі. Так, у Франції і ФРН ці струми обмежуються 5% діючого значення усіх вищих гармонік струму, генерованого нелінійними навантаженнями чи цеху, чи підприємства. У публікації 555-2 МЕК передбачене обмеження гармонік струму, створюваних побутовими електроприладами в низьковольтній системі електропостачання.

Створення й освоєння промисловістю високоефективних силових електронних приладів типу IGBT, GTO тощо дозволило істотно розширити функції силових електронних пристроїв, використовуваних для регулювання якості електроенергії. Вирішення цих задач стало особливо актуальним у зв'язку з реалізацією програм енергозбереження. За останні роки в промислових країнах впроваджені стандарти з жорсткими вимогами до якості електроенергії.

Традиційно для регулювання якості електроенергії використовувалися тиристорні стабілізатори, компенсатори реактивної потужності та пасивні фільтри. Нова елементна база силової електроніки дозволяє створювати перетворювачі змінного/постійного струму, що працюють у 4-х квадрантах комплексної площини на стороні змінного струму з імпульсною модуляцією на підвищених частотах (цей термін відповідає новому стандарту МЕК 60030551). Це дозволяє керувати потоками електроенергії в будь-якому напрямку відповідно до заданого закону.

На рис.6.15 зображено принцип роботи чотириквadrантного перетворювача (напруга має синусоїдальну форму, а струм - трапецієподібну, при цьому фазовий зсув відповідає квадранту площини на векторній діаграмі).

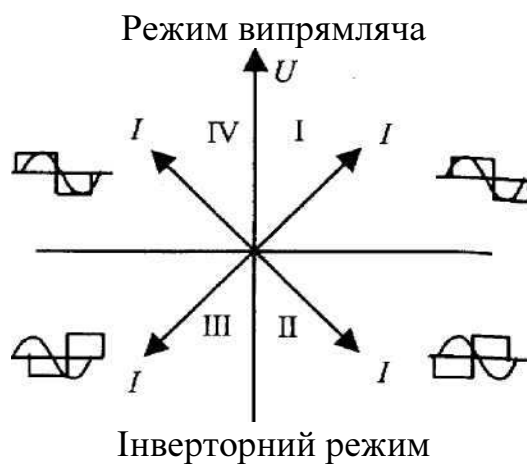


Рисунок 6.15

При підмиканні акумуляторів енергії до перетворювача з боку постійного струму стає можливим здійснювати обмін реактивною потужністю, що включає потужність вищих гармонік між мережею змінного струму і акумулятором. Така схема лежить в основі більшості сучасних методів регулювання якості електроенергії

При коливаннях напруги, особливо в малопотужних електросистемах (невеликі струми короткого замикання), існує проблема їх компенсації, оскільки в цьому випадку вимагаються високошвидкісні пристрої компенсації реактивної потужності.

У цьому випадку ефективне вирішення проблеми може бути здійснене за допомогою нового покоління статичних тиристорних компенсаторів - СТК-лайт, розроблених компанією «Асса Браун Боверн» (ABB).

Технологія компенсаторів СТК-лайт використовує в принципі ту ж саму технологію перетворення напруги мережі, що вже багато років застосовується в електродвигунових установках. Причиною того, що дана технологія не була впроваджена в пристрої компенсації реактивної потужності раніше, був факт відсутності керуючих напівпровідникових пристроїв великої потужності.

Контрольні питання до теми 6

1. Перелічіть шляхи реалізації енергозбереження засобами електропривода.
2. Як впливає віддаленість напруги живлення на споживання реактивної потужності асинхронними двигунами?
3. Залежність впливу недозавантаження робочих машин на ККД електропривода.
4. Залежність коефіцієнта потужності від діапазону регулювання швидкості асинхронного двигуна.
5. У яких випадках можливо перемикання статорної обмотки АД із «зірки» на «трикутник».

ТЕМА 7

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ

Частотно-регульований електропривод з асинхронним двигуном

Застосування частотного регулювання швидкості значно розширює можливості використання асинхронних електроприводів у різних галузях промисловості. У першу чергу це відноситься до установок, де виробляється одночасна зміна швидкості декількох асинхронних двигунів (АД), що приводять у рух, наприклад, групи текстильних машин, конвеєрів, рольгангів і т.п. Використовується частотний принцип регулювання швидкості асинхронних двигунів і в індивідуальних установках, особливо в тих випадках, коли необхідно одержати від механізму високі кутові швидкості, наприклад, для центрифуг, шліфувальних верстатів і т.д. Живлення асинхронних двигунів здійснюється при цьому не від загальної мережі, а від перетворювача частоти, енергія до якого підводиться від мережі постійної частоти f_{1c} і напруги U_{1c} . На виході перетворювача, як правило, міняється не тільки частота f_1 , але і напруга U_1 . Для перетворення частоти можуть бути використані електромашини чи напівпровідникові пристрої, що розрізняються за принципом дії і конструкції.

Можливість зміни швидкості асинхронного двигуна при регулюванні частоти f_1 впливає безпосередньо з виразу $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$, з якого видно, що синхронна швидкість АД прямо пропорційна частоті напруги статора. При регулюванні частоти виникає також необхідність регулювання напруги джерела живлення. Дійсно, е.р.с. обмотки статора асинхронного двигуна пропорційна частоті і потоку

$$E_1 = c\Phi f_1.$$

З іншого боку, зневажаючи в першому наближенні спаданням напруги на опорах обмотки статора, тобто полягаючи $\Delta U_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \approx 0$, можна записати:

$$U_1 \approx E_1 \quad \text{або} \quad U_1 \approx k\Phi f_1.$$

З приведенного виразу випливає, що при незмінній напрузі джерела живлення U_1 і регулюванні його частоти змінюється магнітний потік асинхронного двигуна. Зокрема, зменшення частоти f_1 приводить до зростання потоку і як наслідок до насичення машини і збільшенню струму намагнічування, що зв'язано з погіршенням енергетичних показників двигуна, а в ряді випадків і з його неприпустимим нагріванням. Збільшення частоти f_1 знижує потік двигуна, що при постійному моменті навантаження на валу відповідно до вираження $M = k\Phi f_2 \cos\varphi_2$ приводить до зростання струму ротора, отже до перевантаження його обмоток по струму при недовикористаній сталі. Крім того, з цим зв'язане зниження максимального моменту і перевантажувальної здатності двигуна.

Для найкращого використання АД при регулюванні швидкості зміною f_1 необхідно регулювати напругу одночасно у функції частоти і навантаження.

Регулювання напруги лише у функції однієї частоти з урахуванням характеристики механізму може бути реалізоване в розімкнутих системах частотного управління.

Регулювання напруги у функції навантаження можна здійснити, як правило, лише в замкнених системах, у яких при використанні зворотних зв'язків напруга при даній частоті може змінюватися в залежності від навантаження.

Зміна частоти джерела живлення дозволяє регулювати швидкість асинхронного двигуна як вище, так і нижче основної. Звичайно при регулюванні вище основної швидкості частота джерела живлення перевищує номінальну не більш ніж у 1,5 – 2 рази. Зазначене обмеження обумовлене насамперед міцністю кріплення обмотки ротора. Крім того, з ростом частоти живлення помітно збільшуються величини потужності втрат, які зв'язані з втратами в сталі статора. Регулювання швидкості униз від основної, як правило, здійснюється в діапазоні до 1:10 – 1:15. Нижня межа частоти обмежена складністю реалізації джерела живлення з низькою частотою, можливістю нерівномірності обертання і рядом інших факторів. Використання двигунів спеціальної конструкції дає можливість розширити діапазон регулювання за рахунок збільшення верхньої межі швидкості. Нижня межа швидкості може бути зменшена шляхом введення в схему управління різних зворотних зв'язків.

Якщо при регулюванні частоти живлення напруга змінюється таким чином, що $\Phi = \text{const}$, то припустимий момент на валу асинхронного двигуна при частотному управлінні швидкості також буде незмінним ($M_{\text{доп}} = \text{const}$).

Закони зміни напруги при частотному регулюванні швидкості АД

При виборі співвідношення між частотою і напругою, що підводяться до статора АД, найчастіше виходять з умови збереження перевантажувальної здатності асинхронної машини, тобто кратності критичного моменту до моменту статичного навантаження, для кожної з регульованих механічних характеристик [1]:

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const.}$$

Зневажаючи спаданням напруги на обмотці статора і з огляду на те, що $x_k \equiv f_1$ і $\omega_0 \equiv f_1$, можна знайти:

$$M_n = \frac{3}{2} \frac{U_1^2}{\omega_0 x_k} = A \frac{U_1^2}{f_1^2},$$

де A - коефіцієнт, що не залежить від напруги і частоти;

x_k - реактивний опір короткого замикання.

Тоді для будь-якої частоти f_{1j} джерела живлення і відповідної їй кутової швидкості ω_j можна записати :

$$\lambda(f_{1j}) = \frac{M_{kj}}{M_c(\omega_j)} = A \frac{U_{1j}^2}{f_{1j}^2 M_c(\omega_j)} = \text{const},$$

де U_{1j} - фазна напруга джерела живлення (відповідно на обмотці статора АД) при частоті f_{1j} ;

$M_c(\omega_j)$ - момент статичного навантаження на валу двигуна при швидкості $\omega_j = 2\pi f_{1j} / p$;

p – число пар полюсів АД .

З останнього виразу випливає, що для будь-яких двох значень регульованої частоти f_{1j} і f_{1k} необхідно дотримуватися співвідношення

$$\frac{U_{1j}^2}{f_{1j}^2 M_c(\omega_j)} = \frac{U_{1k}^2}{f_{1k}^2 M_c(\omega_k)}.$$

Звідси випливає основний закон зміни напруги при частотному регулюванні швидкості асинхронного двигуна

$$\frac{U_{1j}}{U_{1k}} = \frac{f_{1j}}{f_{1k}} \sqrt{\frac{M_c(\omega_j)}{M_c(\omega_k)}}.$$

Приймаючи один з режимів роботи двигуна за номінальний, тобто вважаючи, наприклад, що при $f_{1k} = f_{1n}$ до затисків обмотки статора прикладена номінальна напруга U_{1n} і при цьому двигун розвиває номінальний момент, і позначаючи $f_{1j} = f_j$, можна основний закон зміни напруги при частотному регулюванні записати у виді

$$\frac{U_{1j}}{U_{1н}} = \frac{f_{1j}}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M_c(\omega_j)}{M_n}}$$

або у відносних одиницях

$$U_{1*} = f_{1*} \sqrt{M_{c*}} \quad , \quad \text{де}$$

$$U_{1*} = U_1/U_{1н} ; f_{1*} = f_1/f_{1н} ; M_{c*} = M_c/M_n ;$$

U_1, M_c — значення напруги на статорі і статичного моменту, що відповідають

значенню регульованої частоти f_1 .

З отриманих виразів випливає, що закон зміни напруги U_1 визначається не тільки частотою джерела живлення f_1 , але і характером зміни моменту статичного навантаження на валу двигуна при зміні кутової швидкості. Для багатьох механізмів залежність моменту статичного навантаження від кутової швидкості в зоні регулювання останньої може бути представлена у вигляді степеневі функції:

$$M_c = M_0 + (M_n - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^q ,$$

або у відносних одиницях :

$$M_{c*} = M_{0*} + (1 - M_{0*}) \omega_*^q \quad ,$$

де M_0 — момент статичного навантаження при $\omega = 0$.

З огляду на те, що $\omega \equiv f_1$, то виходить, $\omega_* \equiv f_{1*}$ і вираз для M_{c*} можна записати у вигляді

$$M_{c*} = M_{0*} + (1 - M_{0*}) f_{1*}^q \quad .$$

Перетворення виразів дає:

$$U_{1*} = f_{1*} \sqrt{M_{0*} + (1 - M_{0*}) f_{1*}^q} .$$

З усього різноманіття залежностей $M_c(\omega)$ у теорії електропривода звичайно розглядаються три типи статичних навантажень, що найбільш часто зустрічаються:

1) момент статичного навантаження не залежить від швидкості (рис.7.1, а). При цьому $q = 0$; $M_c = \text{const}$ ($M_{c*} = 1$) ;

2) при регулюванні швидкості потужність на валу двигуна залишається постійною (рис.7.1, б), тобто тут $P_c = \text{const}$, $q = -1$; $M_0 = 0$; $M_c = P_c/\omega = M_n \omega_n / \omega$; $M_{c*} = 1 / f_{1*}$;

3) ідеалізоване вентиляторне навантаження (рис.7.1, в). У даному випадку

$$M_0 = 0 ; q = 2 ; M_c = M_n (\omega_n / \omega)^2 ; M_{c*} = f_{1*}^2 .$$

Таким чином для кожного з зазначених типів статичного навантаження можна аналітично записати основний закон зміни напруги при частотному регулюванні.

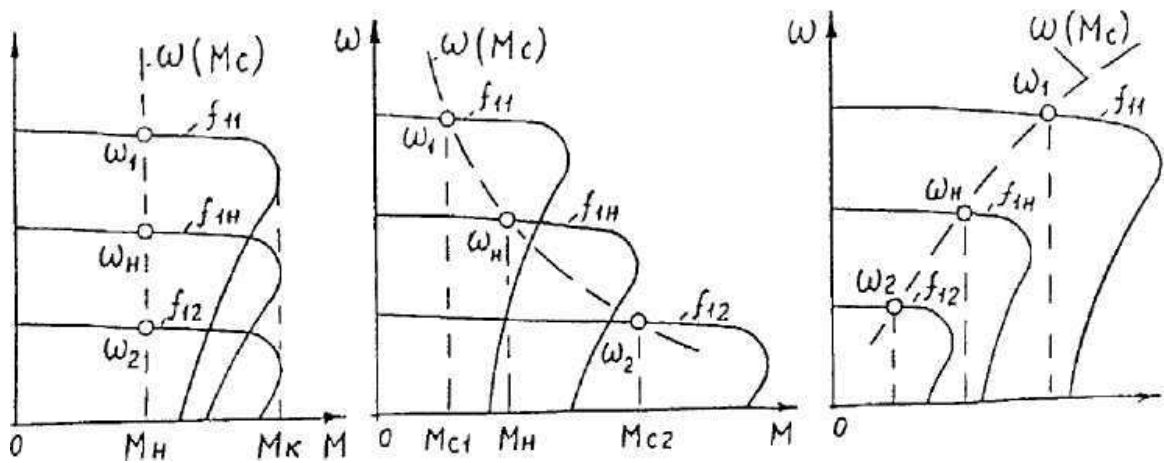


Рисунок 7.1- Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості для випадку $\lambda = \text{const}$ при умовах : $M_c = \text{const}$ (а), $P_c = \text{const}$ (б) і вентиляторному навантаженні (в)

При постійному моменті на валу

$$U_{1*} = f_{1*} \quad \text{або} \quad \frac{U_1}{f_1} = \text{const},$$

отже при сталості моменту статичного навантаження напруга джерела живлення повинна змінюватись пропорційно його частоті.

При сталості потужності

$$U_{1*} = \sqrt{f_{1*}} \quad \text{або} \quad \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const},$$

отже при сталості потужності статичного навантаження напруга джерела живлення повинна змінюватись пропорційно кореню квадратному зі значення частоти.

При вентиляторному навантаженні

$$U_{1*} = f_{1*}^2 \quad \text{або} \quad \frac{U_1}{f_1^2} = \text{const},$$

тобто при вентиляторному навантаженні напруга джерела живлення повинна змінюватись пропорційно квадрату значення частоти.

АД разом з перетворювачами частоти являють собою складні багатозв'язані нелінійні об'єкти, повний математичний опис яких виявляється досить громіздким і непридатним для інженерних методів синтезу систем управління.

Тому надалі зне-важимо другорядними взаємозв'язками ряду координат і параметрів електропривода.

Частотне регулювання швидкості АД в замкнутій системі координат

На рис.7.2 зображено спрощену функціональну схему регулювання швидкості АД. Силова частина схеми складається з асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (М), управляемого випрямляча (УВ), що перетворює електричну енергію змінного струму стандартної напруги U_1 і частоти f_1 в напругу постійного струму U_d ; автономного інвертора напруги (АИН), який перетворює напругу U_d в регульовану змінну напругу U_{1var} , амплітуда котрої пропорційна (або дорівнює) U_d , а частота також регулюється f_{1var} . Коло постійного струму у вигляді фільтра $L_d C_d$ необхідне для згладжування пульсацій напруги на виході випрямляча. Пристрій, який складається з УВ, фільтра $L_d C_d$, та АИН, звичайно називають тиристорним перетворювачем частоти (ТПЧ) з колом постійного струму. Систему побудовано за принципом підпорядкованого регулювання, і вона містить три контури регулювання – напруги (КРН), струму (КРТ) і швидкості (КРС). Блоки управління випрямлячем (БУВ) та інвертором (БУИ) формують управляючі імпульси для тиристорів перетворювача частоти. Аби реалізувати закон регулювання $U_1/f_1 = \text{const}$, перетворювачем частоти управляють так, що один заданий сигнал (напруга $U_{3н}$) з виходу регулятора струму (РТ) надходить одночасно на два паралельних входи - КРН, за допомогою якого регулюють напругу U_1 , та на БУИ і далі на АИН, за допомогою якого на статорі АД змінюють частоту f_1 , пропорційну U_d . Контур КРН містить УВ, датчик (ДН) і регулятор (РН) напруги. Завдяки тому, що контур налагоджено на високу швидкодію, підтримують задане співвідношення між частотою f_{1var} та напругою U_{1var} на статорі АД як в усталеному, так і в перехідному режимах.

Другий внутрішній контур, КРТ, містить оптимізований КРН, АИН з каналами регулювання амплітуди та частоти напруги на статорі двигуна, датчик (ДТ) і регулятор струму (РТ). Цей контур допомагає захистити перетворювач частоти від перевантажень.

КРС - це зовнішній контур з негативним зворотним зв'язком за швидкістю через тахогенератор (ТГ) і датчик швидкості (ДС).

В усталеному режимі роботи КРС потрібне значення швидкості звичайно задають за допомогою задатчика інтенсивності (ЗИ). Із зростанням моменту навантаження M_c , напруга $U_{3н}$ на виході регулятора струму збільшується, бо зменшується кутова швидкість АД. З підвищенням навантаження збільшується також спад напруги $U_{ш}$ на шунті $R_{ш}$, що спричинює зменшення $U_{3н}$. Однак переважний вплив на $U_{3н}$ має контур швидкості. У новому усталеному режимі із зрослим струмом I_d , який відповідає зрослому моменту M_c , напруга $U_{3н}$ перевищуватиме те значення, котре вона мала до збільшення навантаження. Із зростанням $U_{3н}$ пропорційно зростає амплітуда U_{1var} та частота f_{1var} напруги, підведеної до обмоток статора АД. Коли вихідна напруга РС досягне рівня обмеження, що відповідає заданому струму УВ, КРС розімкнеться й система перейде в

режим підтримання сталого значення I_d , обмежуючи перевантаження електропривода.

У розглянутому РС в усьому діапазоні швидкостей та навантажень АД виконується співвідношення $U_1/f_1 = \text{const}$. Тому і в режимі стабілізації кутової швидкості АД, і в режимі обмеження навантаження двигун працює із сталим потоком [2].

У схемі на рис. 7.2 вжито пропорційно-інтегральні РС, РТ і РН. Під час складання структурної схеми системи й розрахунку параметрів регуляторів УВ з блоком БУВ і АИН з блоком БУИ звичайно апроксимують неперервними підсилювальними безінерційними ланками з відповідними коефіцієнтами підсилення.

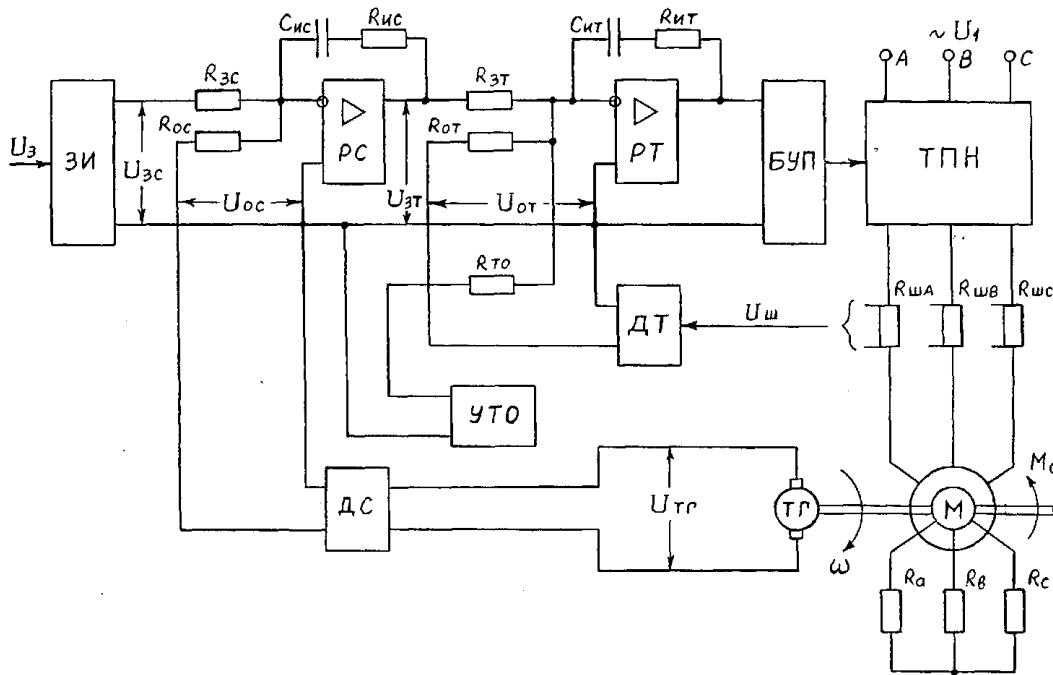


Рисунок 7.2 – Спрощена функціональна схема регулювання швидкості АД

Асинхронний електропривод з фазним керуванням

Тиристорний перетворювач напруги (ТПН) – це пристрій, що складається з напівпровідникових комутуючих швидкодіючих елементів і зв’язуючих їх силових кіл, а також кіл управління, захисту і сигналізації. В асинхронному електроприводі тиристорні комутатори використовуються найчастіше або як безконтактні ключі, що періодично замикають силові кола, або у виді вентиляльних перетворювачів напруги, що дозволяють відносно просто реалізувати різноманітні режими управління двигуном (АД).

Системи ТПН-АД знайшли широке застосування в різних галузях промисловості і сільського господарства як з метою підвищення надійності інтенсивно працюючих, особливо в агресивному середовищі, асинхронних

електроприводів з великим числом включень, так і для одержання ряду спеціальних режимів таких приводів [1].

Основними елементами ТПН є паралельно включені силові вентиля, що представляють собою швидкодіючі ключі, за допомогою яких можна комутувати кола змінного струму і змінювати діючі значення напруги на навантаженні і споживаного струму.

Деякі варіанти силових кіл 3-х фазних ТПН, що виконують роль комутуючих і регулюючих пристроїв для статорних обмоток асинхронних електроприводів, показані на рисунку 1. Оцінка таких схем виробляється на основі наступних критеріїв [2] :

- числа умовних тиристорів і ступеня їхнього використання зі струму;
- напруги, що прикладається до тиристорів у прямому і зворотному напрямках;
- коефіцієнта форми анодного струму;
- конструктивних особливостей (можливість об'єднання охолоджувачів і ін.);
- умов захисту тиристорів і споживача;
- складності схеми управління;
- можливого діапазону зміни швидкості і моменту двигуна, ступеня його управляємості;
- енергетичних показників і ін.

На рисунку 7.3 приведені лише схеми, що можуть застосовуватися для двигунів з обмоткою статора, з'єднаною в зірку без нульового проводу. Таке з'єднання обмотки статора є найбільш розповсюдженим у промисловості. Управління тиристорами приймається симетричним, коли відсутня постійна складова напруги. Для представлених схем частота комутації двигуна жорстко зв'язана з частотою мережі і кратна їй, причому кратність визначається числом тиристорів у фазах статора і дорівнює 6 в схемі рис. 7.1,а, 3- в схемах рис.7.1, б,в, 4- в схемі рис.7.1,г. Число тиристорів одночасно характеризує і назву схем: ТПН-6; ТПН-3; ТПН-3ТЗД (три тиристири і три діоди); ТПН-4 [3]. Начало комутації окремих фаз статора строго синхронізовано із відповідними напругами мережі.

Зміна напруги на навантаженні здійснюється фазовим управлінням шляхом регулювання кута α , що відповідає моменту відкриття вентилів. Причому вихідна напруга перетворювача залежить не тільки від кута α , але і від кута провідності тиристорів λ , еквівалентного кута навантаження двигуна φ_s , ЕРС обертання двигуна і його конкретних параметрів [4]. Слід враховувати, що кут λ зв'язаний з кутами α і φ_s трансцендентним рівнянням [5]. Наприклад, при зміні кута α навіть при постійній швидкості АД спостерігається зміна кута λ , що сполучено зі зміною еквівалентного фазового кута навантаження φ_s .

В схемі ТПН-6 без нульового проводу робота усіх фаз взаємозалежна і для протікання струму навантаження необхідно одночасне відмикання тиристорів у декількох (2-х чи 3-х) фазах. В схемі ТПН-3 є тільки три тиристири. Однак в ній усі кола знаходяться під лінійною напругою і необхідний розширений діапазон зміни фази імпульсів управління. Схема

ТПН-3ТЗД відрізняється тим, що для управління всіма тиристорами можна використовувати одне джерело. Діапазон регулювання кута α як і в схемі ТПН-3 розширений. Спрощена схема ТПН-4 рекомендується лише для невеликих потужностей чи для одержання м'якого пуску.

Управління швидкістю двигунів в системі ТПН-АД базується на тім, що гармонійні складові моменту АД пропорційні в основному квадратам амплітуд перших гармонік напруг прямої і зворотної послідовностей. Це визначає два принципи управління моментом і швидкістю двигуна за допомогою ТПН: зміна першої гармоніки напруги прямої послідовності при симетричних ТПН і зміна співвідношення між напругами прямої і зворотної послідовностей при несиметричних ТПН. Обидва принципи реалізуються шляхом фазового управління кутом α і знаходять практичне застосування.

На рисунку 7.4 показаний загальний вид механічних характеристик електропривода в розімкнутій системі ТПН-АД при різних кутах управління α .

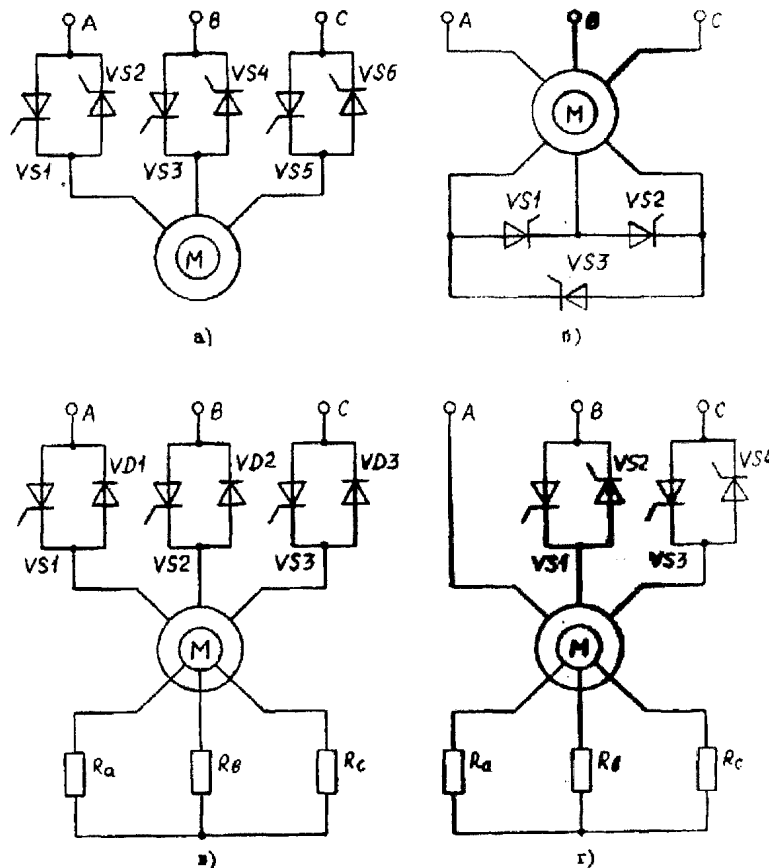


Рисунок 7.3

Очевидно, що при роботі на лінійній ділянці характеристики короткозамкнутий АД з ТПН не забезпечує глибокого регулювання швидкості (див. рисунок 7.4,а). Включення постійних додаткових опорів в кола ротора фазного АД істотно розширює можливий діапазон регулювання частоти обертання й усталеної роботи системи (рисунок 7.4,б).

При фазовому управлінні для одержання в системі ТПН-АД стійких знижених швидкостей необхідно застосовувати замкнуті системи регулювання [6]. На рисунку 3 показана типова структура підлеглої системи регулювання швидкості, що включає поряд із двигуном М і ТПН також датчики швидкості (ДС) і струму (ДТ), регулятори швидкості (РС) і струму (РТ). Напряга з датчика інтенсивності (ЗИ) безпосередньо надходить на вхід регулятора швидкості. В системі управління використовуються негативні зворотні зв'язки по струму (сигнал знімається із шунтів у виді напруги $U_{ш}$) і по швидкості (сигнал знімається з тахогенератора у виді напруги $U_{тг}$). Вихідний сигнал РТ формує напругу на вході блоку управління перетворювачем (БУП), що і визначає поточне значення кута α . Область регулювання швидкості обмежена максимальною і мінімальною напругами обмотки статора двигуна і припустимим струмом первинної обмотки I_1 , що задається вузлом струмообмеження УТО.

Жорсткість механічної характеристики електропривода в замкнутій системі визначається як глибиною негативного зворотного зв'язка по швидкості, так і типом регулятора РС. На рисунку 7.4,б показана ділянка формування механічної характеристики зі статичним регулятором швидкості (відрізок пунктирної лінії між точками ω_1 і ω_2). При використанні астатичного регулятора швидкості механічні характеристики електропривода будуть абсолютно жорсткими. Крім заданої жорсткості характеристик регулятори покликані забезпечити стійкість системи і необхідну якість перехідних процесів.

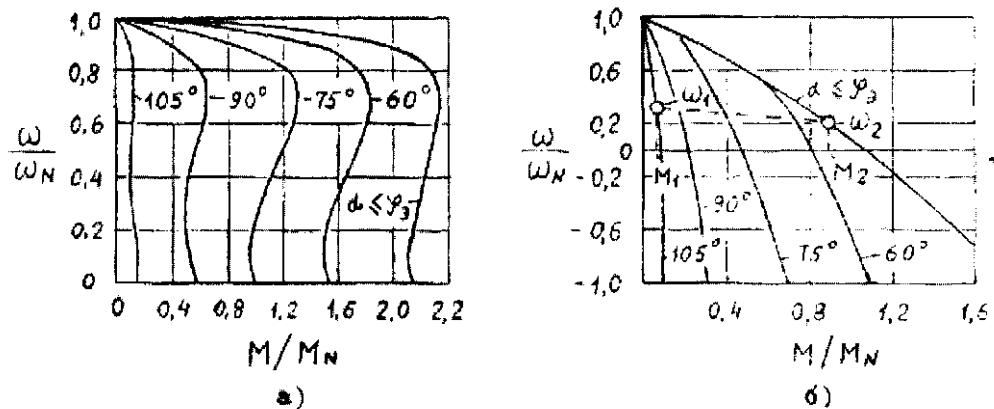


Рисунок 7.4 - Типові механічні характеристики електропривода при фазовому управлінні АД з короткозамкнутим (а) і фазним (б) ротором

Принцип роботи каскадних схем асинхронного двигуна

Одним з перспективних способів регулювання швидкості асинхронного двигуна являється включення в коло ротора добавочної ЕРС від постійного джерела. Таким джерелом може бути електрична машина, або вентильний перетворювач. Технічна складність введення добавочної ЕРС в коло ротора полягає в тому, що ЕДС ротора має змінні частоту і величину, залежну від

швидкості двигуна. Додаточна ЕРС повинна також мати регульовану частоту, рівну частоті ЕРС ротора.

Тому додаточну ЕРС вводять в ротор за допомогою перетворювача частоти, або включенням постійної по знаку ЕРС в коло випрямленої ЕРС ротора.

Залежно від типу перетворювача частоти, включеного в роторне коло асинхронного двигуна, розрізняють:

- 1) електромашинні каскади, у яких додаточна ЕРС вводиться в коло ротора асинхронного двигуна за допомогою машинного перетворювача частоти (електромеханічний каскад Кремера, електричний каскад Шербіуса, асинхронно-синхронний каскад та ін.);
- 2) вентильні каскади, у котрих додаточна ЕРС вводиться за допомогою вентильного перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму або з безпосереднім зв'язком;
- 3) вентильно-машинні каскади, де струм ротора випрямляється випрямлячем, а в коло випрямленого струму вводиться проти -ЕРС, джерелом якої являється машина постійного струму.

Вентильно-машинні та особливо вентильні каскади в наш час стають основними видами регульованого електроприводу для турбомеханізмів, оскільки вони мають:

- 1) високий ККД в усьому діапазоні регулювання швидкості;
- 2) встановлена потужність перетворювача частоти пропорційна глибині регулювання, що завжди значно менше потужності привідного двигуна.

Вибір силових елементів асинхронного вентильного каскаду (АВК)

Найбільш простими поширеними схемами АВК являються схеми з проміжним колом постійного струму (рис.7.4), в котрих ЕРС ротора випрямляється трифазним мостовим випрямлячем і в коло випрямленого струму додаточна ЕРС від вентильного перетворювача (інвертора). Головними елементами схеми являються:

М - асинхронний двигун з фазним ротором;

В - некерований напівпровідниковий випрямляч;

И - керований тиристорний перетворювач для інвертування випрямленого струму ротора;

Т - трансформатор для узгодження напруги ротора з напругою мережі;

ДС - згладжуючий дросель для згладжування пульсацій.

Силові елементи АВК за своїми параметрами від потрібного діапазону регулювання швидкості обертання $K_{р.ш.}$, тобто від потрібного максимального ковзання $S_{о.макс}$.

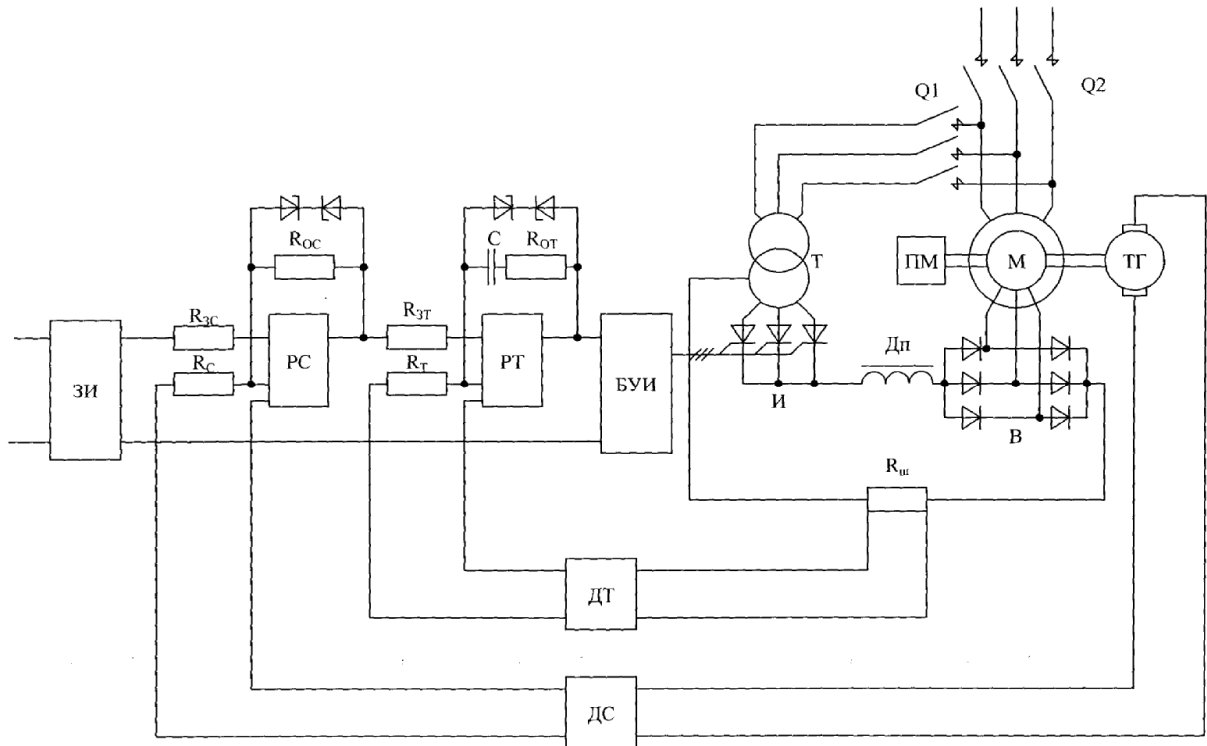


Рисунок 7.4 – Принципова схема АВК

Вибір вентилів випрямляча роторної групи Вентильні випрямлячі вибирають по значенню випрямленого струму, що відповідає максимальному моменту опору на валу двигуна. Для турбомеханізмів цей момент діє при номінальній швидкості обертання, йому відповідає випрямлений струм I_d :

$$I_d = \frac{I_{2p}}{0,78},$$

де I_{2p} - струм ротора з врахуванням навантаження двигуна, А.

Цей струм мало відрізняється від номінального струму ротора.

Схема з'єднання вентилів роторної групи завжди приймається трифазною мостовою. Середній струм через вентиль визначається [1]

$$I_B = \frac{I_d}{3 \cdot 0,9 \cdot K_R \cdot K_B \cdot K_k \cdot K_n \cdot \Pi_{\text{пар}}},$$

де K_R - коефіцієнт зниження допустимого струму через вентиль під час роботи з низькою частотою, $K_R = 0,92$;

K_B - коефіцієнт, що враховує змінювання допустимого струму при швидкості охолоджуючого повітря менше 15 м/с. При повітряному охолодженні

$$K_B = 0,35;$$

K_k - коефіцієнт, що враховує зниження струму внаслідок конструктивного погіршення умов охолодження, $K_k=0,9$;

K_{Π} - коефіцієнт, що враховує зниження допустимого струму через вентиля при їх паралельному з'єднанні, $K_{\Pi}=0,9$;

$\Pi_{\text{пар}}$ - число паралельно включених вентилів.

Максимальна зворотна напруга на вентиль:

$$U_{\text{зв.}} = \frac{1,045 E_{\text{дрн}} \cdot S_{\text{макс}}}{K_{\text{посл.}} \cdot \Pi_{\text{посл.}}},$$

де $E_{\text{дрн}}$ - випрямлена ЕРС нерухомого ротора;

$S_{\text{макс}}$ - максимальне ковзання;

$K_{\text{посл.}}$ - коефіцієнт, що враховує нерівномірний розподіл зворотної напруги між вентилями, $K_{\text{посл.}}=0,8-0,9$;

$\Pi_{\text{посл.}}$ - число послідовно включених вентилів.

Під час пуску двигуна в схемі АВК $S_{\text{макс}}$ приймають рівним одиниці.

Вибір основних елементів інвертора

За інверторного перетворювача може служити всякий тиристорний перетворювач, котрий працює в інверторному режимі. Однак доцільніше застосувати тиристорно-діодні перетворювачі, призначені для схем АВК, типів ПРБУ, ПАВК і АТДЕ.

Вентилі інвертора вибирають по випрямленому струму залежно від моменту навантаження на валу двигуна

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{\text{рн}}}{2X_p} - \sqrt{\frac{E_{\text{рн}}^2}{2X_p^2} - \frac{\sqrt{2} \cdot 9,81 \cdot \omega_0 M}{K_1 X_p}}, \text{ А},$$

де X_p - приведений до ротора індуктивний опір фази асинхронного двигуна;

$E_{\text{рн}}$ - ЕРС нерухомого ротора;

K_1 - коефіцієнт схеми випрямлення, $K_1 = 1,35$;

ω_0 - синхронна швидкість ротора.

Струм через вентиль визначається за аналогічною формулою для вентилів роторної групи, однак $K_r = 1$.

Крім того, вентиля інвертора вибираються по вторинній випрямленій напрузі трансформатора інвертора. У випадку побудови інвертора за мостовою безтрансформаторною схемою - по випрямленій напрузі живильної мережі:

$$U_d = K_2 E_{2\text{т}}$$

де K_2 - коефіцієнт схеми перетворювача, для трифазної мостової схеми $K_2=2,34$;

E_{2T} - фазна напруга вторинної обмотки трансформатора або живильної мережі.

Амплітуда зворотної напруги на вентилях:

$$U_{в.зв.} = 2,44E_2 \frac{1}{\Pi_{\text{посл}} \cdot K_{\text{посл}}}.$$

Вибір трансформатора інвертора

Трансформатор інвертора вибирають по струму і напрузі вторинних обмоток трансформатора. Напруга вторинної обмотки трансформатора визначається діапазоном регулювання швидкості:

$$E_{2T} = \frac{E_{\text{дpmac}}}{K_2 \cos \beta_{\text{мін}}}, \text{В},$$

де $\beta_{\text{мін}}$ - мінімально допустимий кут інвертування, $\beta_{\text{мін}} \geq 15^\circ$.

Струм вторинної обмотки трансформатора

$$I_{2T} = K_{2i} I_d, \text{А},$$

де K_{2i} - коефіцієнт схеми по струму, для трифазної нульової - $K_{2i} = 0,58$,
для трифазної мостової - $K_{2i} = 0,816$;

I_d - випрямлений струм ротора, який відповідає тривалому або середньо-квадратичному навантаженню двигуна.

Потужність трансформатора

$$S_{\text{тр}} = m_T E_{2T} I_{2T}, \text{В}\cdot\text{А},$$

де m_T - число фаз трансформатора.

Типова або розрахункова потужність трансформатора з врахуванням потоків вимушеного навантаження складає

$$S = K_T S_{\text{тр}}, \text{В}\cdot\text{А},$$

де K_T - коефіцієнт типової потужності, для трифазної нульової - $K_T = 1,26$,
для трифазної мостової - $K_T = 1,045$.

Розрахунок електродвигуна турбокомпресора

Продуктивність турбокомпресора з протитиском $H=25$ кгс/см² складає 3980 м³/год (за даними заводу). Потужність приводного двигуна для такої вимоги можна визначити по формулі:

$$P_T = \gamma \frac{QH}{102\eta_T \eta_n}, \text{кВт},$$

де γ - щільність перекачуваного газу, кг/м³;

Q - продуктивність турбокомпресора, м³/с;

H - тиск, з яким працює компресор, кг/м²;

η_T - ККД турбокомпресора, в.о. ($\eta_T = 0,9$);

η_n - ККД підвищуючого редуктора ($\eta_n = 0,92$).

$$P_T = \frac{3980 \cdot 25 \cdot 10^4}{3600 \cdot 0,9 \cdot 0,92 \cdot 102} = 4401 \quad \text{кВт.}$$

Вибирають для установки двигун більшої потужності.

Оскільки регулювання продуктивності турбокомпресора у досить невеликих границях, то приймається нерегульований електропривод з регулюванням потужності турбокомпресора засувкою на стороні нагнітання.

При такій значній потужності перевагу слід віддати синхронному електроприводу з статичною системою збудження, виготовленою на тиристорах.

Порівняно з асинхронним двигуном синхронний двигун має такі переваги:

Здатний генерувати реактивну потужність з випереджаючим коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi = 0.8 - 0.9$).

Має більш високий ККД.

Більший повітряний зазор забезпечує більшу надійність синхронного двигуна.

Синхронні двигуни забезпечують стійкість швидкості обертання, незалежно від навантаження.

До недоліків синхронного двигуна можна віднести більш високу його вартість та необхідність більш кваліфікованого обслуговування.

Отже, для електропривода вибираємо синхронний електродвигун з реакторним пуском з такими технічними даними:

Номінальна потужність, кВт	- 4800
Номінальна швидкість, об/хв	- 1500
Номінальна напруга, В	
статора	- 6000
ротора	- 51
Номінальні струми, А	
статора	- 535
ротора	- 395
коефіцієнт потужності	- 0,9
ККД	- 0,95
Момент інерції ротора, кгм ²	- 565
Маса двигуна, кг	- 8925

Контрольні питання до теми 7

1. Перелічіть закони частотного керування АД.
2. Наведіть механічну характеристику ПЧ-АД при вентиляторному навантаженні.
3. Наведіть схеми силових кіл регуляторів напруги.
4. Наведіть схему електричного машинно-вентильного каскаду.
5. Наведіть схему електромеханічного каскаду.

ТЕМА 8С ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ”

Електропривод по системі „Електромеханічний перетворювач енергії – двигун постійного струму”

Електромашинний підсилювач (ЕМП) в системах автоматичного управління може виконувати самі різноманітні функції: генератора, збуджувача, суматора і підсилювача. Найбільше застосування ЕМП знаходиться в електроприводах по системі генератор – двигун (Г – Д) як збуджувач головних машин (ЕМЗ). Управляючі обмотки ЕМП розраховані на 6-8 кратне перевантаження, що дозволяє за рахунок форсування істотно скорочувати перехідні процеси і одержувати електроприводи високої швидкодії.

В порівнянні із системами релейно-контакторного управління електромашинні збуджувачі мають ряд переваг [1] : 1) безперервність управління; 2) розміщення апаратів управління в малопотужних (порядку часткі вата) колах управління ЕМП, унаслідок чого їхня потужність і габарити істотно скорочуються; 3) підвищену швидкодію; 4) простоту підсумовування сигналів.

Для підвищення жорсткості й одержання спеціальної форми характеристик в системі електромашинного управління вводяться зворотні зв'язки. Основні варіанти включення таких зв'язків дані на рисунку 8.1 стосовно до використання ЕМП як збуджувача генератора. В схемі на рис.8.1,а передбачений жорсткий негативний зворотний зв'язок по напрузі генератора, сигнал якого подається на окрему обмотку управління ЕМП (LGA..2). Часто сигнал зворотного зв'язка подається на ту ж обмотку, що і задаючий сигнал, як показано на схемах рис.8.1,г і рис.8.1,д. У цьому випадку економія виходить за рахунок кількості використовуваних обмоток. Крім того, обривання кола такої обмотки не приводить до аварійних режимів, тому що одночасно припиняється дія задаючого сигналу і сигналу зворотного зв'язка. На схемі рис. 1,б показана система з позитивним зворотним зв'язком по струму. Для більшої стійкості системи, а також з метою розширення діапазону регулювання частоти обертання за рахунок зменшення залишкового намагнічування ЕМП останній охоплений жорстким негативним зворотним зв'язком по напрузі (обмотка LGA..3). В схемі рис. 8.1,в здійснений негативний зворотний зв'язок по швидкості за допомогою тахогенератора BR. У малопотужних системах тахогенератор часто замінюють тахометричним мостом. На схемах рис.8.1,г і рис.8.1,д представлені часто зустрічні комбінації зазначених зворотних зв'язків.

Для створення форсованих режимів знаходять застосування ЕМП з запасом по напрузі і з досить великим залишковим намагнічуванням, що погіршує стабільність роботи систем за рахунок неоднозначності регульовальної характеристики підсилювача. Звуження петлі гістерезиса

домагаються введенням сильного негативного зворотного зв'язка по напрузі самого ЕМП (див. схему на рис.8.1,б). Однак це приводить до істотного зниження коефіцієнта підсилення, що приходиться компенсувати введенням в систему проміжного підсилювача, найчастіше двотактного магнітного (див. рис.8.1,е).

Магнітні підсилювачі (МП) мають гальванічну розв'язку між вхідними і вихідними колами, надійні в роботі і дозволяють підсумовувати декілька сигналів. При цьому легко досягаються досить високі коефіцієнти підсилення і підвищується якість управління.

Усі зазначені вище зв'язки є жорсткими, тому що вони працюють і в перехідних і в усталених режимах. Крім них знаходять застосування гнучкі зворотні зв'язки, що діють тільки в перехідних режимах і створювані за допомогою різних коригувальних пристроїв у вигляді диференційних і інтегруючих контурів і елементів.

Для поліпшення характеристик і підвищення ефективності роботи електропривода прибігають до застосування нелінійних зворотних зв'язків, що звичайно здійснюються з різними вузлами відсічок.

Негативний зворотний зв'язок по струму з відсічкою виконано (див. рис. 1,е) за допомогою обмотки підсилювача LA . Ця обмотка увімкнута через вентиля VD1 і VD2 в контур порівняння еталонної напруги U_{Σ} і падіння напруги на шунті RS якірного кола головних машин G і M . Параметри контуру підбираються таким чином, щоб струмова обмотка вступала в дію при великих значеннях якірного струму і припиняла свою дію при струмах нижче заданої величини. Опір порівняння RP виконано симетричним, і при ході вперед діє один випрямляч з відповідною частиною опору порівняння, а при реверсі – інший і інша частина RP.

Намагнічувальна сила (НС) струмової обмотки в процесі розгону системи спрямована зустрічно з задаючою обмоткою. На початку пуску двигуна діють обидві обмотки МП : що задає (на рис. 1,е не показана) і струмова, тому що струм якоря швидко досягає уставки відсічки. В міру збільшення швидкості обертання двигуна струм в якорі зменшується, і при величині нижче відсічки дія струмової обмотки припиняється. Ефект струмового зворотного зв'язка в сталому режимі залежить від величини навантаження двигуна. Якщо струм якірного кола не досягає уставки відсічки, струмова обмотка не працює. При цьому результуюча НС підсилювача визначається тільки НС задаючої обмотки. Подальше збільшення навантаження і струму якірного кола приводять (по досягненню значення відсічки) в дію струмову обмотку, знижуючи напругу на виході генератора.

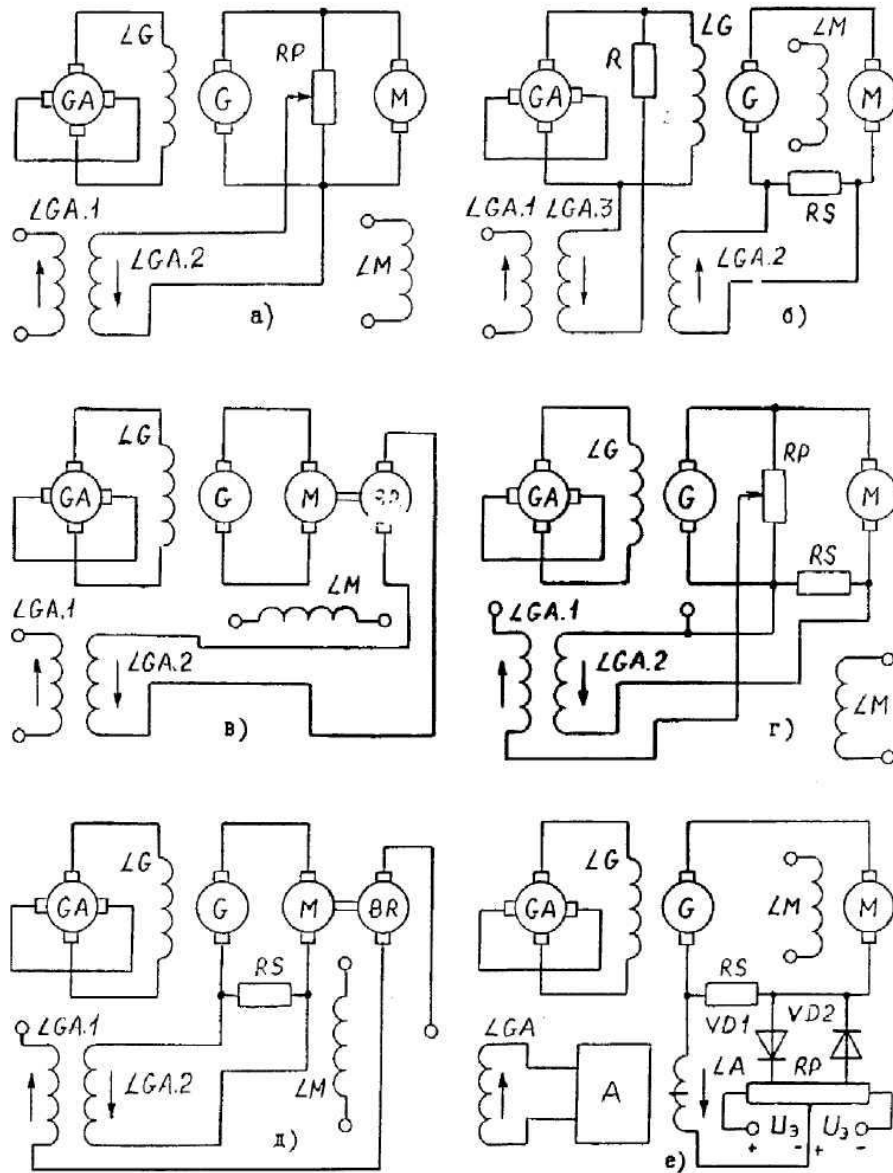


Рисунок 8.1 – Основні варіанти вмикання зворотних зв'язків у системі ЕМП-Г-Д

Генератори постійного струму і ЕМП мають електромагнітну інерційність. Електричні генератори звичайно приймаються еквівалентними по дії аперіодичним ланкам, у яких коефіцієнт підсилення і постійна часу є функції струму збудження з урахуванням насичення стали. В окремих випадках, наприклад при ненасиченому генераторі чи при малих змінах струму збудження, коефіцієнт підсилення і постійна часу вважаються постійними. У генераторів постійні часу обмоток збудження складають від десятих часток секунди до декількох секунд. Постійні часу ЕМП знаходяться в межах від декількох сотих до декількох десятих часток секунди в залежності від їхньої потужності, схеми включення і режиму роботи. У зв'язку з цим часто виникає задача управління збудженням генераторів і великих ЕМП з форсуванням [2]. Форсування збудження генератора

забезпечується спеціальними релейними схемами і негативними жорсткими зворотними зв'язками по напрузі і швидкості, які в початковий період збудження забезпечують прикладання до обмотки управління ЕМП повного сигналу напруги, що задається. Цей сигнал може в 2-10 разів перевищувати номінальну напругу обмотки управління і спричинювати швидке наростання струму управління в початковий період збудження.

Магнітні підсилювачі в динаміці (в найпростіших випадках) еквівалентні по дії інерційному підсилювачу з обмеженням по вихідній потужності, напрузі чи струму в режимі повного підмагнічування. Цю обставину використовують для виконання систем Г-Д з відсічкою по струму підсилювача і по е.р.с. генератора. В більш складних випадках вони є елементами з декількома інерційностями і з неоднозначними характеристиками.

Однак ЕМП мають ряд недоліків. Вони важкі і громіздкі, вимагають значних експлуатаційних витрачань і капітальних витрат. Електромашинні підсилювачі, крім того, працюють не дуже стабільно, змінюють режим роботи при нагріванні і вимагають періодичного підстроювання. Їхня надійність, як обертових перетворювачів, нижче, ніж надійність статичних підсилювачів, а коефіцієнт корисної дії разом із приводним двигуном часто не перевищує (60-70) %.

Основні недоліки МП : низькі коефіцієнти корисної дії і потужності, інерційність управління – обмежують його застосування. Але по надійності і довговічності системи автоматичного управління з магнітними підсилювачами перевершують чи не уступають іншим системам зі статичними перетворювачами.

Тиристорний електропривод постійного струму

У розімкнутій системі тиристорний перетворювач напруги – двигун постійного струму (ТП-Д) унаслідок значного перепаду кутової швидкості при зміні навантаження на валу двигуна не вдається одержати великого діапазону зміни частоти обертання і забезпечити високу точність регулювання. У розімкнутій системі ТП-Д вихідна величина – кутова швидкість визначається при заданому управляючому сигналі на вході параметрами випрямлючого агрегату, електричної машини і навантаженням на валу. Внутрішні параметри системи, а також навантаження можуть змінюватися внаслідок непостійності опору обмоток двигуна через температуру і режим роботи приводного механізму. Тому в таких системах діапазон і точність регулювання кутової швидкості не високі. У розімкнутій системі також не можна одержати високої точності підтримки моменту, що розвивається приводом [1].

Для розширення діапазону управління і підвищення точності використовуються замкнуті системи регулювання. Принципи дії таких систем зводяться до автоматичної компенсації збурюючих факторів, а кутова швидкість і момент двигуна можуть підтримуватись з необхідною точністю

на потрібному рівні. Аналіз показує, що для одержання характеристик двигуна з високою жорсткістю необхідно автоматично з ростом навантаження підвищувати електрорушійну силу (ЕРС) тиристорного випрямляча [2].

У замкнутих системах присутній, принаймні, один зворотний зв'язок, що з'єднує вихід системи з її входом. Крім того, можуть бути так називані внутрішні зворотні зв'язки, що з'єднують вихід і вхід окремих елементів системи ТП-Д.

Зворотні зв'язки поділяються на жорсткі і гнучкі. Жорсткі зв'язки діють як у перехідному, так і в сталому режимах роботи. За знаком розрізняють позитивні і негативні зворотні зв'язки. При зростанні регульованої величини позитивний зв'язок ще більше її збільшує, а негативний, навпаки зменшує. Зворотні зв'язки, що передають сигнали, пропорційні значенню (чи похідної, іноді інтегралу) напруги, струму, швидкості, кута повороту і т.п., називаються жорсткими (чи гнучкими) негативними чи позитивними зворотними зв'язками відповідно по напрузі, струму, швидкості, куту.

У системі автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком по напрузі компенсуються спадання напруги на внутрішньому опорі перетворювача і коливання напруги мережі, тобто стабілізується вихідна напруга управляючого випрямляча. Тому граничною жорсткістю характеристики являється жорсткість природної характеристики випробуваного двигуна.

У випадку жорсткого позитивного зв'язка по струму якоря двигуна і сталості коефіцієнтів підсилення регулятора струму і перетворювача напруги характеристики двигуна являють собою прямі лінії. Причому в залежності від глибини зворотного зв'язка статизму у замкнутій системі може бути негативний, дорівнює чи нулю навіть позитивний [3].

Для автоматичного регулювання моменту електропривода постійного струму незалежного збудження доцільно використовувати нелінійний жорсткий негативний зворотний зв'язок по струму чи зв'язок з відсічкою. Цей зв'язок починає діяти тоді, коли струм якоря перевищує значення відсічки і забезпечує підтримку з визначеною точністю струму чи моменту машини.

У системі автоматичного регулювання з жорстким негативним зворотним зв'язком по кутовій швидкості двигуна статизм менше, ніж у розімкнутій і може бути як завгодно малим зі зростанням загального (сумарного) коефіцієнта передачі системи.

Застосування комбінованих зворотних зв'язків розширює можливості електричного привода у відношенні діапазону регулювання. Наприклад, можливе сполучення жорсткого негативного зворотного зв'язка по напрузі з позитивним по струму чи негативного зворотного зв'язка по швидкості з позитивним по струму.

Найбільше застосування в регульованому електроприводі постійного струму знайшла замкнута система з послідовними підсумовуючими

підсилювачами (см. рис.8.2) – так називана система підпорядкованого регулювання з послідовною корекцією [1].

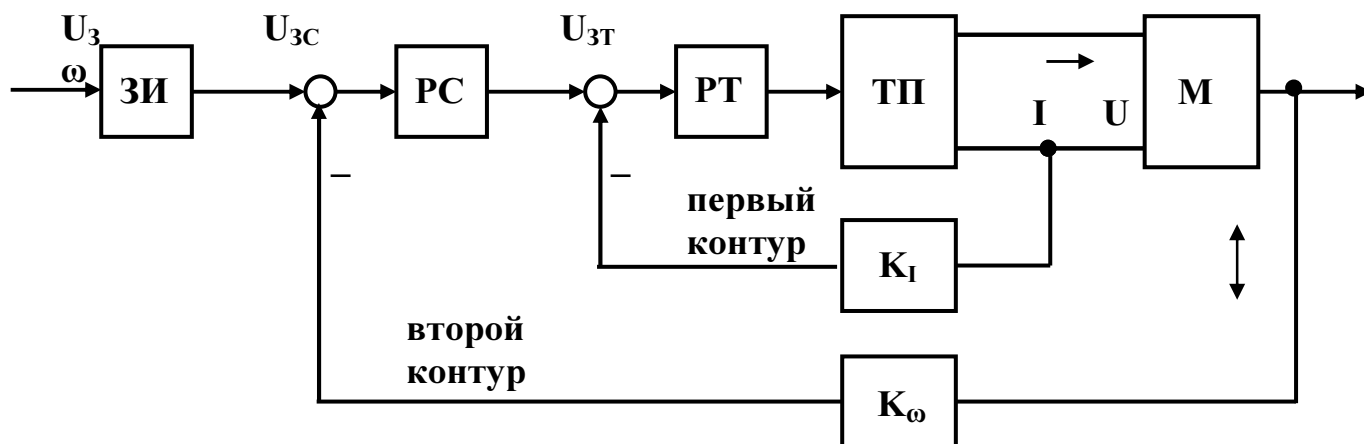


Рисунок 8.2 – Структурна схема підпорядкованого регулювання системи ТП-Д

Підсумовуючі підсилювачі в цій схемі виконують крім звичайних функцій ще і математичні операції над сигналами, тому їх називають регуляторами струму (РТ) і швидкості (РС). Причому внутрішній контур регулювання (перший) підпорядкований зовнішньому (другому). Це означає, що задане значення регульованої перемінної будь-якого внутрішнього контуру визначається вихідним сигналом регулятора наступного по порядку контуру. У результаті внутрішній контур працює як підпорядкований задачі регулювання вихідної координати системи (швидкості). Кожен контур працює по відхиленню (за помилкою) і має звичайно жорсткий негативний зв'язок по регульованій перемінній. Для зовнішнього контуру внутрішній входить до складу об'єкта регулювання.

Параметри регуляторів вибираються з умови забезпечення заданої якості перехідного процесу електропривода, а жорсткість механічних характеристик виявляється другорядною. В зовнішньому контурі використовується або пропорційний (П), або пропорційно-інтегральний (ПИ) регулятор швидкості, у внутрішньому – як правило ПИ – регулятор струму.

П-регулятор застосовується при малому діапазоні регулювання кутовий швидкості. Від його настроювання залежить статизм замкнутої системи, яку часто називають однократно інтегруючою зі зворотним зв'язком по швидкості.

При великому діапазоні регулювання й у випадках, коли потрібно малий статизм механічних характеристик, застосовують ПИ- регулятор швидкості. Система електропривода стає при цьому астатичною по кутовій швидкості, тобто не має статичної похибки регулювання. Вона називається двократно інтегруючою зі зворотним зв'язком по швидкості.

Обмеження струму двигуна при пусках і гальмуваннях у системах підпорядкованого регулювання забезпечується застосуванням задатчика інтенсивності (ЗІ), у якого сигнал на виході змінюється не стрибком, а лінійно в часі до потрібного рівня.

Контрольні питання до теми 8 С

1. В чому полягає принцип дії електромашинного підсилювача.
2. Наведіть схему електромашинного перетворювача з позитивним зворотним зв'язком за струмом.
3. Наведіть схему електромашинного перетворювача з позитивним зворотним зв'язком за напругою.
4. Наведіть схему електромашинного перетворювача з позитивним зворотним зв'язком за швидкістю.
5. Поясніть сутність системи підпорядкованого регулювання у системі тиристорний перетворювач напруги – двигун постійного струму.

ТЕМА 9 ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ І МЕХАНІЗМАМИ

Підйомні установки

Шляхи економії електроенергії в підйомних установках: виконання оптимальної діаграми швидкості; забезпечення нормованого завантаження підйомних посудин; ліквідація або скорочення роботи на неробочому ході; контроль стану підйомних посудин; застосування досконалих видів електропривода; специфічні способи, обумовлені типом електропривода.

Оптимальною діаграмою швидкості з погляду витрати електроенергії буде та, де множник швидкості приймає найменше значення:

$$\lambda = \frac{V_{\max}}{V_{\text{cp}}} = \frac{V_{\max} \cdot T_{\text{п}}}{H_{\text{п}}},$$

де V_{\max} , V_{cp} — максимальна і середня швидкості руху підйомної ємності м/с; $H_{\text{п}}$ - висота підйому, м; $T_{\text{п}}$ - час підйому ємності, с.

Оптимальну діаграму швидкості можна одержати збільшенням прискорення при запуску й уповільнення при гальмуванні (в останньому випадку це доцільно при руховому уповільненні чи вільним вибігом), а також при збільшенні в припустимих межах максимальної швидкості підйому.

Виконання оптимальної діаграми швидкості забезпечується повною автоматизацією керування, у результаті чого підвищується продуктивність установки і забезпечується робота з мінімальною витратою електроенергії.

Для перевірки відповідності фактичної діаграми швидкості оптимальній необхідно не рідше одного разу в півріччя виконувати вимірювання швидкості та

побудову графіка з наступною корекцією при відхиленні параметрів у схемі керування установкою.

При недовантаженні скіпів і вагонеток при видачі гірської маси, неповному завантаженню клітей при спуску - підйомі людей нераціональна витрата електроенергії складе:

$$\Delta W = W_{\text{ц}} \cdot n_{\text{нр}}, \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

де $W_{\text{ц}} = \frac{W_{\text{доб}}}{n_{\text{ф}}}$ - витрата електроенергії за один цикл підйому, кВт/год/цикл; $W_{\text{доб}}$ - добове споживання електроенергії підйомної установки (визначається за показниками лічильника активної енергії), кВт·год/добу; $n_{\text{ф}}$ - фактичне число підйомів за добу; $n_{\text{нр}} = n_{\text{ф}} - n_{\text{рац}}$ - нераціональне число циклів за розрахунковий період часу

$$n_{\text{рац}} = \frac{A_{\text{ф}}}{Q_{\text{норм}}} \quad - \text{раціональне число циклів за розрахунковий період при нормованому завантаженні підйомної ємності};$$

$A_{\text{ф}}$ - фактична кількість виданої гірської маси за розрахунковий період, т; $Q_{\text{норм}}$

Робота без навантаження пов'язана зі збільшенням нераціональних циклів і додатковою витратою електроенергії. Для її усунення необхідно мати графік роботи підйомної установки і суворо його дотримуватись.

У результаті налипання гірської маси на внутрішню поверхню скіпа знижується його фактична ємність і, як наслідок, знижується загальна продуктивність підйому, що дає додаткову витрату електроенергії. Контроль за станом скіпів повинен проводитися не рідше одного разу на місяць.

Недоліком реостатних систем керування роботою підйому є значні втрати енергії при пуску і гальмуванні. Частотно-керовані, ТП-Д та інші системи мають високі регульовальні властивості і кращі техніко-економічні показники, в тому числі при меншій витраті електричної енергії.

При дводвигуновому електроприводі під час ремонтних і профілактичних робіт, а також у початковий момент прискорення чи гальмування можливо використовувати один двигун.

Вентиляторні установки

Сумарна встановлена потужність приводних двигунів вентиляторів, компресорів, насосів складає близько 20% від потужності всіх електростанцій СНД; при цьому тільки вентилятори споживають близько 10% від всієї енергії, продукованої в співдружності.

Обстеження Криворізького басейну показали, що більшість вентиляторних установок шахт мають ККД значно нижче норми (0,6, а в деяких випадках — 0,3..0,4). Тільки 22% вентиляторів працюють у зоні економічного використання. Фактично питома витрата потужності в 1,5...2 рази перевищує припустиму величину, а загальна вартість перевитрати електроенергії приводами головних вентиляторів складає четверту частину витрат електроенергії всіма установками за рік.

Це пояснюється тим, що більшість вентиляторів експлуатується поза зоною економічної роботи, тобто режим роботи вентиляторів не відповідає

параметрам вентиляційних мереж (невідповідність фактичних значень еквівалентних отворів вентиляційних напрямків шахт їх проектним значенням; наявність великих підсмоктувань повітря з поверхні через зону обвалення і надшахтні споруди; обладнання вентиляторів нерегульованим приводом тощо.

Причиною низьких енергетичних показників вентиляторів є:

- змінний аеродинамічний опір мережі в процесі розробки шахтного поля. Вентилятор вибирається на максимальні значення продуктивності і тиску, що досягаються тільки через кілька років роботи. Тому вентилятор тривалий час працює в режимах, відмінних від розрахункового;

- відмінність реальних величин параметрів вентиляції (кількість метану, довжина і перетин виробок, витоки повітря тощо) від розрахункових призводить до того, що фактичний режим роботи вентилятора значно відрізняється від розрахункового;

- зміна величини природної тяги від пори року, а іноді і протягом доби залежно від температури повітря на поверхні;

зміна метановиділення, що залежить від атмосферних, гірничо-геологічних факторів і призводить до простоїв у випадку підвищення припустимої концентрації чи до перевитрати електроенергії.

Експериментально встановлено, що коливання депресії між лютим і вереснем на деяких шагах складає 20 мм.вод.ст. при зміні витрати повітря понад 12%. Особливо великі коливання природної тяги в районах з різко континентальним кліматом, де природна тяга має змінний напрямок у різний час року, а іноді й доби.

Шляхи економії електроенергії у вентиляторних установках: узгодження режиму роботи вентилятора з характеристикою вентиляційної мережі, підвищення ККД вентиляційної мережі, підвищення експлуатаційного ККД вентиляторних установок; регулювання продуктивності вентиляторних установок.

Робоча точка вентилятора визначається як точка перетину напірної характеристики вентилятора з характеристикою вентиляційної мережі. Вона повинна лежати на стійкій частині характеристики вентилятора і бути за можливістю ближче до точки, що відповідає максимальному ККД вентилятора. Якщо має місце неефективна робота вентилятора, то робочу точку можна перемістити в зону економічної роботи як за допомогою зміни робочих параметрів вентилятора, так і зміною характеристики вентиляційної мережі. Визначення робочої точки вентилятора при уточненні характеристики вентиляційної мережі повинно проводитись не рідше одного разу в півріччя.

Підвищення ККД вентиляційної мережі забезпечується за рахунок зниження підсмоктувань (витоків) повітря через надшахтні споруди і канали вентилятора та зниження опору (депресії) вентиляційної мережі. Для зниження підсмоктувань повітря через надшахтні споруди необхідно поштукатурити стіни, закрити щілини, обладнати вікна подвійними рамами, а також упорядкувати роботу шлюзових і розвантажувальних пристроїв. Клітьові підйоми повинні бути обладнані спеціальними повітряними клапанами. Для зменшення підсмоктувань повітря у вентиляційних каналах необхідно ущільнювати ляди, забезпечивши ретельне

припасування гуми, що ущільнює, до рами і надійне кріплення останньої до бетону каналів; обладнати оглядові колодязі і входи в канал подвійними щільно прилягаючими лядами та прокладкою з м'якої гуми.

Для визначення стану шахтної вентиляційної мережі, що змінюється, необхідно періодично робити депресивні зйомки вентиляційних мереж, що дає загальну картину розподілу загально-шахтної депресії, на якій можна виділити ділянки різкого збільшення аеродинамічних опорів.

Стосовно цих ділянок і всієї вентиляційної мережі проводяться заходи щодо зниження опору протяжних ділянок і місцевих опорів:

- збільшення площі поперечного перерізу вентиляційних виробок шляхом їх перекріплення;
- поліпшення аеродинамічних властивостей виробок за рахунок їх затягувань, обшивання, штукатурки стін, згладжування кутів при вигинах виробок, установки обтічників на розстрілах тощо;
- зниження місцевих опорів шляхом усунення вагонеток і устаткування з виробок, розбирання завалів тощо.

Потужність, споживана з мережі двигуном вентиляторної установки, визначається виразом:

$$P = \frac{H \cdot Q \cdot 10^{-3}}{\eta_v \cdot \eta_d}$$

Так, якщо в шахту подається $Q = 200 \text{ м}^3/\text{с}$ свіжого повітря при $\eta_v=0,65$ $\eta_d=0,85$ і за рахунок реконструкції вентиляційної мережі знизити загальношахтну депресію на 400 Па (розкріплення 500 м вентиляційного штреку зі збільшенням перетину з 4 м^2 до 6 м^2 , видалення зі штреку двох вагонеток з інертним пилом, згладжування кута повороту струменя повітря), то одержимо річну економію (за $T_e = 8760$ год. роботи вентилятора)

$$ДЖ=400 \cdot 200 \cdot 8760 \cdot 10^{-3}/(0,65 \cdot 0,85) = 1270 \text{ тис.кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Підвищення експлуатаційного ККД вентиляторних установок досягається:

- виключенням роботи осьового вентилятора з переверненим колесом;
- забезпеченням нормативних зазорів робочого колеса;
- наявністю обтічника перед входом робочого колеса осьового вентилятора;
- забезпеченням нормативних параметрів дифузора на виході осьового вентилятора;
- точною установкою лопаток направляючого апарата;
- експлуатаційними змінами параметрів робочих коліс слабозавантажених двоступеневих осьових вентиляторів;
- підвищенням активного завантаження двигуна вентилятора.

Регулювання продуктивності вентиляторних установок може здійснюватися аеродинамічними способами і зміною частоти обертання робочого колеса вентилятора за допомогою регульованого електропривода.

Водовідливні установки

Шляхи економії електроенергії у водовідливних установках: підвищення ККД насосів і трубопроводів; регулювання продуктивності водовідливної установки; упорядкування графіка навантажень водовідливної установки; організаційні заходи.

Підвищення ККД насосів забезпечується за рахунок ретельного балансування робочих коліс, регулярною заміною ущільнювачів, забезпечення робочої точки насоса в зоні максимальних значень ККД.

Підвищення ККД трубопроводу може бути за рахунок:

- збільшення перетину труб по всій довжині і на окремих ділянках;
- включення на паралельну роботу резервного нагнітального ставу;
- скорочення довжини трубопроводу, заміна похилих ділянок вертикальними;
- регулярне очищення трубопроводу;
- ліквідація в трубопроводі зайвої арматури і непотрібних поворотів чи зниження їх опору згладжуванням гострих кутів;
- використання арматури з меншими значеннями коефіцієнта місцевого опору (наприклад, заміна в прийомних пристроях на всмоктувальних трубопроводах тарілчастих клапанів на кульові).

Витрата електроенергії за насосною установкою за рік (кВт · год/ рік) визначається виразом:

$$W = \frac{0,00272 \cdot H \cdot Q \cdot T}{\eta_{nc} \cdot \eta_{tp} \cdot \eta_d}, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік},$$

де T — число годин роботи насоса за рік, год/рік; H — висота підйому води, м; η_{mp} - ККД трубопроводу; Q - подача, м³/г.

При зміні значень величин, що входять у формулу, підраховується витрата енергії за базовим варіантом та з урахуванням впровадження енергозберігаючих заходів, різниця витрат енергії дасть економію електроенергії.

Регулювання продуктивності насосної установки при використанні відцентрових насосів у даний час практично не використовується, оскільки одночасно зміняться напір і подача. Тому регулювання можливе лише в невеликому діапазоні для відпрацювання робочої точки з максимальним ККД. Це може бути здійснено:

- за рахунок дроселювання на стороні нагнітального трубопроводу;
- використанням різного виду муфт;
- використанням регульованого електропривода.

Шляхом зміни часу включення насосної установки на період мінімального підземного навантаження можна зменшити втрату енергії в ствольовому кабелі. Зазначений захід, можливо, буде пов'язаний зі збільшенням водозбірника водовідливної установки, однак останнє може мати додатковий ефект за рахунок позалікового електроспоживання насосів.

Організаційні заходи містять:

- усунення витоків у трубопроводі;
- використання напору трубопроводу для зрошення (відпадає

необхідність у насосах зрошення);

- регулярне чищення водозбірника (поліпшується робота прийомного пристрою насосної установки і насоса);
- попередження проникнення води в шахту;
- правильна експлуатація електродвигунів насосів.

Компресорні установки

Шляхи економії електроенергії в компресорних установках: періодичний контроль ККД компресорів; застосування резонансного наддування поршневих компресорів; зниження наднормативних витоків стиснутого повітря і втрат тиску в пневмомережах шахт; узгодження режимів роботи компресорної станції з режимом споживаного стиснутого повітря; заміна пневмообладнання на електроустаткування; використання регульованого електропривода.

Щоб не відбувалося зниження ККД компресорів, необхідно здійснювати заходи щодо підвищення ефективності їх роботи, а саме:

- контроль опору повітрязабірному пристрою;
- регулярне очищення фільтрів;
- регулювання притискних пружин клапанів;

застосування високоякісного мастила для частин тертя і суворо регламентована його подача в циліндри;

• підтримка в справному стані регуляторів продуктивності і забезпечення їх чіткої роботи;

- контроль інтенсивності охолодження компресорів.

Температура стиснутого повітря на виході з проміжного холодильника не повинна перевищувати температуру охолоджувальної води на вході більше ніж на 5 - 10°C.

Застосування резонансної довжини всмоктувальних трубопроводів поршневих компресорів скорочує питому витрату електроенергії на 3 — 5% при одночасному підвищенні продуктивності на 5 - 8%. Резонансна довжина (м) визначається виразом $L=5160/n$ (n - швидкість обертання колінчастого вала компресора, об/хв).

Відповідно до вимоги «ПТЕ вугільних і сланцевих шахт» витoki стиснутого повітря не повинні перевищувати 20%. Для дотримання цієї вимоги необхідно:

- вести систематичний контроль за витокami стиснутого повітря;
- замінювати гумовотканинні повітропроводи на типові гнучкі з металоплівкою і уніфікованою пневмоапаратурою;
- не допускати установки товстостінних труб замість тонкостінних, збільшувати діаметр труб на окремих ділянках;
- установлювати необхідну кількість водовіддільників;
- використовувати пересувні компресори для подачі невеликої кількості стиснутого повітря віддаленим споживачам;
- за можливістю використовувати теплоізоляцію трубопроводу;
- виключити нераціональну витрату стиснутого повітря.

Потужність електродвигуна компресора визначається виразом:

$$P = \frac{1380}{\eta_{из} \cdot \eta_{д}} \cdot \frac{p_1 \cdot Q \cdot \gamma_{н}}{\gamma_{д}} \cdot \lg \frac{p_2}{p_1}, \text{ кВт},$$

де η_3 - ізотермічний ККД компресора; $\gamma_{н}$ — густина повітря при 273° К. і тиску 0,1 МПа, $кг/м^3$; p_1 - початковий тиск всмоктуваного повітря, М Па; p_2 - тиск стиснутого повітря, МПа; Q_k — подача компресора, $м^3/с$.

Зниження тиску стиснутого повітря на 1% зменшує витрату електроенергії приблизно на 0,5%. Графік роботи компресорної станції повинен бути погоджений із графіком споживання стиснутого повітря, що скорочує надлишкове вироблення стиснутого повітря і додаткові втрати.

При можливості заміни пневматичної енергії на електричну окремих споживачів має місце 7 — 10 кратна економія енергії.

Конвеєрні установки

Шляхи економії електроенергії на конвеєрному транспорті: підвищення середнього завантаження конвеєрів до номінального значення; виключення додаткової роботи конвеєрів у холосту; виключення нераціонального використання скребкових конвеєрів; підтримка високого технічного стану конвеєра; застосування регульованого електропривода.

Витрата електроенергії одним конвеєром за розрахунковий період часу визначається виразом

- для стрічкового конвеєра:

$$W = 0,013 \cdot L \cdot \delta \left[C_{ст} \cdot V_{ст} \cdot t_p + 0,28 \cdot Q_p \left(1 \pm \frac{\sin \beta}{\delta} \right) \right], \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

- для скребкового конвеєра:

$$W = 0,01 \cdot L_r \cdot \delta \left[C_{ск} \cdot V_{ск} \cdot t_p + 0,34 \cdot Q_p (1 \pm 2 \cdot \text{tg} \beta) \right], \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де L — довжина конвеєра, м; якщо приймається вантаж з виїмкових ділянок, його довжина визначається, виходячи з його довжини на початок планованого періоду, $L_n \pm$ половина просування лінії вибою L_g за розрахунковий період роботи при подовженні (вкорочуванні) конвеєра $L = L_n \pm L_g/2$; β — кут установки конвеєра, градус; $L_r = L \cos \beta$ — горизонтальна довжина конвеєра, м; δ — коефіцієнт опору руху: для стаціонарних конвеєрів $\delta = (0,02 \dots 0,33)$; для конвеєрів встановлених у межах виїм очних ділянок $\delta = (0,04 \dots 0,066)$; для конвеєрів, що працюють в особливо тяжких умовах $\delta = (0,08 \dots 0,12)$; C_p, C_c — погонна маса частин конвеєра, що рухаються, $кг/м$, величина таблична залежно від типу конвеєра; t_p — час роботи конвеєра за розрахунковий період, год; $V_c, V_{ск}$ — швидкість відповідно стрічки і ланцюга конвеєра, $м/с$; Q_p — розрахункова маса вантажу, перевезеного конвеєром за час роботи t_p , т.

Для визначення нераціональної витрати електроенергії при роботі конвеєрів без навантаження використовується лише перший доданок зазначених виразів, і замість t_p підставляється час t_x холостого ходу конвеєра за розрахунковий період.

З метою збільшення завантаження конвеєра до номінальних значень слід за конвеєром, що приймає вугілля (породу) встановлювати бункер чи іншу

усереднюючу ємність, з якої здійснюється навантажування послідовно працюючих конвеєрів з номінальним завантаженням. Варто регулярно стежити за станом бункерів і усереднюючих ємностей, за роботою завантажувальних пристроїв; при бункерах ємністю 1000 м³ і більше використовувати датчики верхнього і нижнього рівня, зблоковані зі схемою автоматизації конвеєрної лінії.

У деяких випадках має місце нераціональне використання скребкових конвеєрів, які можна замінити стрічковими. Економічний ефект цього заходу, а також використання бункерів можна розрахувати, використовуючи наведені аналітичні вирази витрати енергії конвеєрами.

Для підтримки високого технічного стану конвеєрів, що знижує електроспоживання, слід:

- періодично проводити змащування механічних вузлів відповідно до карти мащення заводу — виготовлювача;
- не допускати заштибовки конвеєра і кінцевих станцій;
- не допускати експлуатацію конвеєра при надмірному зношуванні окремих вузлів;
- у стрічкових конвеєрах систематично перевіряти стан пристроїв для очищення стрічки і барабанів;
- у скребкових конвеєрах підтримувати в нормальному стані замкові з'єднання і стики секцій регулюванням натягу скребкового ланцюга в заданих межах;
- вчасно робити планово попереджувальний ремонт.

Вибір раціонального способу регулювання швидкості залежно від характеру зміни навантаження

1. Вибір способу регулювання швидкості при постійному навантаженні двигуна

Урегульованому електропривод: при зміні швидкості має місце зміна навантаження двигуна. У той же час для повного використання двигуна його потужність повинна бути вибрана так, щоб навантаження при роботі на новій швидкості не перевищували припустимої за умовами нагрівання. Досягається це вибором

Відповідного способу регулювання, при якому виконується дана умова.

. Способи регулювання швидкості за умовою припустимого навантаження поділяються на дві групи:

- регулювання при постійному моменті (зміна напруги на якорі ДПС чи статорі СД, зміна опору в роторі АД чи в колі якоря ДПС, у деяких каскадних схемах, у вентильному двигуні);
- регулювання при постійній потужності (ослаблення магнітного потоку ДПС, зміна числа пар полюсів АД, у деяких каскадних схемах).

Регулювання швидкості при постійному моменті забезпечує регулювання швидкості униз від номінальної, тобто $\omega_H = \omega_{\max}$. Номінальний момент двигуна дорівнює моменту навантаження, тобто $M_H = M_c$ і номінальна потужність дорівнює:

$$P_H = M_H \omega_H = M_M \omega_{\max} = P_{m \max}$$

Таким чином, номінальна потужність двигуна дорівнює максимально можливій, і при цьому на всіх швидкостях двигун завантажений повністю і працює в нормальному тепловому режимі, тобто спосіб регулювання швидкості є раціональним.

Для регулювання швидкості при постійній потужності характерне регулювання швидкості вгору від номінальної, тому за номінальну швидкість двигуна приймають мінімальну швидкість у діапазоні, тобто

$\omega = \omega_{\min}$. Оскільки номінальна потужність двигуна дорівнює максимальній потужності навантаження $P_{M \max} = M_m \omega_{\max}$, то номінальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{P_{M \max}}{\omega_{\min}} = \frac{M_M \omega_{\max}}{\omega_{\min}} = M_M D,$$

де $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ - діапазон регулювання.

З виразу видно, що номінальний момент двигуна повинен у D раз перевищувати момент навантаження. Двигун завантажений повністю тільки на максимальній швидкості ω_{\max} , коли по якорі протікає номінальний струм, а магнітний потік мінімальний. При інших, менших швидкостях потік двигуна збільшується, струм у якорі зменшується, і тим самим двигун є недовикористаним за умовами нагрівання. Виявляється завищеним габарит двигуна, що визначається номінальним моментом.

Таким чином, при сталому навантаженні використання способів регулювання швидкості при постійній потужності є нераціональним оскільки вимагає завищення габаритів двигуна.

2. Вибір способу регулювання швидкості при постійній статичній потужності

Регулювання швидкості при постійному моменті можливо тільки вниз від номінальної. За номінальну швидкість двигуна приймаємо максимальну швидкість у діапазоні, тобто $\omega_H = \omega_{\max}$ - максимальний момент двигуна, на який він повинний бути вибраний при $P_c = \text{const}$, відповідає мінімальній швидкості:

$$M_{M \max} = \frac{P_M}{\omega_{\min}} = M_H$$

Отже, номінальна потужність двигуна:

$$P_H = M_H \omega_H = \frac{P_M \omega_{\max}}{\omega_H} = P_M$$

тобто вона повинна бути в D раз більше потужності навантаження P_M . Це означає, що при роботі двигуна на всіх швидкостях, крім мінімальної, він буде недовантажений і недовикористаний по нагріванню.

Регулювання швидкості при постійній потужності забезпечує регулювання швидкості вгору від номінальної. Тоді як номінальна повинна бути прийнята мінімальна швидкість у заданому діапазоні, тобто $\omega_H = \omega_{\min}$, а номінальний момент:

$$M_H = \frac{P_M}{\omega_{\min}} = \frac{P_M}{\omega_H}$$

Тоді номінальна потужність вибраного двигуна:

$$P_H = M_H \omega_H = \frac{P_H \omega_H}{\omega_H} = P_M,$$

тобто дорівнює потужності навантаження. Двигун при цьому завантажений цілком на всіх швидкостях і буде працювати в нормальному тепловому режимі.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок - для вибору мінімального за габаритом двигуна і забезпечення його повного використання по нагріванню необхідно, щоб спосіб регулювання швидкості за показником припустимого навантаження цього двигуна відповідав залежності навантаження від швидкості. При навантаженні виду $M_M = \text{const}$ доцільне використання способів регулювання при постійному моменті, а при $P_M = \text{const}$ - при постійній потужності.

Підвищення завантаження електропривода виключення режиму неробочого ходу

Підвищення завантаження електропривода до номінального значення і максимально можливе виключення режиму неробочого ходу дозволяє знизити енергоспоживання за рахунок збільшення ККД і коефіцієнта потужності привода.

При коефіцієнті навантаження, меншому 0,4...0,5, необхідна заміна на двигун меншої потужності. Якщо $(0,4...0,5) < \kappa_3 < (0,7...0,75)$, доцільність заміни повинна бути підтверджена зменшенням сумарних втрат енергії в двигуні й у мережі:

$$\frac{1 - \eta_1}{\eta_1} + k_e \frac{\text{tg}\varphi_1}{\eta_1} > \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} + \frac{\text{tg}\varphi_2}{\eta_2}$$

де η_1, η_2 – ККД порівнюваних двигунів при заданому навантаженні; $\text{tg}\varphi_1$ і $\text{tg}\varphi_2$ - тангенси кутів φ_1 і φ_2 , що відповідають значенням коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$, і $\cos\varphi_2$; k_e — коефіцієнт підвищення втрат, кВт/квар, що визначає втрати активної потужності, що приходяться на передачу 1 квар у даній системі електропостачання.

Величина коефіцієнта підвищення втрат k_e може бути визначена з табл.9.1, а якщо він не заданий, його приймають рівним 0,07 кВт/квар для

високовольтних споживачів, чи 0,125 кВт/квар для низьковольтних споживачів.

Таблиця 9.1

Характеристика трансформатора і системи електропостачання, від якої живиться двигун	k_c , кВт/квар	
	у години максимуму	у години мінімуму
Трансформатори, що живляться безпосередньо від шин електростанцій	0,02	0,02
Трансформатори мережі, що живляться від електростанцій на генераторній напрузі	0,07	0,04
Знижуючі трансформатори 110/35/10 кВ, що живляться від районних мереж	0,1	0,06
Знижуючі трансформатори 10/6/0,4 кВ, що живляться від районних мереж	0,15	0,1

Режим неробочого ходу привода є економічно недоцільним, оскільки призводить до необґрунтованого споживання активної енергії:

$$W = P_0 t_0$$

де P_0 - потужність, споживана з мережі на неробочому ходу за час t_0 .

Крім того, збільшуються втрати енергії при передачі зайвої реактивної потужності. Орієнтовне споживання реактивної енергії Q у функції коефіцієнта завантаження при $Q_0 = 0,4 P_n$ зображено на рис.9.1

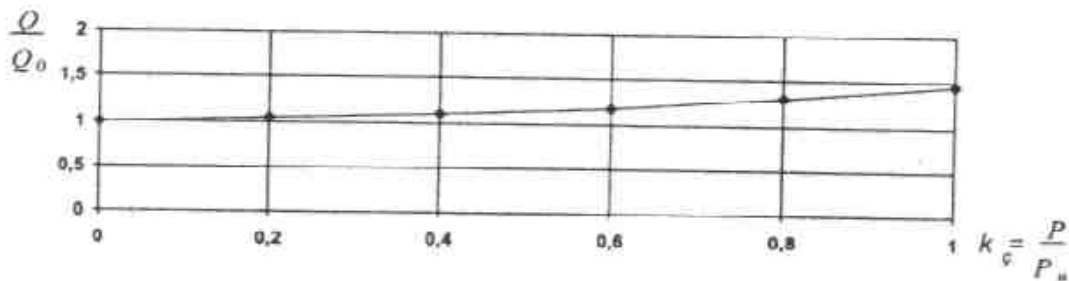


Рисунок 9.1

Втрати активної потужності $\Delta P_{л}$ і енергії $\Delta W_{л}$ у трифазних лініях

$$\Delta P_{л} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta W_{л} = \Delta P_{л} t_{п}$$

де $r = \frac{\rho L}{S}$ - активний опір проводу чи шини, кабелю, Ом; ρ — питомий

опір матеріалу проводу при 20° С (для алюмінію 0,026...0,029; для міді 0,0175...0,018; для сталі 0,1...0,14 Оммм²/м); L — довжина лінії, м; S — перетин провідника, мм²; P , Q — відповідно, розрахункова активна і реактивна потужності, передані через лінію, кВт, квар; U — лінійна напруга, кВ; t - тривалість роботи за розрахунковий період, год.

Втрати активної потужності в двообмоточному трансформаторі

$$\Delta P = \Delta P'_0 + \Delta P_{\text{ПО}} + k_{\text{ЗТ}}^2 \Delta P'_k,$$

де $\Delta P_{\text{ПО}}$ - втрати на примусове охолодження (враховуються тільки для потужних трансформаторів, що мають систему примусового охолодження); $\Delta P'_0 = \Delta P_0 + k_e \Delta Q_0$ - наведені втрати потужності неробочого ходу; $\Delta P'_k = \Delta P_k + k_e \Delta Q_k$ - наведені втрати потужності короткого замикання; ΔP_0 - втрати неробочого ходу при номінальній напрузі (за паспортом); ΔP_k - втрати короткого замикання при номінальному навантаженні (за паспортом); $k_{\text{КЗ}} = \frac{S_\phi}{S_H}$ - коефіцієнт завантаження трансформатора, дорівнює відношенню фактичного навантаження трансформатора S_ϕ до його номінальної потужності S_H ; $\Delta Q_0 = S_H \frac{I_0}{100}$ - реактивні втрати неробочого ходу трансформатора; I_0 - струм неробочого ходу трансформатора (за паспортом); $\Delta Q_k = S_H \frac{I_k}{100}$ - реактивні втрати короткого замикання трансформатора; U_k - напруга короткого замикання трансформатора (за паспортом).

При розрахунку економічного ефекту від заміни незавантажених двигунів більшої потужності на двигуни меншої потужності необхідно знати сумарні втрати активної потужності:

$$\Delta P = [Q_0(1 - k_3^2) + k_3^2 Q_H] k_e + \Delta P_0 + k_3^2 P_H$$

де $Q_0 = \sqrt{3} U_H I_0$ - реактивна потужність, споживана електродвигуном з мережі при неробочому ході; I_0 - струм неробочого ходу електродвигуна;

$k_3 = \frac{P_{\text{CP}}}{P_H}$ - коефіцієнт завантаження електродвигуна; P_{CP} - середнє

навантаження електродвигуна; $Q_0 = \frac{P_H \text{tg} \varphi_H}{\eta_H}$ - реактивна потужність

електродвигуна при номінальному навантаженні; $\text{tg} \varphi_H = \text{tg}(\arccos \varphi_H)$;

$\Delta P_0 = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \frac{k_p}{1 + k_p}$ - втрати активної потужності при неробочому ході

двигуна; $\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \frac{1}{1 + k_p}$ - приріст втрат активної потужності в двигуні

при номінальному (100%) навантаженні; $k_p = \frac{\Delta P_0}{\Delta P_H}$ - розрахунковий

коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна і визначається з формули

$$k_p = \frac{\Delta P_0^*}{(1 - \eta_H) - \Delta P_0^*}; \Delta P_0^* - \text{втрати неробочого ходу, віднесені до}$$

номінальної потужності двигуна.

Коефіцієнт k_p має такі значення для різних типів двигунів:

$0,5 < k_p < 1$ - ДПС послідовного збудження;

$1 < k_p < 2$ - ДПС незалежного збудження;

$0,5 < k_p < 1$ - асинхронні.

Нижні значення коефіцієнта відповідають тихохідним двигунам, верхні - швидкохідним.

Зниження напруги на затискачах електродвигуна

При неможливості заміни малозавантажених двигунів варто перевірити доцільність зниження напруги на його затискачах. Зниження напруги живлення АД призводить до зменшення споживання реактивної потужності (за рахунок зниження струму намагнічування) і, тим самим, до підвищення $\cos\varphi$. При цьому одночасно зменшуються втрати активної потужності, тобто збільшується ККД двигуна.

Можливі такі методи зниження напруги малозавантажених асинхронних двигунів:

- перемикання статорної обмотки з «трикутника» на «зірку»;
- секціювання статорних обмоток;
- зниження напруги в силових колах підприємств перемиканням відгалуджень знижуючих трансформаторів;
- застосування найпростішого регульованого електропривода за схемою ТРН-АД.

Перемикання статорної обмотки АД з «трикутника» на «зірку» звичайно рекомендують для двигунів напругою до 1000 В, завантажених менше 30%. Ефективність заходів пояснюється рис.9.2 (тут наведені графіки для значень $\cos\varphi_H = 0,78; 0,82; 0,86; 0,9$) і рис. 9.3.

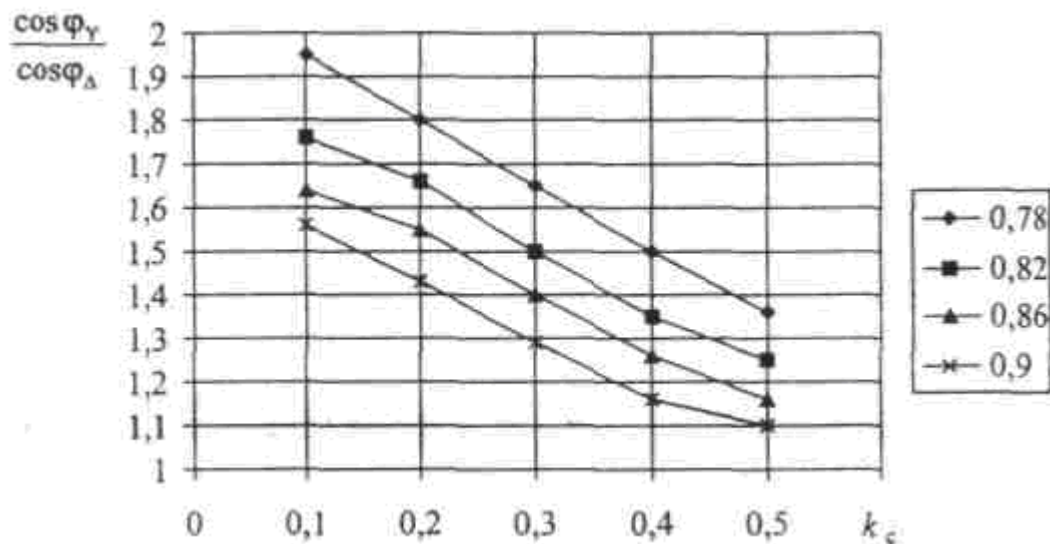


Рисунок 9.2

Величина моменту, що розвивається асинхронним двигуном, пропорційна квадрату напруги мережі живлення. Тому при перемиканні обмоток статора з «трикутника» на «зірку» внаслідок зниження моменту необхідно виконувати перевірку за перевантажувальною спроможністю і величиною пускового моменту.

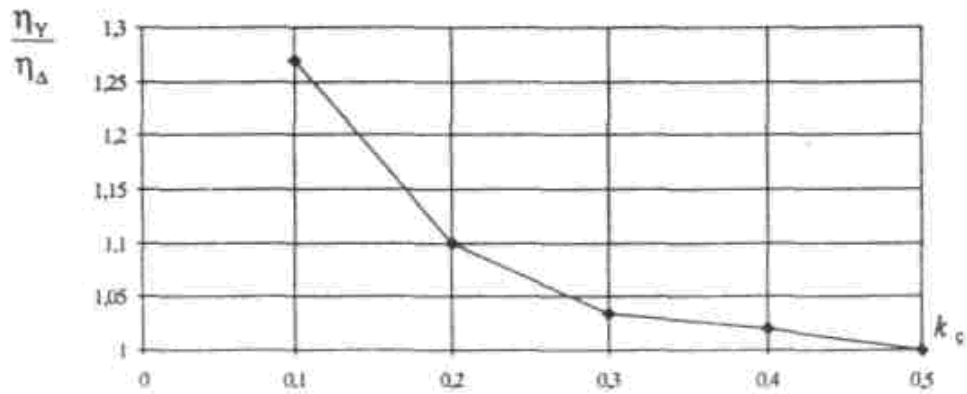


Рисунок 9.3

Секціонування рекомендується коли неможливо скористатися попереднім способом. Якщо двигуни виготовлені з паралельними секціями в статорній обмотці, то секціонування здійснюють шляхом перепайки лобових з'єднань обмотки. Якщо ж обмотка виконана одиночним проводом, то перемикання секцій обмотки можливе лише при капітальному ремонті.

Перемикання відгалужень понижуючого трансформатора часто застосовують на практиці. Цей захід раціональний, якщо трансформатор не живить одночасно інші приймачі, що не допускають зниження напруги на їх затискачах. Знижуючи напругу мережі живлення, варто пам'ятати, що при цьому зростають втрати й у самій мережі. А в трансформаторах сумарні втрати активної потужності при зміні напруги в більшості випадків не змінюються.

Зниження напруги впливає і на тепловий режим асинхронних двигунів. Так, при номінальному навантаженні і номінальній частоті мережі живлення зниження напруги на 10% призводить до зростання перегріву двигуна також на 10%. Однак варто враховувати, що при завантаженні двигуна, що складає 90%, припустимо знижувати напругу на 13%, а при $k_3 = 0,8$ - напруга може знижуватись на 22%, без небезпеки перегріву двигуна понад припустимий.

На практиці використовують відімкнення частини приводних двигунів при недовантаженні, наприклад, багатодвигунового конвеєра. Але це недоцільно, оскільки через обертання працюючими двигунами непрацюючих приводних блоків втрати потужності майже не зменшуються. А знос редукторів, зв'язаних з непрацюючими двигунами, може бути не менше, ніж у працюючих.

Аналіз показує, що електроприводи великого числа виробничих механізмів мають завищену потужність, що у 1,5-2,5 рази перевищує необхідну. Крім того, електроприводи деяких механізмів (пресів, ковальського устаткування, верстатів) частину часу працюють з недовантаженням.

Зазначені особливості дозволяють знизити електроспоживання недовантаженого асинхронного двигуна при роботі в зоні номінальної швидкості, забезпечивши його роботу за рахунок ТРН на регульованій

$U_1 < U_H$, а не на природній характеристиці, де U_1 - діюче значення першої гармоніки напруги, прикладене до двигуна; U_H - діюче значення номінальної напруги мережі. Цей режим роботи ілюструє рис. 9.4, де цифрою «1» позначена природна, цифрою «2» - регульовальна механічна характеристика при керуванні від ТРН; s_1 і s_2 - ковзання на природній і регульовальній характеристиках при заданому M_c

Електромагнітні втрати в двигуні:

$$\Delta P = V_1 + V_2 + K_{C1}$$

При роботі на природній характеристиці:

$$V_1 = [A + (1 - A)\mu_c^2]V_{1H};$$

$$V_2 = \mu_c^2 V_{2H};$$

$$K_{C1} = [B + (1 - B)\mu_c^2]K_{C1H},$$

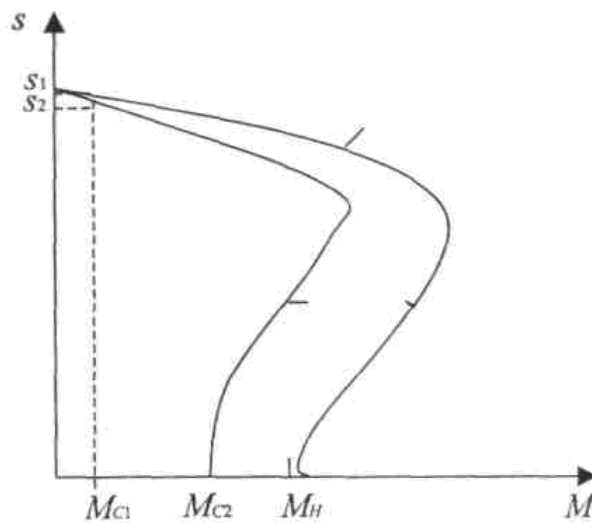


Рисунок 9.4

де V_{1H} , V_{2H} , K_{C1H} - номінальні втрати в міді статора, обмотці ротора, сталі статора; $\mu_c = \frac{M_c}{M_H}$ - відносне значення моменту статичного навантаження;

$A \approx (I_0/I_H)^2$; I_0 - струм неробочого ходу двигуна при живленні номінальною напругою; V - конструктивний коефіцієнт ($K=0,96 \div 0,98$ для двигунів єдиної серії, $B = 0,94 \div 0,97$ для двигунів краново-металургійних серій).

При роботі на регульовальній характеристиці 2, реалізованій за рахунок ТРН,

$$V_1 = 1,1\mu_c [A \frac{s_H}{s} + (1 - A) \frac{s_H}{s}] V_{1H};$$

$$V_2 \cong 1,1\mu_c \frac{s_H}{s} V_{2H};$$

$$K_{C1} = \mu_c [B \frac{s_H}{s} + (1 - B) \frac{s_H}{s}] K_{C1H}.$$

При роботі зі зниженою напругою, коли $U_1 < U_H$, дещо падає швидкість двигуна, збільшуються втрати V_2 , зменшуються втрати V_1 і K_{C1} , але їх

перерозподіл такий, що значення ΔP при роботі на характеристиці 2 виявляється менше, ніж при роботі на природній характеристиці. Існують методики вибору оптимального значення s_2 , при якому забезпечується мінімальне значення електромагнітних втрат. У цьому випадку вдається знизити споживання енергії в 1,5 — 2 рази. Економія електроенергії буде тим більше, чим менше момент двигуна в порівнянні з номінальним і чим більше тривалість роботи двигуна з недовантаженням.

Ефект підсилюється при використанні асинхронних двигунів з відносно високим значенням струму неробочого ходу статора. Так, якщо асинхронний двигун МТКЕ012-6 ($P_n=2,2$ кВт) забезпечує, працюючи в повторно-короткочасному режимі, 60 включень за годину при часі роботи на сталій швидкості $r_v=30$ с і річному числі годин роботи $T=6000$ год/рік, то при роботі на регульовальній характеристиці з ковзанням s_2 вдається заощадити за рік 210 кВт·год — при $M_C=0,5M_n$, 660 кВт·год - при $M_C=0,25M_n$, 1150 кВт·год - при $M_C=0,05M_n$ у порівнянні з роботою на природній характеристиці при s_1 .

Контрольні питання до теми 9

1. Перелічіть шляхи по економії електроенергії підйомної установки.
2. Наведіть залежність ККД турбомеханізму від завантаження.
3. Перелічіть заходи щодо підвищення ККД компресорної установки.
4. Вплив зниження напруги на ККД мало завантажених двигунів.
5. Наведіть сумісні характеристики турбомеханізму та мережі при регулюванні продуктивності засувкою та швидкості обертання робочого колеса.

ТЕМА 10

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Керовані вентильні випрямлячі отримали широке застосування в різних галузях народного господарства. Частка перетвореної ними енергії постійно росте, оскільки із зростанням використання випрямленого струму і напруги в технологічних процесах випуск вентильних перетворювачів неухильно розширюється, а їх встановлена потужність збільшується. У більшості вентильних перетворювачів випрямний режим є основним, тому основна увага приділяється керованим вентильним випрямлячам.

Разом з широко відомими достоїнствами керовані вентильні випрямлячі мають ряд серйозних недоліків, основним з яких є низький коефіцієнт потужності при глибокому регулюванні випрямленої напруги. У найбільшій мірі цей чинник виявляється при роботі випрямляча на протиЕРС і постійності струму навантаження, наприклад, в електроприводі з двигуном постійного

струму. Тут при випрямленій напрузі, близькій до нуля, реактивна потужність випрямляча максимальна. Таким чином, із зменшенням випрямленої напруги реактивна потужність випрямляча росте, збільшуючи завантаження електричних мереж реактивним струмом, що у свою чергу супроводиться значними втратами активної енергії і напруги в мережі, а також зниженням пропускної спроможності — по активній потужності — всієї системи електропостачання.

Жорсткий зв'язок між змінним струмом на вході випрямляча і його випрямленим струмом I_d має своїм слідством те, що не дивлячись на зменшення випрямленої напруги U_d і відповідне зменшення потужності на виході випрямляча P_d споживаний ним з мережі струм зберігає значення, пропорційне струму I_d . При включенні випрямляча і малому значенні його напруги U_d або при різкому зменшенні цієї напруги відбувається накид реактивної потужності на мережу, що у разі значної потужності навантаження супроводиться провалом напруги в мережі і шкідливо відбивається на останніх її споживачах. У ряді випадків, наприклад, при заміні генераторів в потужних системах генератор — двигун на тиристорні перетворювачі, це нерідко спричиняє за собою необхідність реконструкції живлячої мережі. В умовах зростаючого використання вентильних випрямлячів відмічені їх недоліки супроводяться відчутним техніко-економічним збитком. Для їх усунення існують два шляхи: зовнішня і внутрішня компенсація. Зовнішня компенсація заснована на застосуванні різних компенсуючих пристроїв, що генерують реактивну потужність в мережу, — конденсаторних батарей, синхронних компенсаторів, регульованих і нерегульованих джерел реактивної потужності. До них відносяться також фільтрокомпенсируючі пристрої, виконані на базі реакторів і конденсаторів. Внутрішня компенсація припускає зменшення як споживання реактивної потужності, так і генерації вищих гармонік струму за допомогою змін в самому випрямлячі.

Існує багато способів внутрішньої компенсації — поліпшення енергетичних показників вентильних випрямлячів. Перерахуємо основні з них: підвищення еквівалентної фазності (рис.10.1, 10.2), схеми із змінною структурою, схеми із ступінчастою зміною коефіцієнта трансформації або з несиметричною анодною напругою, схеми з нульовими вентилями, схеми з додатковими конденсаторами — поперечна або подовжня компенсація, несиметричне і почергове керування, двократне включення вентилів і різні комбіновані схеми і способи керування.

Із збільшенням еквівалентною фазності m поліпшується коефіцієнт спотворення k_n струму, споживаного випрямлячем. Так, трифазний мостовий випрямляч має $m = 6$, $k_n = 0,955$ і генерує в мережу гармоніки струму кратністю $v = 6k \pm 1$, де $do = 1, 2, 3, \dots$. Два таких випрямляча, включених послідовно або паралельно (у останньому випадку через згладжуючі дроселі) і живлені від джерел трифазної напруги із зсувом на 30 електричних градусів, утворюють складений випрямляч з еквівалентною фазністю $m = 12$, $k_n = 0,988$. Такий випрямляч генерує гармоніки кратністю $v = 12k \pm 1$. Випрямлячі з підвищеною еквівалентними фазністю зазвичай застосовуються для могутнього

навантаження, яке не може забезпечити один міст. Кожен з мостів вказаного випрямляча живиться від окремого двообмоточного трансформатора або від окремої вентиляльної обмотки загального триобмоточного (n-обмоточного) трансформатора. Коефіцієнт зсуву в таких випрямлячах залишається без змін, тобто із зменшенням випрямленої напруги реактивний струм і потужність випрямляча з підвищеною еквівалентними фазністю збільшуються (рис.10.1, 10.2).

Випрямлячі із змінною структурою будуються таким чином, що для отримання великих U_d в них використовується трифазна мостова схема випрямлення, а для отримання напруги $U_d < 0,56U_{d0}$ (U_{d0} — випрямлена напруга випрямляча при куті керування $\alpha = 0$) вони переходять на трифазну нульову схему (рис.10.3). З цією метою вказані випрямлячі забезпечуються одним додатковим вентиляем, один вихід якого, наприклад, анод, приєднаний до нуля джерела живлення, а інший, наприклад, катод — до загальної точки однойменної з даним виводом групи вентилів моста (в даному випадку до катодної). Після зниження випрямленої напруги нижче половини U_{d0} загальна з додатковим вентиляем група вентилів закривається і відбувається перехід на нульову схему випрямлення за допомогою участі додаткового вентиля і групи вентилів даного випрямляча, що залишилася в роботі. Таким чином вдається підвищити коефіцієнт потужності випрямляча в діапазоні $U_d = U_{d0}(0..0,5)$. Відомі як одномостові, так і двомостові випрямлячі подібного типу. Проте вони вимагають спеціальних заходів по виключенню постійної складової магнітного потоку в магнітопроводі трансформатора, що підвищує розрахункову потужність останнього.

Зміна коефіцієнта трансформації трансформатора проводиться шляхом перемикання відпаювань однієї з його обмоток за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад, пристроїв регулювання під навантаженням, контактним або безконтактним методом. У ряді випадків до відпаювань вентиляльної обмотки трансформатора можна приєднати декілька комплектів вентилів, з яких одночасно працює тільки один, що забезпечує при необхідному значенні U_d якнайкращий коефіцієнт потужності. Складнощі подібного методу регулювання - очевидні. Число перемикань відпаювань трансформатора в одиницю часу при контактному перемиканні обмежене, а наявність декількох комплектів вентилів окрім збільшення габаритів випрямляча вимагає ускладнення системи імпульсно-фазового керування (СІФК). Безконтактне перемикання відпаювань вимагає додаткових вентилів разом з системою керування .

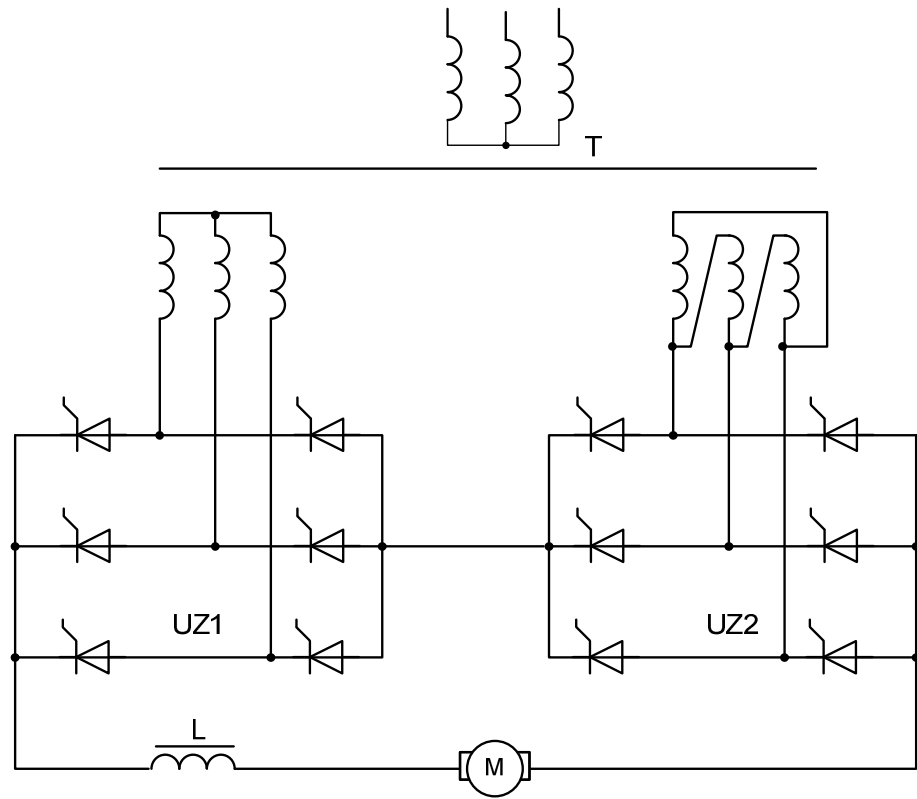


Рисунок 10.1 – Трифазна мостова схема з послідовним вмиканням мостів

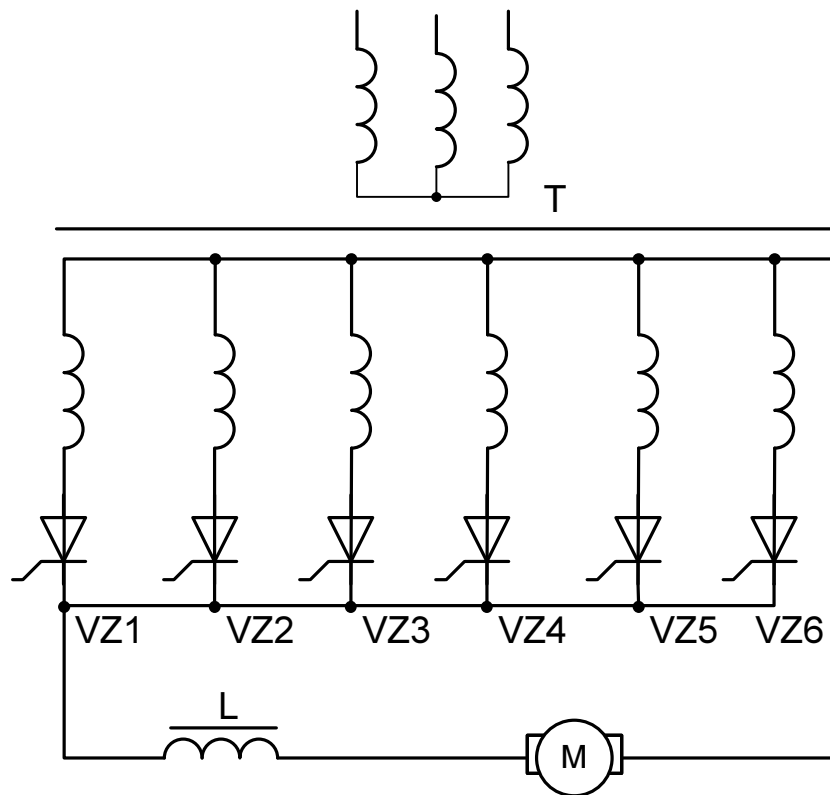


Рисунок 10.2 – Шестифазна пускова схема перетворювача

Підвищити енергетичні показники вентильних випрямлячів можна шляхом використання конденсаторів. Останні можуть підключатися як паралельно входу випрямляча, так і послідовно — між джерелом живлення і випрямлячем. Паралельне підключення конденсаторів проводиться як через послідовні реактори, так і безпосередньо до входу випрямляча. При цьому конденсатори здійснюють компенсацію реактивної потужності (рис.10.4) і одночасно служать фільтром для гармонік струму вищих порядків. Наявність конденсаторів на вході випрямляча зменшує кут комутації вентилів і таким чином додатково компенсує реактивну потужність першої гармоніки. Одночасно знижуються перенапруження на вентилях випрямляча. До недоліків такого включення конденсаторів відноситься незмінність такою, що генерується ними реактивної потужності, тоді як реактивна потужність випрямляча змінюється в широкому діапазоні у функції випрямленої напруги.

У разі послідовного включення конденсаторів напруга на вході випрямляча U є векторною різницею напруги джерела живлення і конденсатора. Ця напруга випереджає по фазі напругу джерела живлення, що дозволяє зменшити реактивну потужність випрямляча, а в деякій частині діапазону регулювання U_d — працювати з генерацією реактивної потужності. Випрямлячі з послідовно включеними конденсаторами відносяться до випрямлячів з одноступінчатою штучною комутацією (ШК). Ряд схем випрямлячів з одноступінчатою ШК запропонований в роботі. Ці випрямлячі містять зрівняльний трифазний реактор і трифазні конденсатори, які перезаряджаються частиною струму навантаження. До недоліків випрямлячів з послідовними конденсаторами відноситься те, що за відсутності струму навантаження конденсатори в них не використовуються.

Одним із способів зменшення споживання реактивної потужності є несиметричне керування групами вентилів випрямляча. Суть способу полягає в тому, що вентиляні анодної і катодної груп випрямляча мають неоднакові кути керування. За рахунок цього максимум реактивної потужності випрямляча можна зменшити в 2 рази. Існує також велика кількість схем двомостових випрямлячів з несиметричним керуванням. Загальним їх недоліком є ускладнення СІФК і, як наслідок, зниження надійності роботи.

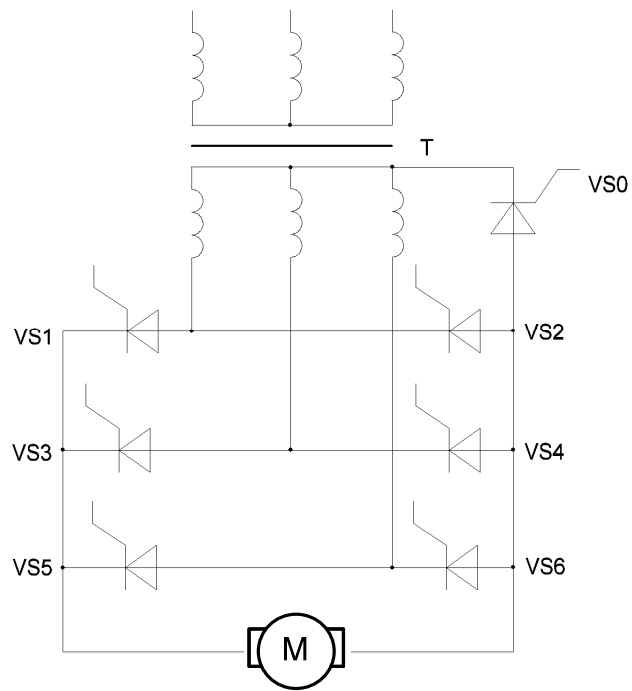


Рисунок 10.3 – Двохгрупова трифазна схема збудника з тиристором в нульовому дроті трансформатора

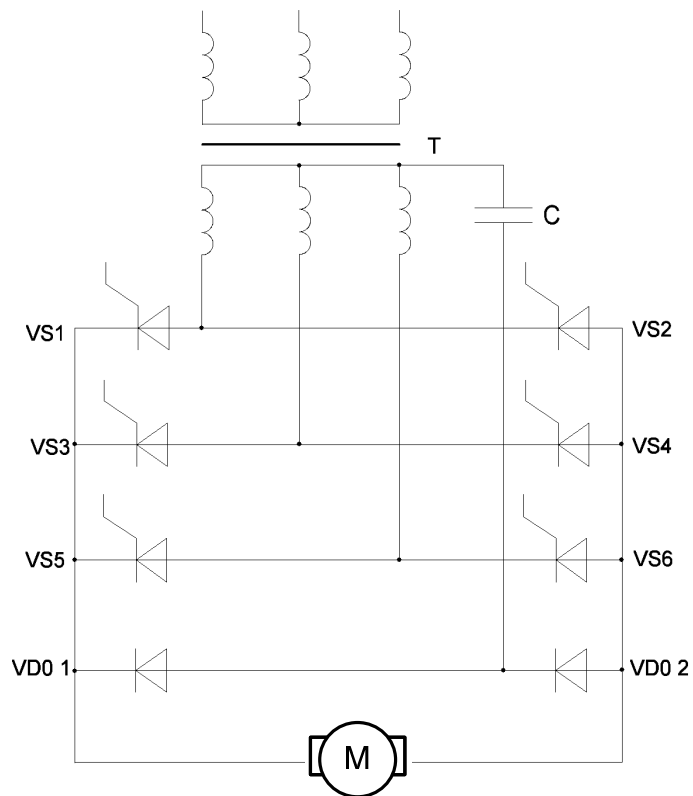


Рисунок 10.4 – Трифазна мостова схема збудника з нульовими діодами і конденсатором в нульовому виведенні трансформатора

Подібним розглянутому є спосіб почергового керування. У цьому способі кут керування катодною групою одномостового випрямляча змінюється при збереженні незмінним кута керування анодної групи вентилів даного випрямляча або навпаки. Таким чином, одночасно може змінюватися кут керування тільки однієї групи вентилів випрямляча. Зміна випрямленої напруги від максимального до нуля проводиться перекладом однієї групи вентилів моста з випрямного режиму в інверторний, тоді як інша група вентилів повністю відкрита (не управляється). Некерована група не споживає реактивної потужності, що знижує її споживання випрямлячем в цілому. Максимум реактивної потужності випрямляча, керованого за даним способом, знижується в 2 рази. Почергове керування найчастіше застосовується в двух- і багатомостових випрямлячах. Тоді по черзі управляються не групи вентилів, а вентиля мостів. При цьому мости можуть з'єднуватися як паралельно — через зрівняльні реактори, так і послідовно. Із збільшенням кількості мостів коефіцієнт потужності багатомостового випрямляча з почерговим керуванням зростає.

Загальним недоліком несиметричного і почергового способів керування випрямлячем є істотне ускладнення СІФК і погіршення гармонійного складу струму, а також збільшення втрат активної потужності. Наприклад, при почерговому управлінні групами вентилів одномостового випрямляча в мережевому струмі окрім канонічних гармонік з'являється повний спектр парних гармонік, а випрямлена напруга містить значну по величині третю гармоніку.

Поліпшення коефіцієнта потужності випрямляча можна добитися також шляхом двократного включення вентилів. У даному методі в зоні глибокого регулювання, коли випрямлена напруга не перевищує половини максимального, на електроди вентилів, що управляють, окрім основних відмикаючих імпульсів подають ще допоміжні. Тоді в деякому інтервалі часу одночасно опиняються відкритими і проводять струм вентиля анодної і катодної груп, підключені до однієї фази джерела живлення. В цьому випадку відкрита пара вентилів, сполучених послідовно, виконує роль шунтуючого вентиля, струм навантаження випрямляча замикається через них, інше джерело живлення. На цьому інтервалі часу струм з мережі не споживається, що і обумовлює підвищення коефіцієнта потужності випрямляча. Основним недоліком даного методу є ускладнення СИФУ випрямляча.

Комбіновані методи поліпшення енергетичних показників включають два і більш перерахованих методу. Так, несиметричне або почергове керування може поєднуватися з двократним включенням вентилів, використання послідовних конденсаторів на вході випрямляча може застосовуватися спільно з почерговим керуванням і одночасно з двократним включенням вентилів; послідовні конденсатори можуть бути використані в схемах із змінною структурою і так далі. В таких комбінаціях методів керування і схем підсумовуються як достоїнства, так і недоліки кожного з них.

Розглянуті схеми і способи підвищення енергетичних показників випрямлячів, за деяким винятком, пов'язані з ускладненням системи керування

випрямлячем. Само по собі це ускладнення не представляє серйозного недоліку, проте воно істотно знижує надійність випрямляча. Відмова випрямляча в роботі унаслідок недостатньої надійності системи керування супроводиться значним техніко-економічним збитком, який найчастіше виявляється у багато разів великим того виграшу, який досягнутий завдяки поліпшенню енергетичних показників випрямляча. Крім того, ускладнення систем керування економічно доцільно тільки для потужних випрямлячів — не менше декількох сотень кіловат, тоді як загальна встановлена потужність решти випрямлячів, що знаходяться в експлуатації, співпадає із загальною встановленою потужністю потужних випрямлячів. За цими та іншими причинами вітчизняна промисловість випускає в основному вентильні одномостові перетворювачі (випрямлячі) з симетричним керуванням. Багатомостові перетворювачі випускаються в тих випадках, коли потужності одного моста виявляється недостатньо для живлення навантаження. Проте і такі перетворювачі мають переважно симетричне керування. Поліпшення коефіцієнта потужності в багатомостових випрямлячах досягається, як правило, шляхом підвищення їх еквівалентною фазності. У зв'язку з викладеним, для поліпшення енергетичних показників доцільно використовувати такі схеми випрямлячів, які можна реалізувати в одномостових випрямлячах і які не призводять до істотного зниження їх надійності. До таких відносяться випрямлячі з нульовими вентилями.

Першою з схем таких випрямлячів з'явилася схема з шунтуючим вентилем (ШВ), який підключається до виходу випрямляча, тобто паралельно навантаженню (рис.10.5). Він вступає в роботу під час переходу випрямленої напруги через нуль в область його негативних значень. В період роботи шунтуючого вентиля струм навантаження замикається через нього, а струм з мережі не споживається. Тривалість споживання випрямлячем струму з мережі скорочується на величину тривалості роботи ШВ, за рахунок чого поліпшується коефіцієнт потужності. І хоча при цьому коефіцієнт спотворення погіршується, в цілому досягається підвищення коефіцієнта потужності випрямляча. Проте ефективність ШВ в трифазному мостовому випрямлячі невелика, доцільніше його використання в однофазному мостовому випрямлячі (рис.10.6).

Шунтуючий вентиль, як випливає з його назви, тільки шунтує струм навантаження, не приймаючи участі в процесі випрямлення змінної напруги.

Ефективнішим є застосування в трифазному мостовому випрямлячі двох нульових вентилів, сполучених згідно послідовно і підключених до виходу випрямляча. Загальна їх крапка приєднується до нуля джерела живлення. Головна відмінність їх від ШВ полягає в тому, що кожен нульовий вентиль (НВ) бере участь у випрямленні змінної напруги при кутах керування $\alpha > 30^\circ$. З початком роботи нульових вентилів тривалість роботи кожного фазного вентиля (ФВ) випрямляча зменшується (рис.10.7).

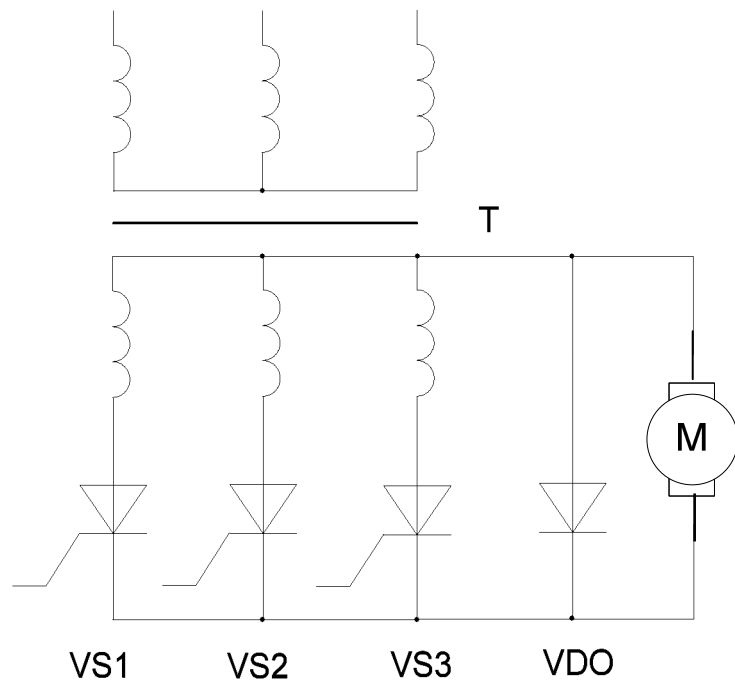


Рисунок 10.5 – Трифазна нульова схема з нульовим вентиляем

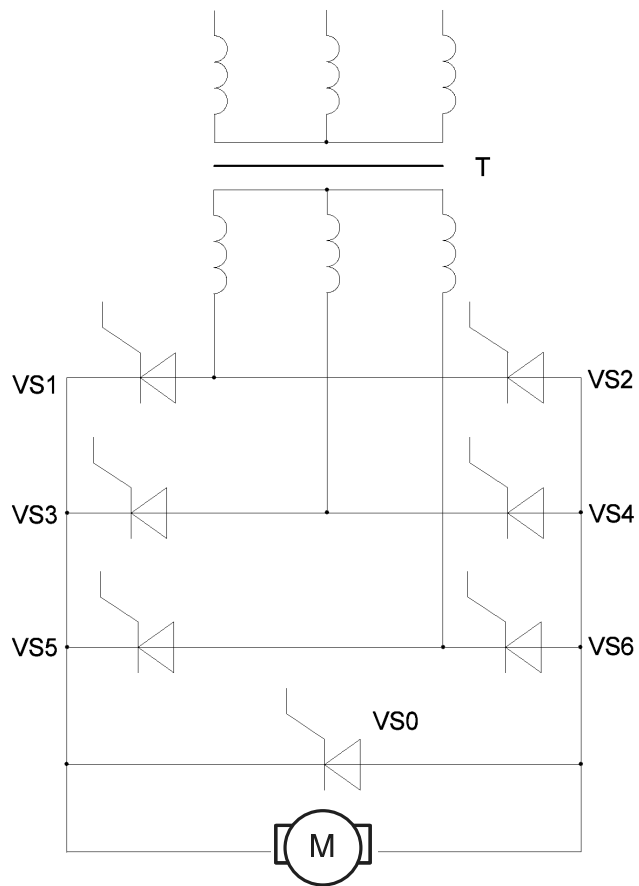


Рисунок 10.6 – Трифазна мостова схема з нульовим вентиляем

Спочатку нульові вентиля застосовувалися в схемах інверторів як автономних, так і відомих мережею, і лише потім почали використовуватися в схемах випрямлячів. Мабуть тому у випрямлячах протягом певного часу застосовувалися керовані нульові вентиля, які часто використовувалися спільно з конденсатором для штучної двоступінчатої комутації. Часто нульові вентиля грали допоміжну роль. Наприклад, в ртутних випрямлячах вони спільно з реактором виконували функцію обмеження струму зворотного запалення. Лише згодом в практику були введені некеровані нульові вентиля, що гранично спростило схеми випрямлячів, оскільки в цьому випадку відпала необхідність в СІФК для нульових вентилів.

Окрім трифазного мостового випрямляча нульові вентиля можуть використовуватися і в однофазному випрямлячі, а також в спеціальних багатофазних випрямлячах, наприклад, виконаних по шестифазній схемі із зрівняльним трифазним реактором. Випрямлячі з НВ можуть доповнюватися конденсаторами, що ще більш підвищує їх ефективність. Нарешті, за відсутності у джерела живлення нульової крапки, необхідної для підключення НВ, її можна створити штучно, зокрема, за допомогою підключених до мережі і сполучених в зірку конденсаторів. Застосування НВ в різних комбінаціях з одно- і трифазними конденсаторами відкриває широкі можливості поліпшення енергетичних показників керованих випрямлячів як в найпростішому — одно-мостовом, так і в багатомостовому виконань.

Значного ефекту можна досягнути застосуванням несиметричних мостових схем (рис.10.8), які дозволяють не тільки знизити споживання реактивної потужності, але і значно спростити силовий перетворювач заміною анодної або катодної групи керованих вентилів діодами з одночасним скороченням у два рази каналів керування.

Недоліками зазначеної схеми є відсутність переривання струму навантаження зняттям керуючих імпульсів з тиристорів.

З великого різноманіття випрямлячів з НВ нижче детально розглянуті їх основні схеми з некерованими нульовими вентилями.

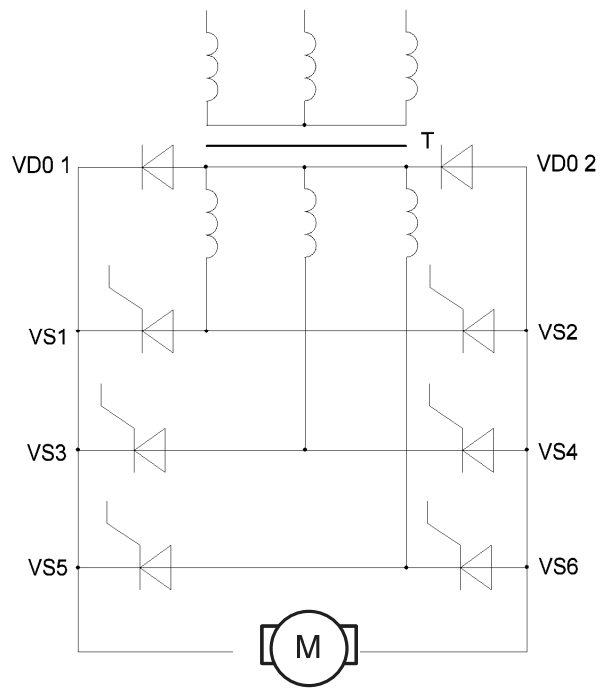


Рисунок 10.7 – Трифазна мостова схема збудника з двома нульовими діодами

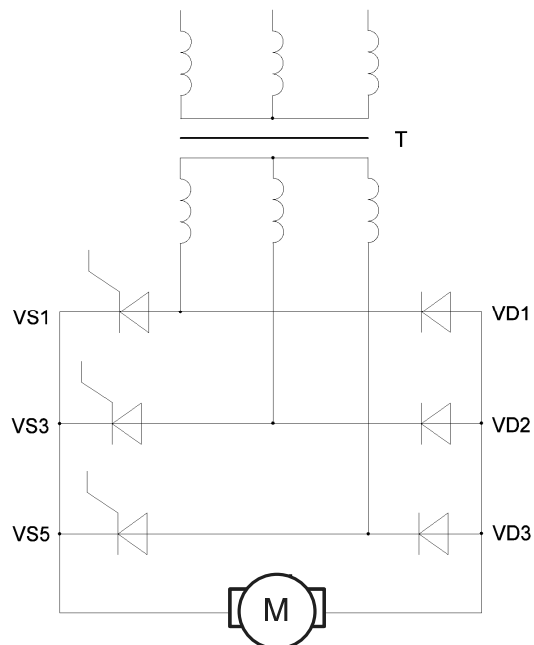


Рисунок 10.8 – Трифазна мостова напівкерована схема збудника

Контрольні питання до теми 10

1. Які силові схеми перетворювачів для поліпшення енергетичний показників існують?
2. Які використовуються закони керування вентилями для поліпшення енергетичних показників вентильних перетворювачів?
3. Яким чином працює силова схема перетворювача зі змінною структурою?
4. Призначення нульових вентилів в схемах вентильних перетворювачів.
5. Скільки тиристорів містить трифазна мостова несиметрична схема?
6. Визначте коефіцієнт спотворення для трифазної мостової схеми.
7. Призначення узгодженого трансформатора в нульових схемах вентильних перетворювачів.
8. Скільки тиристорів містить трифазна різнокерована мостова схема пететворювача?

ТЕМА 11

ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ І КОМПЛЕКСАХ

Загальна характеристика накопичувачів енергії

Під накопичувачем енергії розуміється пристрій, що дозволяє накопичувати енергію будь-якого виду протягом періоду заряду t_z , а потім передавати значну частину запасеної енергії навантаження протягом періоду розряду t_p . Взаємозв'язок параметрів накопичувача при заряді й розряді визначається законом збереження енергії [23]

$$p_z t_z \eta = p_p t_p, \quad (11.1)$$

де p_z й p_p – середні значення потужностей зарядного й розрядного процесів;

η - к.к.д. накопичувача.

Основне призначення накопичувачів енергії зводиться до акумулювання надлишкової енергії й наступному використанню запасеної енергії в періоди інтенсивного енергоспоживання. НЕ з малими часовими діапазонами робочих циклів можуть використовуватися для поліпшення показників енергосистем при змінному навантаженні споживачів і підвищувати стійкість роботи енергоустановок (наприклад, СД) і енергосистем. НЕ в цьому випадку є елементами, які демпфірують, між установками, що генерують, і споживачами, що працюють у нестационарних режимах.

Накопичувачі енергії у відповідних режимах забезпечують необхідні параметри енергії: при $t_p \ll t_z$, потужність $p_p \gg p_z$, тобто потужність, що віддається накопичувачем навантаженню в багато разів

перевищує потужність, споживану їм при заряді від первинного джерела енергії. Ємнісний накопичувач дозволяє виводити в навантаження струми, що перевищують у багато разів струм заряду, а в індуктивному накопичувачі можна одержувати напруги, що значно перевищують напруги джерела живлення. Порівняльні характеристики накопичувачів різних типів за даними [23] наведені у табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Характерні показники накопичувачів енергії

Накопичувач	Питома енергія, Дж/г	Час виводау енергії, с
Електрохімічні	$10^2 - 10^3$	$1 - 10^5$
Індуктивні	$1 - 10$	$10^{-3} - 10$
Ємнісні	$0,1 - 0,5$	$10^{-6} - 10^{-2}$
Механічні	$10 - 10^3$	$1 - 10^3$
Електромеханічні	$1 - 10$	$10^{-2} - 10$
Електродинамічні	$0,05 - 1$	$10^{-3} - 10^{-2}$

При заряді за час t_z у накопичувачі накопичується енергія:

$$W_H = 0,5C_H U_{CH}^2. \quad (11.2)$$

Від зарядного пристрою споживається середня потужність за час t_z :

$$P_{cp,z} = W_H t_z^{-1}. \quad (11.3)$$

При розряді за час $t_{p < t_z}$ в навантаженні виділяється корисна потужність:

$$P_H = W_H t_p^{-1} \eta_p, \quad (11.4)$$

де η_p – к.к.д. кола навантаження.

Між зарядом і розрядом у загальному випадку існує післязарядна пауза $t_{пз}$, а після розряду – післярозрядна пауза $t_{пр}$ [31]. Таким чином, період зарядно-розрядного циклу складає:

$$t_{ц} = t_z + t_p + t_{пз} + t_{пр}. \quad (11.5)$$

Зарядно-розрядні процеси характеризуються наступними основними параметрами [23]:

– передаваною в розрядний контур енергією

$$W_H = 0,5C_H (U_p - U_{co})^2, \quad (11.6)$$

де U_p , U_{co} – напруга на накопичувачі перед розрядом та остаточна напруга після розряду наприкінці попереднього циклу;

– миттєвою зорядною потужністю, що споживається накопичувачем

$$p_{CH}(t) = u_{cp}(t) \cdot i_3(t); \quad (11.7)$$

– к.к.д. зарядного контура

$$\eta_z = W_H / (W_H + W_{п}), \quad (11.8)$$

де $W_{п}$ – енергія втрат, що виділяється у накопичувачі, опорі зарядного кола і джерела електроживлення;

– к.к.д. розрядного контура

$$\eta_p = W_{pn} / W_n, \quad (11.9)$$

де W_{pn} – енергія, що виділяється у навантаженні у процесі розряду.

Залежно від призначення ЄНЕ зарядні пристрої виконуються на базі статичних перетворювачів і електромашинних генераторів постійного і змінного струму [23]. За характером споживання енергії з мережі розрізняють три основних типи пристроїв, що здійснюють заряд ЄНЕ [31]:

- зарядні пристрої з максимальною потужністю на початку зарядки (джерела з падаючою зовнішньою характеристикою);
- зарядні пристрої із зростаючою потужністю в процесі зарядки;
- зарядні пристрої з постійною зарядною потужністю.

Стосовно СД заряд ЄНЕ може проводитися за схемою багатонапівперіодної зарядки від напівпровідникового перетворювача, від джерела постійної напруги і від обмотки збудження в процесі асинхронного пуску.

Для більшості споживачів енергії найвигіднішими є процеси зарядки протягом часу, що значно перевищує час розрядки. Такі процеси можуть бути використані при зарядці ЄНЕ, призначеного для процесу гасіння поля і форсування збудження. Для споживачів, що характеризуються високою частотою зарядно-розрядних циклів, час, що відводиться на зарядку, обмежений у порівнянні з часом розряду. У таких випадках доцільно застосовувати схеми імпульсної зарядки, наприклад, схеми з нульовою початковою фазою вхідної напруги [31], у яких момент включення ЄНЕ в мережу синхронізований з моментом проходження напруги мережі через нуль при нульовій напрузі накопичувача. В цьому випадку зарядка ЄН через діод здійснюється до амплітуди напруги мережі за першу чверть періоду [31]

$$u_c = u_m \sin \omega t, \quad (11.10)$$

де ω – кутова частота напруги мережі.

Струм зарядки ЄН

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = U_m \omega C \cdot \cos \omega t, \quad (11.11)$$

де i_c – амплітуда струму.

Після досягнення напругою на ємності U_m , ця напруга зберігається незмінною із-за наявності вентиля до моменту розряду ємнісного накопичувача на навантаження, який проводить за час негативного напівперіоду напруги мережі.

При зарядці ЄНЕ від ОЗ СД в процесі асинхронного пуску е.р.с. визначається виразом

$$e_f = E_m s \cdot \sin st, \quad (11.12)$$

де s – ковзання.

У міру розгону СД відбувається зменшення амплітуди і частоти е.р.с. ОЗ, причому напруга на ЄН в процесі зарядки дорівнює е.р.с. ОЗ.

Електрохімічні акумулятори (ЕХА) запасують і віддають енергію в результаті хімічної реакції. До ЕХА належать електрохімічні генератори

(ЕХГ), тобто два чи більше паливних елементи ПЕ в комплексі із системами, що забезпечують їх функціонування; дані акумуляторні батареї АБ, тобто хімічні джерела струму, що складаються з двох чи більше акумуляторів, сполучених між собою електрично для спільного виробництва електроенергії.

Паливним елементом називається хімічне джерело струму, в якому активні речовини надходять до електродів ззовні; це прямий перетворювач хімічної енергії в електричну, у якому реакція електрохімічного окислювання протікає без витрати речовини електродів, а також без витрати електроліту. Вихідними реагентом служать компоненти хімічного палива - пальне й окислювач що володіють запасом енергії хімічних зв'язків, яка перетворюється в енергію постійного електричного струму. У регенераторному режимі роботи ПЕ підведена до нього електроенергія перетвориться в хімічну енергію компонентів палива.

Елемент АБ, чи електрохімічний акумулятор — хімічне джерело струму, що складається з одного гальванічного елемента, або акумулятор електричної енергії, у якому відбувається її перетворення в хімічну енергію. Також здійснюється зворотне перетворення хімічної енергії в електричну при зміні складу речовини електродів і витрати електроліту в процесі струмоутворюючої реакції.

Як і для інших видів акумуляторів енергії, для ЕХА основними режимами роботи є заряд і розряд. Проміжним служить режим збереження енергії, тривалість якого може бути набагато більшою, ніж в інших типів акумуляторів (порядку 10^4 год). Стосовно до ЕХА як зарядну потужність P_z приймають середню потужність, витрачену на одержання пального й окислювача, наприклад водню і кисню при електролізі води. Значення P_z для АБ визначається середньою потужністю, споживаною батареєю від джерела електроживлення за час заряду. Для ЕХА, виконаних на основі ПЕ чи акумуляторних елементів, розрядною потужністю P_p є електрична потужність, що надходить від акумулятора в коло навантаження.

В індуктивних акумуляторах енергія акумулюється у вигляді енергії магнітного поля. Акумулятор — це котушка з індуктивністю L , по якій тече струм, і завдяки чому створюється магнітне поле з енергією:

$$W = 0.5Li^2$$

Крім індуктивної котушки енергоустановка містить джерело живлення ЗП (зарядний пристрій), комутатори $K1$ і $K2$, навантаження H , (рис. 11.1 а).

При підмиканні акумулятора до живлення за допомогою $K1$ здійснюється режим заряду протягом часу t_z (рис.11.1 б). При замиканні $K2$ і розмиканні $K1$ струм тече через навантаження, й основна частина накопиченої енергії передається навантаженню упродовж часу розряду t_p . Звичайно реалізуються режими з $t_p < t_z$, завдяки чому потужність акумулятора при розряді істотно більша потужності зарядного циклу. Тому індуктивний акумулятор може використовуватися як трансформатор потужності - він забезпечує короткочасне живлення потужних споживачів

електроенергії при розряді після відносно тривалого періоду запасання енергії при заряді.

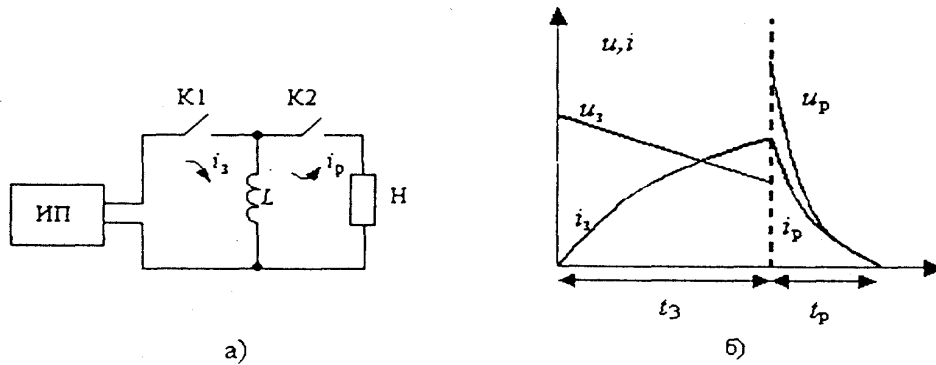


Рисунок 11.1 – Схема та діаграма режим заряду індуктивних акумуляторів

Особливість індуктивного акумулятора полягає також у тому, що в момент замикання К2 і розмикання К1 він може розглядатися як джерело струму, оскільки при перемиканні акумулятора на активне навантаження струм у ньому повинен зберігатися безперервним незалежно від структури зовнішнього кола. Якщо опір кола навантаження великий, то завдяки сталості струму в момент перемикання напруга на затискачах акумулятора досягає великих значень, що багаторазово перевищують напругу джерела живлення, яке заряджає акумулятор. Таким чином, за допомогою індуктивних акумуляторів можна забезпечити перетворення електричної енергії з істотним перевищенням потужності і напруги.

Ємнісні акумулятори запасують енергію електричного поля. Режим роботи акумулятора пояснюється функціональною схемою (рис. 11.2).

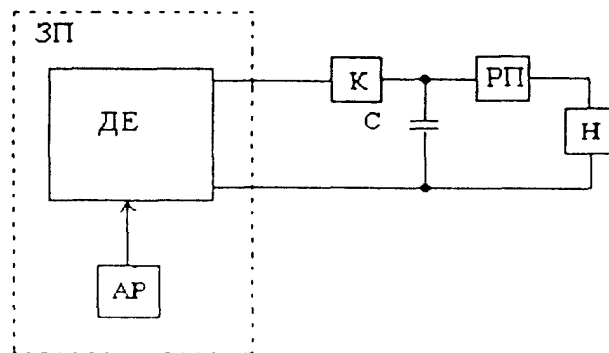


Рисунок 11.2 – Функціональна схема режиму роботи акумулятора

Джерело електроживлення ДЕ з автоматичним регулятором АР складають зарядний пристрій ЗП ємнісного акумулятора. Джерело живлення може бути як постійного, так і змінного струму у вигляді електромашинних генераторів чи статичних пристроїв. При замиканні комутатора зарядного кола К і розімкненому комутаторі розрядного пристрою РП заряджається

батарея конденсаторів C , у якій за час зарядного процесу t_3 накопичується енергія:

$$W_n = 0.5u_c^2(t)C$$

Від джерела живлення за час t_3 споживається середня потужність $P_{cp3} = W_n t_3^{-1}$. Розряд відбувається за час

$t_p \ll t_3$ при замиканні розрядного пристрою. У навантаженні виділяється розрядна потужність

$P_p = W_n t_p^{-1} \eta_p$, де η_p - ККД розрядного контуру. При $t_p \ll t_3$ на інтервалі часу розряду відбувається багаторазове збільшення потужності відносно середньої, споживаної від джерела живлення на інтервалі часу зарядного процесу t_3 . Замикання розрядного пристрою може відбуватися як при розімкненому, так і при замкненому комутаторі.

Індуктивні і ємнісні акумулятори енергії застосовуються в силових схемах статичних перетворювачів електропривода як пристрої штучної комутації вентилів, різних фільтрів тощо.

Механічний акумулятор призначений для запасання і збереження кінетичної чи потенційної енергії з наступною віддачею її для здійснення корисної роботи. Характерними режимами роботи акумулятора є заряд (накопичення) і розряд (віддача енергії). Збереження енергії є проміжним режимом. У зарядному режимі до акумулятора підводиться механічна енергія від зовнішнього джерела. При розряді основна частина накопиченої акумулятором енергії передається споживачу. Деяка частина накопиченої енергії витрачається на компенсацію втрат, що мають місце в розрядному режимі й у режимах збереження.

Оскільки в ряді акумулюючих установок час заряду може набагато перевищувати час розряду ($t_p \ll t_3$), то можливе істотне перевищення середньорозрядної потужності P_p над середньою потужністю P_3 заряду. Таким чином, у механічних акумуляторах накопичувати енергію можливо за допомогою відносно малопотужних джерел. Основні різновиди механічних акумуляторів підрозділяються на статичні, динамічні і комбіновані пристрої.

Статичні акумулятори накопичують потенційну енергію за допомогою пружної зміни форми або об'єму робочого тіла, чи при його переміщенні проти напрямку сили ваги в гравітаційному полі. Тверде, рідке чи газоподібне робоче тіло цих акумуляторів має статичний стан у режимі збереження енергії, а заряд і розряд супроводжуються рухом робочого тіла.

Динамічні акумулятори нагромаджують кінетичну енергію переважно в обертових масах твердих тіл. До динамічного можна віднести також накопичувальні пристрої прискорювачів заряджених елементарних часток, у яких запасується кінетична енергія електронів чи протонів, що циклічно рухаються по замкнутих траєкторіях.

Комбіновані акумулятори запасують одночасно кінетичну і потенціальну енергію. Прикладом комбінованого акумулятора служить маховик з високоміцного волокнистого матеріалу, що має відносно малий модуль пружності. При обертанні маховика в ньому поряд з кінетичною

енергією запасасться потенційна енергія пружної деформації. Під час витягу накопиченої енергії з такого акумулятора досягається використання обох її видів.

За рівнем питомої накопиченої енергії, що приходить на одиницю маси чи об'єму акумулюючого елемента, динамічні інерційні акумулятори істотно перевершують індуктивні і ємнісні.

Для інерційних механічних акумуляторів характерні короткочасні розрядні режими. Відбір енергії від акумулятора супроводжується зменшенням кутової швидкості маховика до припустимого рівня. В окремих випадках гальмування може відбуватися аж до повної зупинки маховика. Можливі «ударні» розряди, що відрізняються одноразовим чи циклічним відбором акумульованої енергії, причому внаслідок великого кінетичного моменту і малого часу розряду зниження кутової швидкості ротора відносно невелике, хоча потужність, що віддається, може досягати високих значень. Під впливом моменту, що крутить, у валі виникають небезпечні дотичні напруження, частина кінетичної енергії ротора переходить у потенційну енергію пружних деформацій крутіння вала. Для подолання цих явищ в окремих конструкціях передбачаються пружні чи фрикційні муфти.

Статичні механічні акумулятори зберігають запасену енергію, знаходячись у нерухомому стані. Носіями потенційної енергії в них служать пружно деформовані тверді тіла чи стиснуті гази, що знаходяться під надлишковим тиском, а також маси, підняті на деяку висоту відносно земної поверхні. Типовими прикладами статичних носіїв є: розтягнуті чи стиснуті пружини, гуми; акумулятори і пневмоакумулятори; ударні пристрої копрів для забивання паль, що використовують енергію мас у піднятому стані; водоймища гідроакумулюючих електростанцій, баки водонапірних установок.

Електромеханічний акумулятор служить для запасання і збереження механічної енергії з наступним її перетворенням і віддачею у формі електричної енергії для подальшого використання. Запасасться, як правило, кінетична енергія обертального руху маховика, що при заряді акумулятора розкручується за допомогою механічного чи електричного привода: пружини; турбіни, що використовує енергію стиснутих газів, згоряння палива чи порохового заряду тощо; електричної машини, що працює в режимі двигуна. В електромеханічних пристроях може бути відсутнім маховик як самостійний елемент, з'єднаний за допомогою твердого чи пружного зв'язку з електричною машиною. У цьому випадку інерційним накопичувальним елементом служить ротор електричної машини. Ротор може бути конструктивно сполучений з додатковим маховиком. При розряді акумулятора механічна енергія перетвориться в електричну за допомогою електричної машини, що працює в режимі генератора. Як генератор застосовується та ж машина, що служить електродвигуном для розгону маховика, чи інша, також установлена на валу акумулятора.

Для електричного акумулятора справедливе рівняння енергетичного балансу, відповідно до якого акумулятор можна розглядати як підсилювач

електричної потужності. При заряджанні акумулятора двигун споживає відносно невелику усереднену потужність P_3 від джерела живлення протягом часу t_3 . У режимі розряду генератор віддає усереднену потужність $P_p > P_3$ за час $t_p < t_3$.

Залежно від виду і призначення акумулятора до його складу входять різні електричні машини. Відповідно до загальної класифікації можна виділити акумулятори на основі машин змінного струму (синхронних чи асинхронних) і машин постійного струму.

Структурна схема електроенергетичної установки з електромеханічним акумулятором зображена на рис. 11.3.

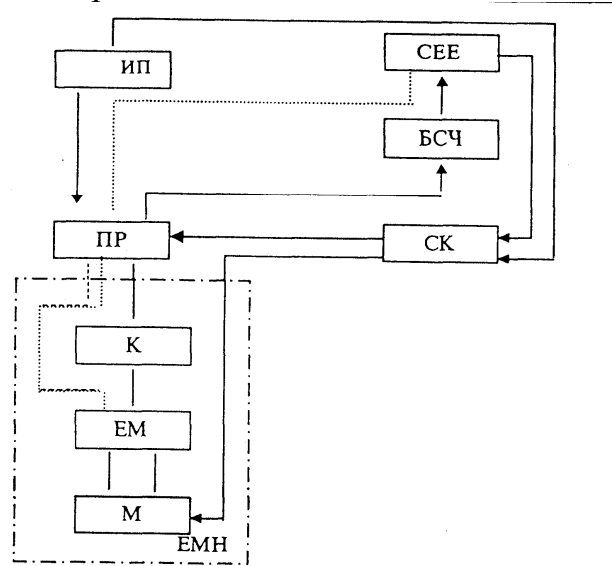


Рисунок 11.3 – Структурна схема електроенергетичної установки з електромеханічним акумулятором

У режимі заряду електрична машина працює як двигун, одержуючи електроенергію від джерела живлення (постійний чи змінний струм), і розкручує маховик М. Після досягнення ротором агрегату заданої швидкості акумулятор може працювати в режимі збереження енергії. За сигналом системи керування СК спрацьовує перемикач режимів ПР, і акумулятор переводиться в розрядний режим, у якому електрична машина працює як генератор і живить споживач електроенергії СБЕ. Наявність оборотного комутатора К характерна для акумулятора з двигуном постійного струму. У машинах класичної конструкції комутатор виконаний як електромеханічний щітково-колекторний вузол електричної машини, а в безконтактних вентильних - це керований напівпровідниковий перетворювач. Останній діє як інвертор при роботі електричної машини в режимі двигуна і як випрямляч при генераторному режимі роботи. Коли як двигун генератора використовується машина змінного струму, то комутатор може бути відсутнім (цьому випадку відповідає штрихова лінія зв'язку на схемі). Для такого варіанта характерний блок стабілізації частоти БСЧ, що виключається в установках постійного струму. Установки з електромеханічними акумуляторами можуть містити деякі додаткові елементи, наприклад, пускові пристрої

електродвигунів, блоки для стабілізації і регулювання частоти і напруги генераторів. У цілому вибір структури акумулятора і типу машини визначається технічними вимогами до установки щодо номінальних параметрів, швидкодії, показників якості електроенергії, особливостей зарядно-розрядних режимів, масогабаритних обмежень, ресурсу, апаратурної надійності.

Для мобільної техніки практично єдиною альтернативою застосуванню електрохімічних акумуляторів може вважатися інерційне акумулювання енергії. Гіросистеми мають кращі технологічні показники (питому потужність, термін служби, надійність), а також екологічно більш чисті, ніж свинцево-кислотні акумулятори.

Несприятливі економічні показники гіросистем обумовлені малим поширенням супермаховиків, оскільки не відпрацьовані технології серійного їх виробництва.

Відомі приклади застосування гіросистем. Наприклад, для роботи у вибухонебезпечних умовах вугільних шахт Дружковський завод у Донбасі випускає гіролокомотиви. У країні розроблений і випробуваний кар'єрний електровоз-самоскид вантажопідйомністю 25 т і повною масою 55 т. Для забезпечення вільного маневрування, коли застосування повітряної контактної мережі неприпустиме, він оснащений гідроприводом, що забезпечує автономний пробіг до 400 м.

За рубежом (США) випробуваний легковий автомобіль, обладнаний тільки гіродвигуном із пробігом до 55 км. Останні моделі гіротролейбусів мають пробіг до 15 км.

Електродинамічні акумулятори в загальному випадку містять акумулятор кінетичної енергії й електромеханічний генератор. Вони поєднують у собі переваги механічних акумуляторів енергії, зв'язані з високою густиною енергії, що запасується, при малих втратах на її утримання, і електромеханічних генераторів, що відрізняються високим ККД процесу перетворення механічної енергії в електричну. Конструктивно ці два вузли сполучають в одне ціле, і тоді рухлива частина пристрою є акумулятором кінетичної енергії і ротором електромеханічного генератора. Створені на базі ударних генераторів синхронного типу електродинамічні акумулятори одержали розвиток завдяки здатності генерувати періодичний односпрямований струм без додаткового перетворення електроенергії.

Електромеханічні акумулятори поєднують у собі різні типи однофазних і багатофазних генераторів, дія яких заснована на циклічному стисканні (компресії) магнітного потоку рухомими один відносно одного замкнутими контурами зі струмом. У них перетворення механічної енергії ротора в електромагнітну енергію стиснутого поля відбувається одночасно з виділенням частини енергії в навантаженні.

Розрізняють електродинамічні акумулятори лінійного й обертального руху (рис. 11.4), хоча немає принципових обмежень на форму траєкторії руху ротора.

У типовому випадку пристрій містить дві однофазні обмотки, розташовані на статорі 1 і роторі 2 відповідно. Магнітний потік збудження створюється обмоткою статора чи ротора, або обома обмотками одночасно. Кожна з обмоток має потокозчеплення:

$$\psi_{1,2} = w_{1,2}\Phi_{1,2}$$

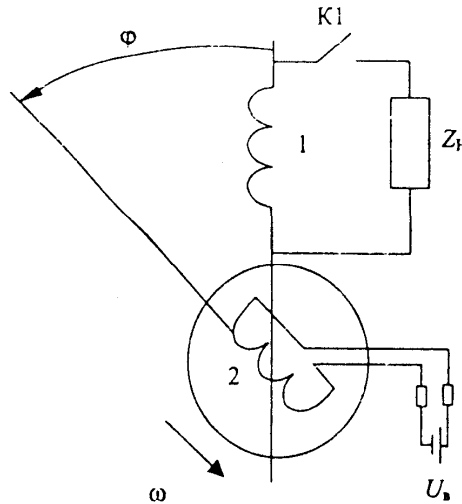


Рисунок 11.4 – Схема електродинамічних акумуляторів лінійного й обертального руху

де: w_1 і w_2 — ефективне число витків в обмотці статора і ротора; $\Phi_{1,2}$ - магнітний потік, зчеплений з обмоткою статора і ротора. У процесі взаємного переміщення обмоток у загальному випадку змінюються величина і напрямки потоків $\Phi_{1,2}$. Відповідно до закону Ленца це призведе до виникнення чи зміни вже протікаючих в обмотках струмів i_1 та i_2 за умови замикання обмоток на навантаження чи накоротко. Струми прагнуть зберегти потокозчеплення обмоток незмінним. Протікання струму по навантаженню пов'язане з виділенням у ньому енергії.

Контрольні питання до теми 11

1. Перелічіть види накопичувачів енергії.
2. Наведіть приклад застосування електрохімічних акумуляторів енергії.
3. Наведіть приклад застосування індуктивних накопичувачів енергії.
4. Наведіть приклад використання механічних акумуляторів енергії.
5. Наведіть приклад застосування ємнісних накопичувачів енергії.

ТЕМА 12 С

РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЯК ЗАСІБ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Компенсація реактивної потужності, або підвищення коефіцієнта потужності електроустановок промислових підприємств, має велике народногосподарське значення і є частиною загальної проблеми підвищення ККД роботи систем електропостачання й поліпшення якості електроенергії, що відпускає споживачеві. Підвищення коефіцієнта потужності на 0,01 у масштабі країни дає можливість додаткової корисної відпустки електроенергії в 500 млн. кВт·год у рік. Споживачі електроенергії, наприклад асинхронні двигуни, для нормальної роботи потребують як активної, так і реактивної потужностей, які виробляються, як правило, синхронними генераторами й передаються по системі електропостачання трифазного змінного струму від електростанції до споживачів.

У процесі передачі споживачам активної (P) і реактивної (Q) потужностей у провідниках системи електропостачання створюються втрати активної потужності:

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_p,$$

де ΔP_a й ΔP_p — втрати на передачу активної й реактивної потужностей.

З огляду на, що коефіцієнт потужності $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$

визначаємо

$$P^2 + Q^2 = \frac{P^2}{\cos^2 \varphi}$$

Підставляючи відповідні значення, знаходимо

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_p = \frac{P^2 R}{(U^2 \cos^2 \varphi)}$$

Отже, втрати активної потужності обернено пропорційні квадрату коефіцієнта потужності. Цим підтверджується значення величини коефіцієнта потужності при передачі електроенергії від джерел живлення до споживачів.

З наведеного співвідношення витікає, що при зниженні переданої реактивної потужності Q втрата активної потужності в мережі знижується від величини ΔP_1 до величини ΔP_2 , що досягається застосуванням пристроїв, що компенсують (табл.12.1). Отримане при цьому питома зниження втрат активної потужності $\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2$ (кВт) стосовно переданої реактивної потужності Q (кВАр) називається *коефіцієнтом зниження втрат* або економічним еквівалентом $k_{\text{ек}}$. Останній становить 0,02—0,12 кВт/кВАр і залежить від $\cos \varphi$, схеми електропостачання підприємства і його віддаленості від джерела живлення.

Таблиця 12.1 –

Компенсуючий пристрій	Питомі втрати, кВт/кВАр
Статичні конденсатори напругою: ПРО 22-0,5 кВ	0,004
3-10 кВ	0,003
Синхронні компенсатори потужністю 7,5-1,5 мВА	0,027-0,023
Синхронні генератори й синхронні двигуни потужністю 500-5000 кВА, використовувані як компенсатори	0,05-0,10
Те ж, потужністю менше 500 кВА, тихохідні	0,10-0,15
Синхронні генератори, використовувані як компенсатори без розчіплювання з первинним двигуном	0,25-0,30

Реактивна потужність, споживана промисловими підприємствами, розподіляється між окремими видами електроспоживачів у такий спосіб: 65-70% доводиться на асинхронні двигуни, 20-25% - на трансформатори й близько 10% - на повітряні електричні мережі й інші електроспоживачі (люмінесцентні лампи, реактори, індуктивні прилади й т.п.).

Збільшення споживання реактивної потужності електроустановкою викликає ріст струму в провідниках будь-якої ланки системи електропостачання й зниження величини коефіцієнта потужності електроустановки.

Підвищення коефіцієнта потужності електроустановки залежить від зниження споживання реактивної потужності. При зниженні споживання реактивної потужності Q до значення $(Q - Q_K)$, де Q_K — потужність пристрою, що компенсує, значення кута φ_1 також зменшується до φ_2 , а отже, коефіцієнт потужності збільшується із $\cos\varphi_1$ електроспоживачів 1 до $\cos\varphi_2$.

Використання пристроїв, що компенсують реактивну потужність, трохи здорожує експлуатацію електричних установок. Крім того, у них створюються деякі додаткові втрати активної потужності ΔP_K , які, однак, значно менше втрат активної потужності ΔP .

Підвищення коефіцієнта потужності, або зменшення споживання реактивної потужності елементами системи електропостачання, знижує втрати активної потужності й підвищує напруга. На тих ділянках, де споживання реактивної потужності елементами системи електропостачання збільшується, втрати активної потужності теж збільшуються, а напруга знижується. На тих ділянках, де споживання реактивної потужності зменшується, збільшується, крім того, пропускна здатність елементів

системи електропостачання, а при проектуванні нових ліній створюється можливість застосування проводів менших перетинів при передачі тієї ж активної потужності.

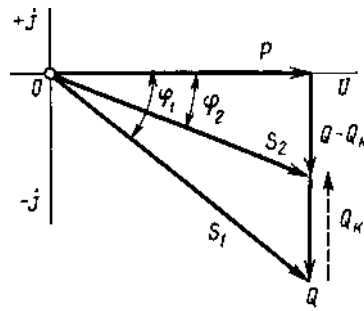


Рисунок 12.1 – Діаграма роботи компенсуючого пристрою

Додаткові втрати активної потужності в пристроях, що *компенсують* ΔP_K характеризують економічність виробітку реактивної потужності й доцільність їхньої установки. Ці додаткові втрати активної потужності для різних пристроїв, що компенсують, різні й можуть бути охарактеризовані питомою втратою активної потужності на компенсацію.

Любий елемент електричної мережі, у якій струм випереджає напругу, є генератором реактивної потужності. Тому крім синхронних машин (генераторів і двигунів), що працюють із перебудженням, джерелами реактивної потужності (ДРП) є також і лінії електропередачі (повітряні й кабельні).

Кабельні лінії на 10 кВ перетином 70—150 мм² мають реактивну ємнісну потужність 10—15 кВАр/км, а повітряні дволанцюгові ЛЕП на 110 кВ із проводами АС-150, підвішеними на відстані між ними 3—5 м, потужністю 3,8—3,6 мВАр/100 км. Зазначені реактивні ємнісні потужності повинні враховуватися при розрахунках ліній вище 1000 В.

Значення коефіцієнта потужності. Поточний коефіцієнт потужності в кожний момент часу

$$\cos \varphi_i = \frac{P_i}{S_i} = \frac{P_i}{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}},$$

де P_i , S_i і Q_i – відповідно активні, уявленій й реактивна потужності в момент часу t_i , кВт, кВА, кВАр.

Активні й реактивні потужності підприємств змінюються не тільки протягом тривалих проміжків часу (добы, місяця), але й протягом однієї виробничої зміни.

Значення коефіцієнта потужності в момент часу t_i найбільше точно визначається по фазометрі. При відсутності фазометра $\cos \varphi$ визначається одним з наступних способів:

1) двома трифазними ватметрами або одним ватметром з перемикачем вимірюються в деякий момент часу P і Q і визначається значення $\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{Q}{P}$, потім по $\operatorname{tg} \varphi_i$ перебуває в таблицях відповідний йому $\cos \varphi_i$;

2) двома ватметрами вимірюється активна потужність P_1 і P_2 і

визначається

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{(P_1 - P_2)}{\left[\sqrt{3}(P_1 + P_2) \right]}$$

де P_1 і P_2 — показання ватметра для фаз A і C відповідно;

3) амперметром, вольтметром і трифазним ваттметром вимірюються струм, напруга й активна потужність. Потім знаходять

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{(\sqrt{3}UI)},$$

де I , U і P — відповідно діючі значення струму, напруги й потужності, одночасно обумовлені по приладах, А, кВ, кВт.

Середньозважений коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{срв}}$ визначають за показниками лічильників активної W_a й реактивної W_p енергії за певний проміжок часу для діючих підприємств:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{срв}} = \frac{W_p}{W_a}; \quad (12.1)$$

$$\cos \varphi_{\text{срв}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_p}{W_a} \right)^2}}, \quad (12.2)$$

Оптимальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ відповідають оптимальному $\operatorname{tg} \varphi_{\text{срв}} = \frac{Q_3}{P_M}$, де P_M і Q_3 — активна й реактивна потужності.

Засоби компенсації реактивної потужності

Заходи, які проведені по компенсації реактивної потужності експлуатованих або проєктованих електроустановок споживачів, можуть бути розділені на наступні три групи: не потребуючі застосування пристроїв, що компенсують; пов'язані із застосуванням пристроїв, що допускають у вигляді виключення.

Останні два заходи повинні обґрунтовуватися техніко-економічними розрахунками й застосовуватися при узгодженні енергосистемою.

Заходи, що не вимагають застосування пристроїв, що компенсують:

1) упорядкування технологічного процесу, що веде до у поліпшенню енергетичного режиму устаткування, а отже, до підвищення коефіцієнта потужності;

2) перемикання статорних обмоток асинхронних двигунів напругою до 1000 В с трикутника на зірку, якщо їхнє навантаження становить менш 40%;

3) усунення режиму роботи асинхронних двигунів без завантаження (холостого ходу) шляхом установки обмежників холостого ходу;

4) заміна, перестановка й відключення трансформаторів, що завантажують у середньому менше чим на 30% від їхньої номінальної потужності;

5) заміна малонавантажених двигунів меншої потужності за умови, що вилучення надлишкової потужності спричиняє зменшення сумарних втрат

активної енергії в енергосистемі й двигуні;

б) заміна асинхронних двигунів синхронними двигунами тієї ж потужності, де це можливо по техніко-економічних міркуваннях;

7) застосування синхронних двигунів для всіх нових установок електропривода, де це прийнятно по техніко-економічних міркуваннях:

Заходу, пов'язані із застосуванням пристроїв, що компенсують:

1) установка статичних конденсаторів;

2) використання синхронних двигунів як компенсатори.

Заходу щодо підвищення коефіцієнта потужності, що допускають у вигляді виключення:

1) використання наявних на підприємствах синхронних генераторів як синхронні компенсатори;

2) синхронізація асинхронних двигунів, причому вона допускається при навантаженні на валу не вище 70% від номінальної потужності й відповідному техніко-економічному обґрунтуванні.

При живленні постійним струмом фазний ротор втягується в синхронізм і може працювати з випереджальним коефіцієнтом потужності, здобуваючи властивості, подібні із властивостями синхронного двигуна, але зі значно меншою перевантажувальною здатністю.

Синхронізацію асинхронних двигунів з фазним ротором застосовують тільки для двигунів, що вже перебувають в експлуатації.

Особливості деяких компенсуючих пристроїв. У порівнянні з асинхронними синхронні двигуни мають наступні переваги:

а) можливість використання як компенсуючих пристрої при порівняно невеликих додаткових первісних витратах, оскільки при роботі з випереджальним коефіцієнтом потужності повна потужність синхронного двигуна $S_{\text{ном.сн}}$ визначальна його вартість, росте в набагато меншому ступені, чим його здатність, що компенсує:

Номінальний коефіцієнт $\cos\varphi$	1,0	0,9	0,85	0,8
Повна потужність $S_{\text{ном.сн}}$, %	0	11	17	25
здатність, Що Компенсує				
$(Q_{\text{дв.сн}}/P_{\text{ном.сн}}) 100\%$	0	48	62	75

б) економічність виготовлення на невелике число обертів; при цьому відпадає необхідність у проміжних передачах між двигуном і робочою машиною;

в) меншу залежність обертаючого моменту від коливань напруги: у синхронного двигуна момент пропорційний напрузі в першому ступені, а в асинхронного — у другому ступені;

г) більше високу продуктивність робочого агрегату при синхронному електроприводі, оскільки швидкість двигуна не залежить від навантаження;

д) менші втрати активної потужності, тому що ККД синхронних двигунів вище, ніж КПД асинхронних двигунів.

Компенсуюча здатність, двигуна визначається навантаженням на його валу, напругою, підведеною до затискачів двигуна, і струмом збудження. Зі

зменшенням струму порушення нижче номінального здатність, що компенсує, двигуна знижується.

Звичайно в практичних умовах навантаження синхронних двигунів на валу становить 50—100% від номінальної. При таких навантаженні, а також при регулюванні напруги, підведеної до електродвигуна, можна використати електроприводи із синхронними двигунами як компенсатори реактивної потужності при роботі їх з випереджальним коефіцієнтом потужності. Наприклад, для електродвигуна типу СДН-18-24-40 ($P_{ном.с}=615$ кВт, $n=150$ об/хв) при коефіцієнті навантаження $k_n = 0,8$ і $U_{ном} = 6$ кВ здатність, що компенсує, становила 1,27; при $U=0,95U_{ном}$ здатність, що компенсує, збільшувалася до 1,40, а при $k = 0,7$ вона підвищилася до 1,45.

Синхронний двигун, що працює в режимі холостого ходу, тобто без механічного навантаження на валу, являє собою синхронний компенсатор. Це дозволяє виготовляти спеціальні синхронні компенсатори з меншим повітряним зазором і полегшеним валом у порівнянні зі звичайними синхронними двигунами.

При перезбудження синхронний компенсатор генерує випереджальну реактивну потужність, а при недозбудження споживає відстаючу реактивну потужність. Це властивість синхронних компенсаторів використовується для регулювання реактивної потужності й підвищення коефіцієнта потужності й для регулювання напруги в електричних мережах. Переваги синхронних компенсаторів: плавне й автоматичне регулювання реактивної потужності й напруги у великому діапазоні, що забезпечує збільшення статичної й динамічної стійкості в енергетичній системі, а також висока надійність її роботи.

Недоліки синхронних компенсаторів: відносно висока вартість, а отже, і високі питомі капітальні витрати на компенсацію (12,5 руб/кВАр); питома витрата активної потужності на компенсацію (0,027 кВт/кВАр), що значно більше в порівнянні зі статичними конденсаторами (0,003 кВт/кВАр); більша займана виробнича площа й шум, вироблений при роботі.

Зазначені особливості синхронних компенсаторів, а також можливість їхнього пуску від джерел живлення великої потужності обмежують їхнє застосування тільки на підстанціях енергетичних систем.

Статичні конденсатори виготовляють із певного числа секцій, які залежно від робочої напруги й розрахункової величини реактивної потужності з'єднують між собою паралельно, послідовно або паралельно-послідовно.

Компенсацію реактивної потужності електроустановок промислових підприємств здійснюють за допомогою статичних конденсаторів, що включають звичайно паралельно електроспоживачі (поперечна компенсація). В окремих випадках при різко змінному навантаженні мереж, наприклад при живленні дугових печей, зварювальних установок і ін., може виявитися доцільним послідовне включення конденсаторів (поздовжня компенсація).

Розміщення конденсаторів у мережах напругою до 1000 В и вище повинне задовольняти умові найбільшого зниження втрат активної потужності від реактивних навантажень. При цьому можлива компенсація:

1) індивідуальна - з розміщенням конденсаторів безпосередньо в струмоприймача. У цьому випадку від реактивних струмів розвантажується вся мережа системи електропостачання (мережі зовнішнього й внутрішнього електропостачання й розподільні мережі до струмоприймачів). Однак недоліком такого розміщення є неповне використання великої встановленої потужності конденсаторів, розміщених у струмоприймачів;

2) групова - з розміщенням конденсаторів у силових шафах і шинопроводів у цехах. У цьому випадку розподільна мережа до струмоприймачів не розвантажується від реактивних струмів, але значно збільшується час використання батареї конденсаторів у порівнянні з індивідуальною компенсацією:

3) централізована - з підключенням батареї на шини 0,38 і на шини 6-10 кВт підстанції.

У першому випадку від реактивних струмів розвантажуються трансформатори підстанції, що тоді як харчує й розподільна мережі нижчої напруги від реактивних струмів не розвантажуються. У другому випадку від реактивних струмів розвантажуються тільки мережі енергосистеми, а трансформатори підстанцій не розвантажуються.

Конденсатори напругою 6-10 кВ варто встановлювати на цехових підстанціях, що мають розподільні пристрої напругою 6-10 кВ, на розподільних пунктах і, як виключення, на ЦРП або ГПП. На безшинних цехових підстанціях батареї конденсаторів 6-10 кВ встановлювати не рекомендується. Потужність розглянутих батарей конденсаторів не повинна бути менш 400 кВАр при приєднанні конденсаторів через окремих вимикач і не менш 100 кВАр при приєднанні конденсаторів через загальний вимикач із силовим трансформатором, асинхронним двигуном і іншими електроспоживачами.

Схеми приєднання конденсаторних установок

У залежності від призначення, напруги і потужності конденсаторної батареї схеми з'єднання конденсаторних пристроїв виконують одно- та трифазними з паралельним чи паралельно-послідовним з'єднанням конденсаторів.

В освітлювальних і силових мережах напругою 220 і 380 В застосовують головним чином трифазні конденсаторні пристрої з паралельним з'єднанням конденсаторів, що з'єднанні за схемою трикутника.

В освітлювальних мережах трифазні БК зазвичай підключають безпосередньо (без вимикача) до групових шин цих мереж після вимикача.

У силових мережах трифазні БК можуть підключатися до шин розподільчих щитів загальним вимикачем (з електроприймачем) або окремим вимикачем.

Підключення трифазних БК на напругу 380 В приведено на рис.12.2,а-в, де вказані можливі варіанти установки захисної та комутаційної апаратури (автоматичний) вимикач АВ, рубильник Р із запобіжником П, запобіжник П з контактором КТ або магнітним пускачем).

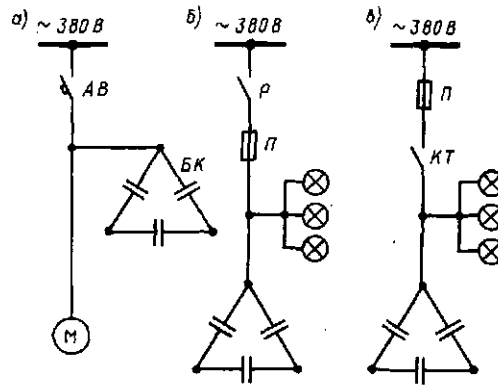


Рисунок 12.2 – Приєднання конденсаторів до шин на напругу 380 В

При необхідності комплектування конденсаторної установки напругою 380 В великої потужності застосовують секціонування схеми, що складається з декількох окремих конденсаторних установок, які через окремий вимикач підключають до шин розподільчого щита.

З'єднання однофазних БК напругою 3-10 кВ у трикутник наведено на рис.12.3. У цій схемі номінальна напруга конденсаторів відповідає номінальній напрузі мережі. В якості високовольтної комутаційної апаратури на рис.3 вказані: а – роз'єднувач Р і вимикач В; б – високовольтні запобіжники ПК.

У схемах конденсаторних батарей передбачають спеціальні активні або індуктивні резистори, які підключають паралельно конденсаторам. Ці резистори необхідні для розряду конденсаторів після їх відключення, оскільки природний саморозряд здійснюється повільно.

Розряд конденсаторних батарей повинен здійснюватись автоматично після кожного відключення батареї від мережі. Тому до неї повинні бути

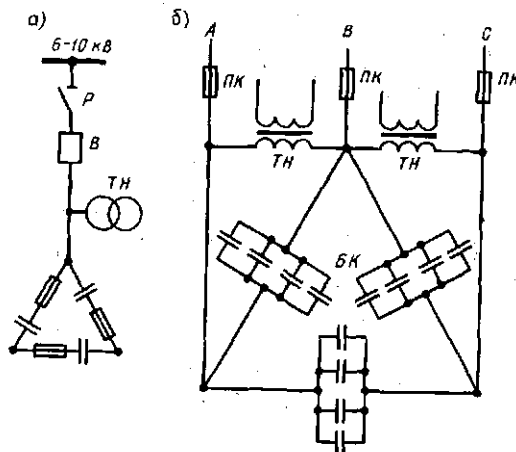


Рисунок 12.3 – Приєднання конденсаторів до шин на напругу 6-10 кВ

постійно і безпосередньо (без проміжних роз'єднувачів, рубильників і запобіжників) підключений спеціальний розрядний опір, наприклад, опір трансформатора напруги ТН до батареї напругою вище 1000 В чи омичний опір СР до батареї напругою до 1000 В (рис.12.4, а,б).

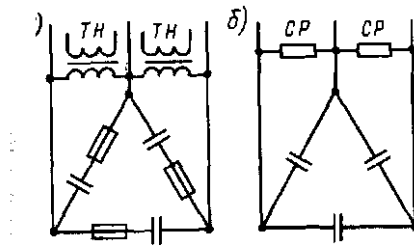


Рисунок 12.4 – Схеми вмикання розрядних опорів

Відмикання батареї конденсаторної БК і опорів розрядних СР (чи ЛР) у комплектних конденсаторних установка (ККУ) приводиться автоматом А та його блок-контактами (рис.12.5).

Після відключення конденсаторної батареї виникає розряд її на опір за 3-5 хв., тобто за час, який необхідний для отримання на батареї допустимої залишкової напруги не більше 50 В.

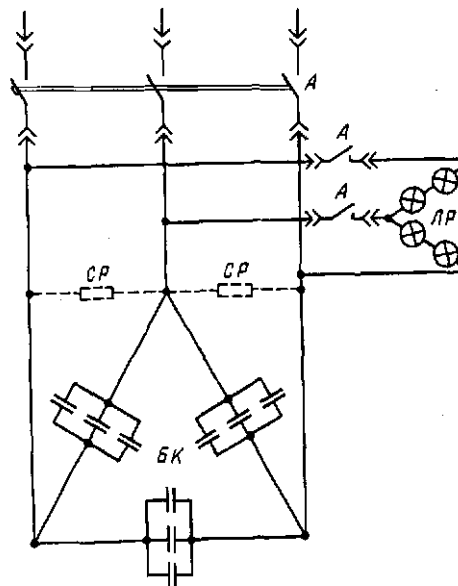


Рисунок 12.5 – Схема автоматичного відмикання розрядних опорів

У системах Г-Д із приводними синхронними двигунами прокатних станів, екскаваторів, що працюють з різкозмінюваним навантаженням застосування НЕ сприяють підвищенню стійкості за рахунок форсування збудження шляхом введення в контур збудження енергії з більш

високими параметрами в порівнянні із ТЗ. Для СД механізмів складних і безперервних технологічних процесів, що працюють з режимом самозапуску ЄНЕ забезпечують інтенсивне гасіння поля для скорочення часу уведення АПЗ й АВР. Підвищення енергетичних показників збуджувачів може бути досягнуте з використанням енергії, запасеної в накопичувачі у момент комутації вентилів.

Таким чином, застосування НЕ може дозволити вирішувати наступні завдання:

- забезпечення успішного пуску номінально завантажених СД в умовах зниженої напруги або при живленні СД від протяжних ЛЕП;
- інтенсивне гасіння поля збудження СД для уведення АПЗ або АВР з метою забезпечення безперервності технологічних процесів після короткочасної перерви електроживлення;
- підвищення стійкості роботи СД при короткочасних глибоких зниженнях напруги або при прикладанні значних ударних навантажень на вал двигуна за рахунок форсування збудження;
- підвищення енергетичних показників СЗ за рахунок використання енергії, занесеної накопичувачем.

Аналіз різних типів накопичувачів показує, що застосування накопичувачів з механічною частиною в існуючих синхронних електроприводах для підвищення електромагнітного моменту [31] ускладнено внаслідок необхідності розміщення НЕ в безпосередній близькості від СД, складності обслуговування й вартості додаткової електричної машини. Застосування електрохімічних й індуктивних НЕ обмежене технічними характеристиками накопичувальних пристроїв. Таким чином, найбільш перспективним є застосування ємнісних НЕ, які дозволяють:

- зменшити фазовий зсув між е.р.с. і струмом ОЗ з одночасним збільшенням струму i_f і його активної складової, а також використати енергію, запасену накопичувачем, що веде до росту асинхронного моменту;
- надійно виключати тиристри збуджувача зустрічним струмом або зустрічною напругою ЄНЕ й виводити енергію з контуру збудження незалежно від наявності й величини напруги електромережі, що живить збуджувач з бажаною швидкодією;
- підвищити стійкість СД шляхом підвищення швидкодії режиму форсування за рахунок ємнісної компенсації інерційності контуру збудження й введення енергії накопичувача з більш високими параметрами.

Контрольні питання до теми 12 С

1. Вкажіть питомі втрати енергії для статичних низьковольтних конденсаторів та синхронних генераторів.

2. Визначте, яка різниця між поточним та середнім зваженим коефіцієнтом потужності.
3. Визначте особливості деяких пристроїв, що компенсують реактивну потужність.
4. Яким чином втрати енергії залежать від коефіцієнта потужності.
5. Наведіть схему приєднання конденсаторів до шин напругою 380 В.
6. Наведіть схеми вмикання розрядних опорів в комплектних конденсаторних установках.

ТЕМА 13С ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ТА ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ПРОДУКТИВНОСТІ ТУРБОМЕХАНІЗМУ ЗАСУВКОЮ ТА ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ РОБОЧОГО КОЛЕСА

Побудова сумісних характеристик турбомеханізмів та мережі

Для забезпечення виконання часової або навантажувальної діаграми необхідно побудувати сумісні характеристики турбомеханізма та мережі при різних способах регулювання продуктивності.

Регулювання продуктивності та напору можливо застосуванням засувки, поворотом лопаток направляючого апарата та зміною швидкості обертання робочого колеса турбомеханізма.

Сумісні характеристики насосної установки та мережі при регулювання продуктивності засувкою та швидкістю обертання робочого колеса наведені на рис.13.1.

Залежність напору насосу від продуктивності при заданій швидкості обертання робочого колеса

$$H_n = H_0 - R_n \cdot Q_n^2,$$

де H_n, H_0 – номінальний та напір при нульовій продуктивності, м;

R_n – номінальний опір насосу;

Q_n – номінальна продуктивність насосу, м³/с.

Характеристика мережі

$$H = H_{ст} + R_m \cdot Q_n^2,$$

де

R_m – опір мережі при номінальній продуктивності.

Потужність насосу

$$P = \rho \cdot g \frac{QH \cdot 10^{-3}}{\eta_{нас}} \text{ кВт},$$

де ρ – питома щільність води, 1000 м³/с;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

$\eta_{нас}$ – ККД насоса.

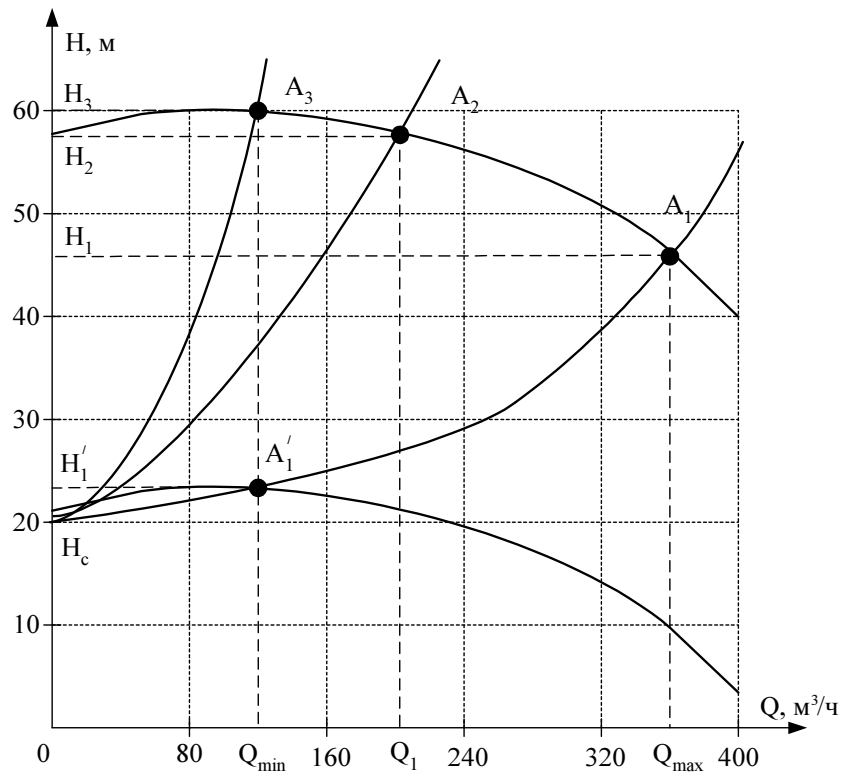


Рисунок 13.1 – Характеристика насосної установки при регулюванні продуктивності засувкою (точки A_1, A_2, A_3) та швидкості обертання робочого колеса (точка A'_1)

Залежність продуктивності від швидкості обертання робочого колеса

$$Q = \sqrt{\frac{H_0 v^2 - H_{CT}}{R_M + R_{нас}}},$$

де H_{CT} – статичний напір при нульовій продуктивності;

$v = \frac{\omega}{\omega_H}$ – відносна швидкість обертання робочого колеса.

Номінальний опір насоса визначається при номінальних тиску та продуктивності за виразом

$$R_H = \frac{H_0 - H_H}{(Q_H)^2}.$$

Опір мережі при Q_x і H_x визначається

$$R_x = \frac{H_x - H_{CT}}{(Q_x)^2}.$$

При регулюванні продуктивності насоса засувкою (рис.3.1) задається напір H_c , номінальний опір насосу та опори мережі для точок A_1, A_2, A_3 при номінальній частоті обертання двигуна.

При регулюванні продуктивності обертанням робочого колеса задається R_H та опір мережі в точці A'_1 . Частота обертання двигуна, яка визначається за виразом

$$\omega_x = \frac{\omega_H}{Q_H} \cdot Q_x.$$

Для будь-якої точки зв'язок напору та продуктивності має вигляд:

$$H_x = \frac{H_H}{Q_H^2} \cdot Q_x^2.$$

Сумісні характеристики вентиляторної установки та мережі при регулюванні продуктивності засувкою та швидкістю обертання робочого колеса наведені на рис.13.2.

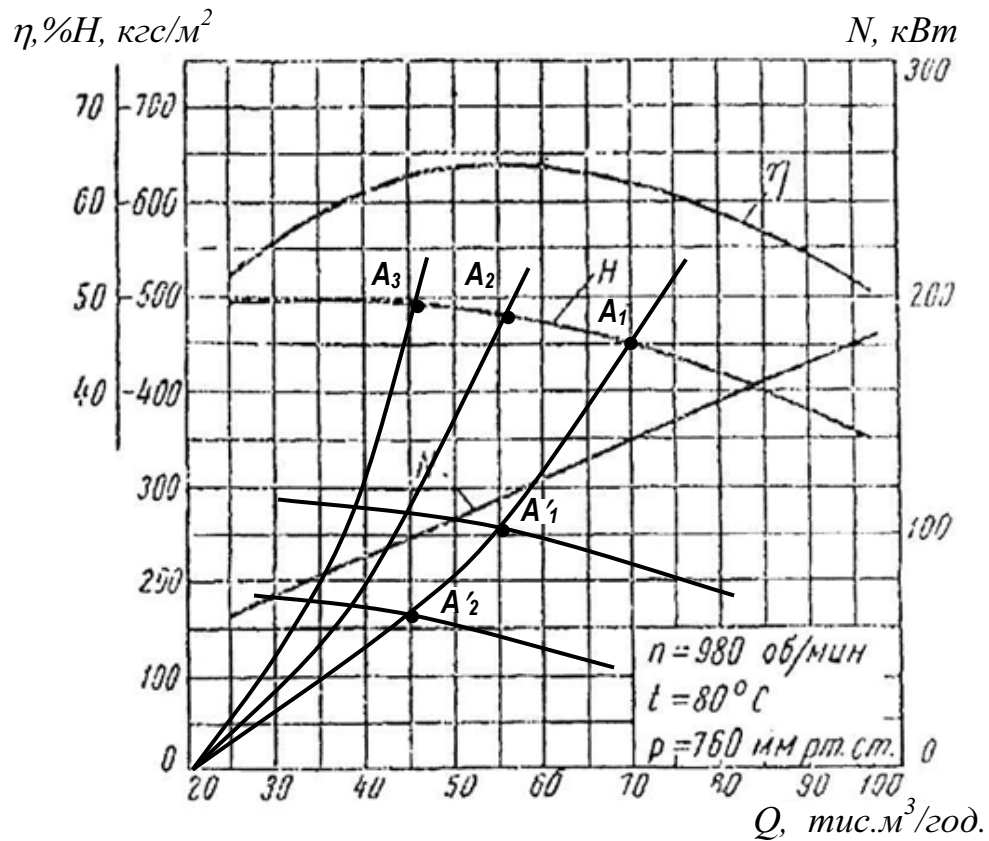


Рисунок 13.2 – Характеристики вентиляторної установки при регулюванні продуктивності засувкою (точки A_1, A_2, A_3) та швидкості обертання робочого колеса (точка A'_1, A'_2)

Залежність напору вентилятора та димовсмоктувача від продуктивності

$$H_H = H_0 - R_H \cdot Q_H^2,$$

де H_H, H_0 – номінальний та напір при нульовій продуктивності, кгс/м^2 ;

R_H – номінальний опір вентилятора;

Q_H – номінальна продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$.

Характеристика мережі

$$H = R_M \cdot Q_H^2,$$

де

R_M – опір мережі при номінальній продуктивності.

Потужність вентилятора (димовсмоктувача)

$$P = g \frac{QH \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{нас}}}, \text{кВт}$$

де H – напір вентилятора, Па, $1 \text{ мм вод.ст.} = 1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па}$;
 Q – продуктивність вентилятора (димовсмоктувача), $\text{м}^3/\text{с}$;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
 $\eta_{\text{нас}}$ – ККД вентилятора.

Залежність продуктивності від швидкості обертання робочого колеса

$$Q = \sqrt{\frac{H_0 v^2}{R_M + R_{\text{вент.}}}},$$

де H_0 – напір при нульовій продуктивності;

$v = \frac{\omega}{\omega_H}$ – відносна швидкість обертання робочого колеса.

Номінальний опір вентилятора та димовсмоктувача визначається при номінальних тиску та продуктивності за виразом

$$R_H = \frac{H_0 - H_H}{(Q_H)^2}.$$

Опір мережі при Q_x і H_x визначається

$$R_x = \frac{H_x}{(Q_x)^2}.$$

При регулюванні продуктивності вентилятора засувкою задається напір $H_{\text{ст}}=0$, номінальний опір вентилятора та опори мережі для точок Q_1 , Q_2 , $\text{м}^3/\text{год.}$, частота обертання двигуна $f=50 \text{ Гц}$.

При регулюванні продуктивності обертанням робочого колеса задається R_H та опір мережі в точці Q_H . Частота обертання двигуна визначається за виразом

$$\omega_x = \frac{\omega_H}{Q_H} \cdot Q_x.$$

Для будь-якої точки зв'язок напору та продуктивності має вигляд

$$H_x = \frac{H_H}{Q_H^2} \cdot Q_x^2.$$

Сумісні характеристики димовсмоктувача та мережі при регулювання продуктивності направляючим апаратом та швидкістю обертання робочого колеса наведені на рис.13.3.

При регулюванні продуктивності димовсмоктувача направляючим апаратом задається напір $H_{\text{ст}}=0$, номінальний опір димовсмоктувача та опори мережі для точок Q_1 , Q_2 , Q_H , $\text{м}^3/\text{год.}$ Частота обертання двигуна $f=50 \text{ Гц}$.

При регулюванні продуктивності обертанням робочого колеса задається R_H та опір мережі в точці Q_H . Частота обертання двигуна визначається за виразом

$$\omega_x = \frac{\omega_H}{Q_H} \cdot Q_x.$$

Для будь-якої точки зв'язок напору та продуктивності має вигляд

$$H_x = \frac{H_H}{Q_H^2} \cdot Q_x^2.$$

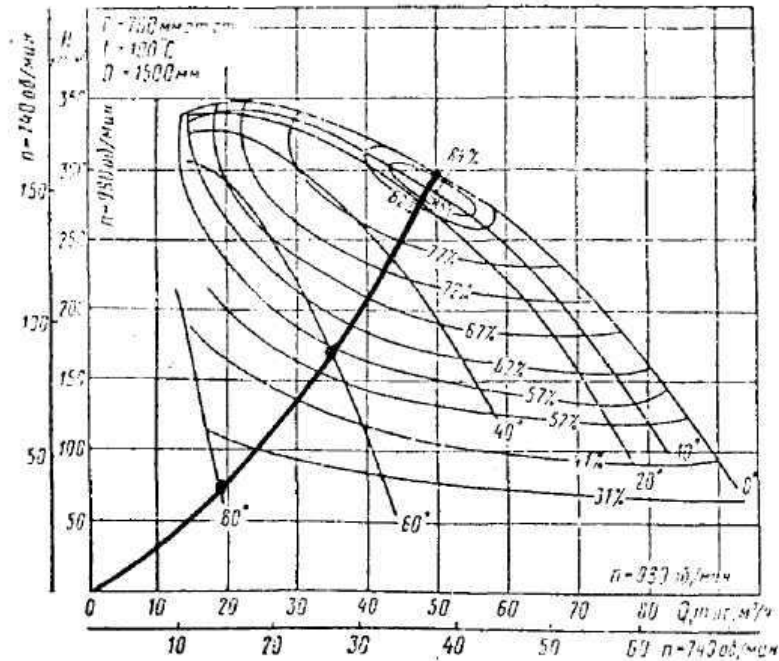


рис. 13.3. Серединами на характеристика димовсмокувача типу ДН-15

Визначення добових витрат та втрат електроенергії при різних способах регулювання продуктивності турбомеханізму

Визначення добових витрат електроенергії розраховується на підставі результатів моделювання режимів регулювання продуктивності турбомеханізму.

Добові витрати електроенергії при регулюванні продуктивності турбомеханізму засувкою або направляючим апаратом

$$W_1 = P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$W_1 = 29,500 \cdot 8 + 106,400 \cdot 4 + 52,000 \cdot 12 = 1285,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

де W_1 - добові витрати електроенергії;

P_1, P_2, P_3 - потужність, яка спожита турбомеханізмом за час роботи t_1, t_2, t_3

Добові витрати електроенергії при регулюванні продуктивності швидкістю обертання робочого колеса турбомеханізму.

$$W_2 = P'_1 t_1 + P'_2 t_2 + P'_3 t_3, \text{кВт} \cdot \text{год},$$

$$W_2 = 14600 \cdot 8 + 114000 \cdot 4 + 36000 \cdot 12 = 1004,8 \text{кВт} \cdot \text{год}$$

де W_2 - добові витрати електроенергії;

P'_1, P'_2, P'_3 - потужність, яка спожита за час регулювання продуктивності швидкістю обертання робочого колеса турбомеханізму.

Різниця добових витрат електроенергії

$$\Delta W_D = W_1 - W_2 = 1285,6 - 1004,8 = 280,8 \text{кВт} \cdot \text{год}$$

Різниця річних витрат електроенергії

$$\Delta W_P = \Delta W_D \cdot T = 280,8 \cdot 8760 = 245,98 \cdot 10^4 \text{кВт} \cdot \text{год}$$

де $T=8760$ годин на рік.

Вартість економії електроенергії

$$C_e = C_{y.o.} \cdot \Delta W_P = 245,98 \cdot 10^4 \cdot 0,05 = 122990,4 \text{у.о.}$$

де $C_{y.o.}$ - вартість 1 кВт·год електроенергії, 0,25 грн. (0,05 у.о.).

Розрахунок терміну окупності енергозберігаючого електропривода

При виборі способу регулювання продуктивності швидкістю обертання робочого колеса турбомеханізму необхідно врахувати вартість перетворювача частоти та узгоджувального трансформатора.

Вартість перетворювача частоти невеликої потужності складає:
 $C_{уп} = (100 \dots 120) \text{у.о./кВт}$.

Вартість узгоджувального трансформатора (60...75) у.о./кВА.

Потужність асинхронного двигуна $P_n = 110$ кВт.

Отже, вартість перетворювача частоти складає

$$C_{п} = C_{уп} P = (100 \dots 120) \cdot 110 = (11000 \dots 13200) \text{у.о.}$$

Трансформатора

$$C_{т} = C_{ут} \cdot S_{тр} = (60 \dots 70) \cdot 160 = (9600 \dots 11200) \text{у.о.}$$

Повна вартість електрообладнання

$$C_{eo} = C_{п} + C_{т} = (11000 \dots 13200) + (9600 \dots 11200) = (20600 \dots 24400) \text{у.о.}$$

Приймаємо середню вартість електрообладнання

$$C_{\text{ср}} = \frac{20600 + 24400}{2} = 22500 \text{ у.о.}$$

Енергія за рік при регулюванні продуктивності засувкою або направляючим апаратом

$$W_1 = 1285,6 \cdot 365 = 469,244 \cdot 10^3 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Енергія за рік при регулюванні швидкості обертання робочого колеса турбомеханізму

$$W_2 = 1004,8 \cdot 365 = 366,752 \cdot 10^3 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Зниження споживаної енергії при переході на регульований електропривод

$$\Delta W = W_1 - W_2 = 469,244 \cdot 10^3 - 366,752 \cdot 10^3 = 102,492 \cdot 10^3 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Ефект, обумовлений застосуванням регульованого електроприводу

$$C_e = C_p \cdot \Delta W = 0,037 \cdot 2,46 \cdot 10^6 = 9,1 \cdot 10^4 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Строк окупності при використанні перетворювача частоти складе:

$$t_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{срп}}}{C_e} = \frac{22500}{3,79 \cdot 10^3} = 5,93 \text{ р.}$$

Контрольні питання до теми 13 С

1. Наведіть залежність напору турбомеханізму від продуктивності.
2. Визначте номінальний опір вентилятора.
3. Наведіть залежність напору від продуктивності насосу.
4. Визначте витрати втрат при регулюванні продуктивності засувкою.
5. Визначте витрати потужності при регулюванні продуктивності швидкості обертання робочого колеса.
6. Назвіть заходи щодо економії електроенергії у турбомеханізмах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Чулков Н.Н., Чулков А.Н. Электрофикация карьеров в задачах и примерах. „Недра”, 1976.-с.277.
2. Федоров А.А., Кашенева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий.-М.: Энергия, 1979.-408с., ил.
3. Железко Ю.С. Методы расчета технических потерь электроэнергии в сетях 380/220 В.-Электрические станции.-2002. №1.-с.14-20.
4. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет нормативных характеристик технических потерь электроэнергии.-Электрические станции.-2002.-№2. С.-45-51.
5. Евсеев А.Н. Распределение потерь электроэнергии в общих элементах электрической сети между различными потребителями. Промышленная энергетика.-2002.-№7.-С.37-41.
6. Камышан Н.Г., Молодых А.В. Минимизация потерь электроэнергии в участковых передвижных комплексных трансформаторных подстанциях.- Промышленная энергетика.-2001.-№ 2.-С.-24-28.
7. Шевченко В.В., Грачева Е.И. Определение потерь электроэнергии в цеховых сетях напряжением до 1000 В. Промышленная энергетика.-2001.-№10.-С.33-35.
8. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях.-М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. Дерзкий В.Г. Методика расчета потерь электроэнергии в электрических сетях облэнерго.-К.: О-во «Знание» Украины, 2001.
10. Дерзкий В.Г. Экспертиза структуры потерь электроэнергии в распределительных сетях Минтопэнерго.- Энергетика и электрификация.-2002.-№4.-С.18-22.
11. Шукин А. И. Автоматическое управление электроприводами. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 488 с.
12. Сиротин А. А. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Энергия, 1969. – 560 с.
33. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
14. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982, - 392 с.
15. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов, - М.: Энергоатомиздат, 1985, - 560 с.
16. Основы автоматизированного электропривода / М.Г.Чиликин.– М.Соколов, В.М.Терехов, А.В.Шинянский.- М.:Энергия, 1974.- 508с.
17. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. - М.: Энергия, 1972.-240с., ил.
18. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. Изд. 3-е перераб. и доп. -М.: Энергия, 1976.-488с., ил.

19. Возбудители статические полупроводниковые для трехфазных синхронных двигателей. Общие технические требования ГОСТ 14688-81 (СТ СЭВ 1819-79).-М.: Издательство стандартов, -1981.
20. Вершинин П.П., Хашпер Л.Я. Применение синхронных электроприводов в металлургии.-М.: Металлургия, 1972.- 272с.
21. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. –Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1983.- 128с., ил.
22. Петелин Д.П. Автоматическое управление синхронными электроприводами. -М.: Энергия, 1968.-192с.,ил.
23. Новое в технике автоматизированное электропривода: Учеб.пособие/ В.Б.Низимов, Г.В.Архангельский, А.В.Садовой, М.З.Дудник.-К.: Вища шк.,1990.- 207с., ил.- (Новое в науке и технике – студентам и учащимся. Вып.19).

Конспект лекцій з дисципліни з навчальної дисципліни „Енергозбереження засобами електропривода” для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.05070204 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

Укладач Віктор Борисович Нізімов, професор, докт. техн. наук

51918, м.Дніпродзержинськ, вул.Дніпробудівська, 2

Підписано до друку

Формат 80/34 1/16. Обсяг д.а.

Тираж екз. Замовлення _____